

O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O‘RTA MAXSUS TA’LIM
VAZIRLIGI

Amirov S.F., Yoqubov M.S., Jabborov N.G‘.

NAZARIY ELEKTROTEXNIKA

O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta’lim vazirligining 2016
yil 22 yanvardagi 26- son buyrug‘iga asosan 5310200, 5310600, 5310700,
5310800, 5311000, 5311100, 5430200 ta’lim yo‘nalishlari talabalari
uchun darslik sifatida tavsiya etilgan

Toshkent 2016

УДК: 53(072)

ББК:38.58. А - 98

КБК: 38.58.

Amirov S.F., Yoqubov M.S., Jabborov N.Gʻ. Nazariy elektrotexnika: Oliy oʻquv yurtlari talabalari uchun darslik. – Toshkent: ToshTYMI, 2016. – 481 b.

Darslikda nazariy elektrotexnikaga tegishli boʻlgan tayanch tushunchalar, atamalar, oʻzgarmas va bir fazali sinusoidal tok chiziqli elektr zanjirlari, induktiv boʻgʻlangan zanjirlar, toʻrtqutbliklar, elektr filtrlari, uch fazali zanjirlar, nosinusoidal tok chiziqli elektr zanjirlari, chiziqli elektr zanjirlaridagi oʻtkinchi jarayonlar, tarqoq parametri zanjirlar, passiv ikki qutbliklar va toʻrtqutbliklar sintezi, oʻzgarmas tok nochiziq elektr va magnit zanjirlari, oʻzgaruvchan tok nochiziq elektr zanjirlari, elektrostatik maydon, oʻzgarmas tokning elektr va magnit maydonlari va oʻzgaruvchan elektromagnit maydonni hisoblash usullariga oid tegishli bakalavriat yoʻnalishlarida taʼlim olayotgan talabalar uchun yetarli darajada boʻlgan maʼlumotlar keltirilgan boʻlib, har bir bob tegishli masalalar va nazorat savollari bilan toʻldirilgan.

Darslik 5310200, 5310600, 5310700, 5310800, 5311000, 5311100, 5430200 taʼlim yoʻnalishlari talabalari uchun moʻljallangan boʻlib, undan professor-oʻqituvchilar, ishlab chiqarish sohalarining mutaxassislari, muhandislar, magistrantlar va ilmiy-texnik xodimlar hamda malaka oshirish kurslarining tinglovchilari ham foydalanishlari mumkin.

Masʼul muharrir: texnika fanlari doktori, professor **Amirov S.F.**

Taqrizchilar: Toshkent temir yoʻl muhandislari instituti “Elektr aloqa va radio” kafedrası mudiri, texnika fanlari doktori, professor **Holiqov A.A.**

Toshkent Davlat texnika universiteti “Elektronika va avtomatika” fakulteti dekani, texnika fanlari nomzodi, dotsent **Abidov Q.Gʻ.**

Toshkent Davlat texnika universiteti “Elektrotexnika va kasb taʼlimi (energetika)” kafedrası mudiri, texnika fanlari nomzodi, dotsent **Begmatov Sh.E.**

ISBN 978 – 9943 – 975 – 04 - 01

© Toshkent temir yoʻl muhandislari instituti, 2016 yil.

© Amirov Sulton Fayzullayevich, 2016 yil.

SO‘ZBOSHI

“Nazariy Elektrotexnika” fani elektrotexnika, elektr energetikasi, radioelektronika, elektr aloqa va avtomatika sohalariga oid ta'lim yo‘nalishlari va magistratura mutaxassisliklari talabalari uchun tayanch umumkasbiy fanlaridan biri hisoblanadi. Bu fanning asosiy masalasi turli elektrotexnik qurilmalarda sodir bo‘ladigan elektromagnit hodisalar va jarayonlarni sifat va miqdor tomonidan o‘rganishdir.

"Nazariy Elektrotexnika" fanidan o‘quv qo‘llanma "Elektrotexnikaning nazariy asoslari" nomi bilan O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta'lim vazirligi grifi asosida 2007- yilda chop etilgan edi. O‘tgan davr mobaynida kitob respublikamizdagi tegishli texnika oliy o‘quv yurtlari professor-o‘qituvchilari va talabalari muhokamasidan o‘tkazildi hamda ularning o‘quv qo‘llanma sifatini yanada yaxshilashga oid fikr-mulohazalari atroflicha o‘rganildi va tegishli tuzatishlar hamda qo‘shimchalar kiritildi. Jumladan, kitob “Elektr filtrlari” va “Passiv ikkiqutbliklar va to‘rtqutbliklar sintezi” boblari va nazariy elektrotexnikaga oid asosiy atamalar va tushunchalar izohli lug‘ati (Glossariy) bilan to‘ldirildi.

Oliy ta'limning fan dasturi asosida yozilgan ushbu darslikda talabalarda nazariy elektrotexnika bo‘yicha zarur va yetarli bo‘lgan tayanch tushunchalar, elektr va magnit zanjirlaridagi fizik qonunlar va hodisalarning o‘ziga xos xususiyatlari har tomonlama bayon etilgan.

Kitobdagi materiallar hozirgi zamon elektr energetikasi va elektrotexnikasiga asoslangan bo‘lib, ularning texnik yechimlari esa xalq xo‘jaligida tobora keng qo‘llanilayotgan mashinalar, jihozlar, uskunalar, ular asosida ishlayotgan avtomatlashgan texnologik majmualar elektr va magnit zanjirlarining xossa va xususiyatlarini o‘rganishga bag‘ishlangan.

So‘nggi yillarda elektrotexnikadagi tayanch tushunchalar va ta'riflarga Davlat standartlari seriyasi chiqarildi, xorijsda ushbu fan va unga yaqin bo‘lgan o‘quv adabiyotlari mazmun va mohiyatini chuqur o‘rganish natijasida oliy o‘quv yurtlari fan dasturlariga jiddiy o‘zgartirishlar kiritildi. Oliy va o‘rta maxsus o‘quv yurtlarida elektrotexnik fanlarning o‘qitilish jarayoniga yangi pedagogik va axborot texnologiyalari keng joriy etilmoqda. Bu borada darslik mazmuni elektrotexnika, energetika va avtomatika sohalariga oid ta'lim yo‘nalishlarining O‘zbekiston Respublikasi oliy va o‘rta maxsus ta'lim vazirligi tomonidan tasdiqlangan takomillashtirilgan Davlat ta'lim standartlarida "Nazariy Elektrotexnika" faniga qo‘yilgan talablarga moslashtirildi.

Darslikda keltirilgan nazorat savollari talabalarning mustaqil ta'lim olish va fikrlash qobiliyatini o‘stirish uchun xizmat qiladi. Keltirilgan

masalalar nazariy ma'lumotlarni mustahkamlashga hamda ularga amaliy va mantiqiy yondashishga va texnik idrokning o'sishiga yordam beradi.

Hozirgi vaqtda inson faoliyati doirasiga kirgan har bir soha va yo'nalishda elektrotexnika va elektronika qurilmalari mavjud. Shu sababdan elektrotexnika asoslarini bilish, uni tushunish va amalda qo'llay bilish nafaqat elektrotexnik xodimlar, balki turli soha mutaxassisleri va xodimlari uchun ham ertangi kunning ravnaqini ta'minlashda katta ahamiyat kasb etadi.

Ushbu darslikni tayyorlashda respublikamizda chop etilgan adabiyotlardan tashqari, sobiq ittifoq markaziy texnika oliy o'quv yurtlarining yetakchi olim-pedagoglari tomonidan tayyorlangan ko'pgina darsliklar, hozirgi davrda Rossiya Federatsiyasi, Amerika Qo'shma Shatlari, Germaniya, Fransiya, Hindiston va boshqa chet el mamlakatlarida chop etilgan adabiyotlar, sohaga oid monografiyalar, dissertatsiyalar, joriy qilingan Davlat standartlari hamda nazariy va ilmiy-amaliy anjumanlar materiallaridan unumli foydalanildi.

Darslikning dastlabki nusxasini o'qib chiqib, uning sifatini yaxshilash bo'yicha o'z fikr-mulohazalarini bildirgan Toshkent temir yo'l muhandislari instituti "Elektr aloqa va radio" kafedrasini mudiri, texnika fanlari doktori, professor A.A. Holiqovga, Toshkent Davlat texnika universiteti "Elektronika va avtomatika" fakulteti dekani, texnika fanlari nomzodi, dotsent Q.G'. Abidovga, shu universitet "Elektrotexnika va kasb ta'limi(energetika)" kafedrasini mudiri, texnika fanlari nomzodi, dotsent Sh.E. Begmatovga hamda qo'lyozma materialni kompyuterda terishda yaqindan yordam bergan "Temir yo'llar elektr ta'minoti" kafedrasini assistenti O.T. Boltayev va T.N. Badretdinovichlarga, shu kafedra magistrantlari N.R. Yuldashev va U.Sh. Mamadaliyevlarga mualliflar samimiy minnatdorchilik bildiradilar.

Darslik tasdiqlangan fan dasturi doirasida yozilganligi bois ko'p mavzular hajmi chegaralangan va "Nazariy Elektrotexnika" fanidan davlat tilida, lotin alifbosida yozilgan dastlabki asarlardan bo'lganligi sababli kamchiliklardan holi emas, albatta. Tegishli sohalarning mutaxassisleri, talabalar va umuman o'quvchilar fikr-mulohazalari asosida darslikning keyingi nashrlari mukammalroq bo'ladi, degan umiddamiz.

Ushbu kitob O'zbekistonda elektrotexnika va avtomatika sohalariga oid yo'nalishlar bo'yicha ilmiy maktablar yaratgan va ko'pgina olimlarni tarbiyalab voyaga yetkazgan hamda mualliflarni ushbu kitobni yozishga undagan texnika fanlari doktorlari, professorlar **Zaripov Madiyor Faxriddinovich** va **Karimov Anvar Saidabdullayevich**larning yorqin xotiralariga bag'ishlanadi.

MUNDARIJA

SO‘ZBOSHI.....	3
KIRISH.....	13
1- BO‘LIM. CHIZIQLI ZANJIRLAR.....	18
1- BOB. O‘ZGARMAS TOK CHIZIQLI ELEKTR ZANJIRLARI VA ULARNI HISOBLASH USULLARI.....	18
1.1. Elektr zanjirlarini tavsiflovchi asosiy kattaliklar.....	18
1.1.1. Elektr maydonining kuchlanganligi.....	18
1.1.2. Elektr potensial va kuchlanish.....	19
1.1.3. Elektr toki. Tok zichligi.....	20
1.2. Elektr zanjiri va uning elementlari.....	21
1.3. Om qonuni.....	27
1.4. Zanjirning EYK manbali qismi uchun Om qonuni.....	27
1.5. Katta toklarda Om qonunining buzilishi.....	28
1.6. Potensial diagramma.....	30
1.7. Elektr energiyasi va elektr quvvati. Quvvatlar balansi.....	34
1.7.1. Elektr energiyasi.....	34
1.7.2. Elektr quvvati.....	35
1.7.3. Elektr energiyasi manbaining FIK.....	35
1.7.4. Elektr zanjirlarida quvvatlar balansi.....	36
1.8. Kirxgof qonunlari.....	37
1.9. Kirxgof qonunlari asosida murakkab elektr zanjirlarining topologik tenglamalarini tuzish.....	38
1.10. Chiziqli elektr zanjiri sxemalarini ekvivalent o‘zgartirish...	42
1.10.1. Ketma-ket ulangan elementlardan iborat zanjirni ekvivalent o‘zgartirish.....	42
1.10.2. Parallel ulangan elementlardan iborat zanjirlarni ekvivalent o‘zgartirish.....	43
1.10.3. Aralash ulangan elementlardan iborat zanjirlarni ekvivalent o‘zgartirish.....	44
1.10.4. Qarshiliklar uchburchagini qarshiliklar yulduziga va aksincha ekvivalent o‘zgartirishlar.....	47
1.10.5. EYK va tok manbaiga ega bo‘lgan parallel shoxobchalarni ekvivalent o‘zgartirish.....	49
1.11. Proporsional kattaliklar usuli.....	52
1.12. Kontur toklar usuli.....	53
1.13. Tugun potentsiallar usuli.....	55
1.14. Ikki tugun usuli.....	58
1.15. Ustma-ustlash prinsipi va uni elektr zanjirlarini	

	hisoblashda qo‘llash.....	59
1.16.	O‘zarolik xususiyati va uni tarmoqlangan elektr zanjirlarini hisoblashda qo‘llash.....	63
1.17.	Aktiv ikki qutblik haqida teorema va uni murakkab elektr zanjirlarini hisoblashda qo‘llash. Ekvivalent generator usuli.....	64
1.18.	Asosiy topologik tushunchalar va ularni elektr zanjirlarini hisoblashda qo‘llash.....	68
2- BOB.	BIR FAZALI SINUSOIDAL TOK CHIZIQLI ELEKTR ZANJIRLARI.....	72
2.1.	Umumiy ma'lumotlar.....	72
2.2.	Sinusoidal tok va kuchlanishlarning amplitudasi, chastotasi va fazasi.....	72
2.3.	Sinusoidal EYK ni hosil qilish.....	73
2.4.	Sinusoidal tok, EYK va kuchlanish ta'sir etuvchi (effektiv) va o‘rtacha qiymatlari.....	74
2.5.	Sinusoidal kattaliklarni vektorlar bilan tasvirlash.....	77
2.6.	Sinusoidal tok zanjirlarida rezistor, induktiv g‘altak va kondensator.....	78
2.6.1.	Rezistiv elementli sinusoidal tok zanjiri.....	79
2.6.2.	Induktiv elementli elektr zanjirida sinusoidal tok. Induktiv qarshilik.....	81
2.6.3.	Rezistor va induktiv g‘altakdan iborat zanjir.....	82
2.6.4.	Sig‘im elementli elektr zanjiridagi sinusoidal tok. Sig‘im qarshiligi.....	84
2.6.5.	Rezistor va kondensatordan iborat zanjir.....	86
2.6.6.	Rezistor, induktiv g‘altak va kondensator ketma - ket ulangan sinusoidal tok zanjiri.....	87
2.6.7.	Rezistor, induktiv g‘altak va kondensator parallel ulangan sinusoidal tok zanjiri.....	88
2.7.	Sinusoidal tok zanjirida quvvat.....	89
2.8.	Sinusoidal tok zanjirlarini kompleks usulda hisoblash.....	91
2.8.1.	Sinusoidal kattaliklarni kompleks tekislikda vektorlar bilan tasvirlash.....	91
2.8.2.	Om va Kirxgof qonunlarining kompleks shakli.....	93
2.8.3.	Kompleks quvvat.....	94
2.8.4.	Sinusoidal tok zanjirlarida quvvatlar balansi.....	95
2.8.5.	Sinusoidal tok zanjirlarini kompleks usulida hisoblash.....	97
2.9.	Elektr zanjirlarida rezonans.....	99
2.9.1.	Kuchlanishlar rezonansi.....	100

2.9.2.	Toklar rezonansi.....	103
2.10.	Elektrotexnik qurilmalar quvvat koeffitsiyenti va uning mohiyati. Quvvat koeffitsiyentini oshirish usullari va hisoblash asoslari.....	107
3- BOB.	INDUKTIV BOG‘LANGAN ZANJIRLAR.....	110
3.1.	Umumiy ma'lumotlar.....	110
3.2.	O‘zaro induksiya EYK.....	111
3.3.	Ketma-ket va parallel ulangan o‘zaro induktiv bog‘langan zanjirlar.....	112
3.4.	O‘zaro induktiv bog‘langan zanjirlarni hisoblash.....	116
3.5.	Ikki konturli induktiv bog‘langan zanjirda bir xil nomlangan qismlarni va o‘zaro induktivlikni aniqlash usullari.....	119
3.6.	Induktiv bog‘langan zanjirlar ekvivalent sxemalari.....	120
3.7.	Induktiv bog‘langan zanjirlarda energiyani uzatish.....	122
3.8.	Induktiv bog‘langan konturlarda rezonans.....	123
3.9.	O‘zaksiz transformatorlar. Transformatorlar almashlash sxemasi va vektor diagrammasi.....	125
4- BOB.	TO‘RTQUTBLIKLAR.....	132
4.1.	Umumiy ma'lumotlar.....	132
4.2.	To‘rtqutblikning T-simon ekvivalent sxemasi.....	133
4.3.	To‘rtqutblikning II-simon ekvivalent sxemasi.....	134
4.4.	To‘rtqutblik koeffitsiyentlarini tajriba yordamida aniqlash..	135
4.5.	To‘rtqutblikning salt ishlash va qisqa tutashishi.....	137
4.6.	Istalgan yuklama uchun to‘rtqutblikning kirish qarshiligi...	138
5- BOB.	ELEKTR FILTRLAR.....	140
5.1.	Umumiy ma'lumotlar.....	140
5.2.	Reaktiv filtrlarning sinallarni o‘tkazish sharti.....	141
5.3.	<i>k</i> rusumli filtrlar.....	147
5.4.	<i>m</i> rusumli filtrlar.....	152
5.5.	Ko‘priksimon filtrlar.....	155
5.6.	Noinduksion filtrlar.....	157
6- BOB.	UCH FAZALI ZANJIRLAR.....	161
6.1.	Umumiy ma'lumotlar.....	161
6.1.1.	Uch fazali tizimlar. Uch fazali sinxron generator.....	161
6.1.2.	Uch fazali zanjirlarning ulanish sxemalari.....	163
6.2.	Uch fazali zanjirlarning simmetrik shakli.....	166
6.2.1.	Yuklama yulduz usulida ulangan zanjirda simmetrik rejim..	166
6.2.2.	Yuklama uchburchak usulida ulangan zanjirda simmetrik rejim.....	168

6.2.3.	Simmetrik uch fazali sistemaning quvvatlari.....	169
6.2.4.	Murakkab uch fazali simmetrik zanjirlarni hisoblash.....	170
6.3.	Nosimmetrik uch fazali zanjirlar.....	171
6.3.1.	Yulduz usulida ulangan neytral simli zanjir.....	171
6.3.2.	Yulduz usulida ulangan neytral simsiz zanjir.....	173
6.3.3.	Yuklama uchburchak ulangan zanjir.....	178
6.3.4.	Nosimmetrik uch fazali zanjirning quvvati.....	181
6.4.	Tarmoqlangan uch fazali zanjirlarni hisoblash.....	181
6.4.1.	Yulduz sxemada ulangan bir nechta iste'molchili uch fazali zanjirni hisoblash.....	182
6.4.2.	Yulduz va uchburchak sxemalarda ulangan uch fazali zanjirni hisoblash.....	183
6.4.3.	Bir va uch fazali iste'molchili uch fazali zanjirni hisoblash.	185
6.5.	Uch fazali zanjirlarda quvvatni o'lchash.....	186
6.5.1.	Simmetrik uch fazali zanjirda aktiv quvvatni o'lchash.....	186
6.5.2.	Nosimmetrik uch fazali zanjirda aktiv quvvatni o'lchash....	187
6.5.3.	Reaktiv quvvatni o'lchash.....	188
6.6.	Aylanuvchi magnit maydoni.....	189
6.6.1.	Pulsatsiyalanuvchi magnit maydoni.....	189
6.6.2.	Aylanuvchi magnit maydonini hosil qilish.....	191
6.6.3.	Uch fazali asinxron motorning ishlash prinsipi.....	193
6.6.4.	Bir fazali asinxron motorning ishlash prinsipi.....	194
6.7.	Simmetrik tashkil etuvchilar usuli.....	195
6.7.1.	Uch fazali vektorlar sistemasining simmetrik tashkil etuvchilari.....	195
6.7.2.	Simmetrik tashkil etuvchilarni o'lchash usullari.....	199
6.8.	Uch fazali zanjirlarni simmetrik tashkil etuvchilar usuli yordamida hisoblash.....	202
6.8.1.	Simmetrik uch fazali zanjirlarni har xil ketma-ketlikli toklar uchun qarshiliklari.....	202
6.8.2.	Nosimmetrik manbadan ta'minlanayotgan simmetrik uch fazali zanjirlardagi toklarni aniqlash.....	204
6.8.3.	Simmetrik kuchlanishlar sistemasidan ta'minlanayotgan nosimmetrik uch fazali zanjirlarni hisoblash.....	205
7- BOB.	CHIZIQLI ELEKTR ZANJIRLARIDA DAVRIY NOSINUSOIDAL TOKLAR.....	213
7.1.	Umumiy ma'lumotlar.....	213
7.2.	Nosinusoidal tok va kuchlanishlarni Fure trigonometrik qatoriga yoyish.....	213
7.3.	Davriy egri chiziqlarning simmetriya xususiyatlari.....	215

7.4.	Davriy funksiyalarni grafoanalitik usulda trigonometrik qatorlarga yoyish.....	217
7.5.	Nosinusoidal tok va kuchlanishlarning maksimal, effektiv (ta'sir etuvchi) va o'rtacha qiymatlari.....	220
7.6.	Nosinusoidal davriy funksiyalar shakllarini tavsiflovchi koefitsiyentlar.....	222
7.7.	Davriy nosinusoidal tok zanjirlarida quvvatlar.....	224
7.8.	Davriy nosinusoidal tok chiziqli elektr zanjirlarini hisoblash.....	225
7.9.	Nosinusoidal tok va kuchlanishlarni ekvivalent sinusoidalar bilan almashtirish.....	229
7.10.	Nosinusoidal tok zanjirlarida rezonans hodisalari.....	230
7.11.	Uch fazali elektr zanjirlarida yuqori garmonikalar.....	232
8- BOB.	CHIZIQLI ELEKTR ZANJIRLARDA O'TKINCHI JARAYONLAR.....	236
8.1.	Umumiy ma'lumotlar.....	236
8.2.	O'tkinchi jarayon masalasini o'zgaras koefitsiyentli chiziqli differensial tenglamalar yechimiga keltirish.....	238
8.3.	Tok va kuchlanishlarning turg'un va erkin tashkil etuvchilari.....	238
8.4.	Kommutatsiya qonunlari va boshlang'ich shartlar.....	239
8.5.	O'tkinchi jarayonlarni hisoblash usullarining xususiyatlari..	241
8.6.	O'tkinchi jarayonlarni hisoblashning klassik usuli.....	242
8.7.	R, L zanjirida o'tkinchi jarayonlar.....	243
8.8.	R, C zanjirida o'tkinchi jarayonlar.....	249
8.9.	R, L va C elementlar ketma-ket ulangan zanjirda o'tkinchi jarayonlari.....	254
8.10.	O'tkinchi jarayonlarni klassik usulda hisoblashning umumiy tartibi.....	257
8.11.	Ikki qutblikni uzluksiz o'zgaruvchan kuchlanish manbaiga ulash (Dyuamel integrali).....	261
8.12.	O'tkinchi jarayonlarni hisoblashda Laplas o'zgartirishi (formulasi)dan foydalanish.....	263
9- BOB.	TARQOQ PARAMETRLI ELEKTR ZANJIRLAR.....	276
9.1.	Umumiy ma'lumotlar.....	276
9.2.	Bir jinsli liniyaning differensial tenglamalari.....	276
9.3.	Bir jinsli liniyaning kompleks shakldagi tenglamalari.....	278
9.4.	Bir jinsli liniyaning giperbolik shakldagi tenglamalari.....	280
9.5.	Bir jinsli liniyaning kuchlanish va tokning oniy qiymatlardagi tenglamalari.....	281

9.6.	Bir jinsli liniyaning ikkilamchi parametrlari.....	283
9.7.	Bir jinsli liniyani to'rtqutblik ko'rinishda tasvirlash.....	287
9.8.	Bir jinsli liniyaning xossalari.....	289
9.8.1.	Signalni buzmaydigan liniya.....	289
9.8.2.	Isrofsiz liniya.....	289
9.8.3.	Turg'un to'lqinlar.....	291
9.9.	Tarqoq parametrlı zanjirlarda o'tkinchi jarayonlar to'g'risida.....	295
10- BOB.	PASSIV IKKIQTBLIKLAR VA TO'RTQTBLIKLAR SINTEZI.....	299
10.1.	Umumiy ma'lumotlar.....	299
10.2.	Passiv elektr zanjirlari kirish funksiyalarining xossalari.....	301
10.3.	Kirish funksiyalarini sodda kasrlar bilan ifodalash.....	302
10.4.	Maxraji haqiqiy va mavhum ildizlarga ega bo'lgan kirish funksiyani sodda kasrlarga yoyish yordamida amalga oshirish.....	303
10.5.	To'rtqutblik uzatish funksiyasining sintezi haqida	305
2- BO'LIM.	NOCHIZIQ ZANJIRLAR.....	313
11- BOB.	O'ZGARMAS TOK NOCHIZIQ ELEKTR VA MAGNIT ZANJIRLARI.....	313
11.1.	Umumiy ma'lumotlar.....	313
11.2.	O'zgarms tok nochiziq elektr zanjirlarini hisoblash.....	317
11.2.1.	Nochiziq elektr zanjirlarni grafik usulda hisoblash.....	317
11.2.2.	Nochiziq elektr zanjirlarini analitik usulda hisoblash.....	325
11.2.3.	Nochiziq elektr zanjirlarini linearizatsiyalash usuli yordamida hisoblash.....	327
11.2.4.	Nochiziq elektr zanjirlarini iteratsiya usuli yordamida hisoblash.....	329
11.3.	Doimiy magnit oqimli magnit zanjirlari.....	331
11.3.1.	Umumiy ma'lumotlar.....	331
11.3.2.	Magnit zanjirlarining asosiy qonunlari.....	333
11.3.3.	Elektr va magnit zanjirlaridagi o'xshashliklar.....	335
11.3.4.	Shoxobchalangan magnit zanjirlarini hisoblash.....	337
12- BOB.	O'ZGARUVCHAN TOK NOCHIZIQ ELEKTR ZANJIRLARI.....	340
12.1.	Umumiy ma'lumotlar.....	340
12.2.	Nochiziq xarakteristikalarini approksimatsiyalash.....	341
12.3.	Ekivalent linearizatsiya usuli.....	342
12.4.	O'zgaruvchan tok zanjirlarida nochiziq sig'im.....	346
12.5.	O'zgaruvchan tokni nochiziq elementlar yordamida	

	to'g'rilash.....	347
12.6.	Ferromagnit elementli o'zgaruvchan tok elektr zanjirlari....	352
12.6.1.	Umumiy ma'lumotlar.....	352
12.6.2.	Gisterezisni tok egri chizig'i shakliga ta'siri.....	354
12.6.3.	Ferromagnit o'zakli induktiv g'altak almashlash sxemasi va vektor diagrammasi.....	356
12.6.4.	Ferromagnit o'zakli transformator.....	360
12.7.	Ferrorezonans hodisasi.....	365
12.7.1.	Umumiy ma'lumotlar.....	365
12.7.2.	Kuchlanishlar ferrozonansi.....	366
12.7.3.	Toklar ferrozonansi.....	368
12.7.4.	Ferrozonansli kuchlanish stabilizatori.....	370
3- BO'LIM.	ELEKTROMAGNIT MAYDON.....	372
13- BOB.	ELEKTROSTATIK MAYDON.....	372
13.1.	Elektrostatik maydonni tavsiflovchi asosiy kattalik va munosabatlar.....	372
13.2.	Elektr maydonidagi materiallarning xarakteristiklari.....	377
13.3.	Elektr maydoni kuchlanganligi vektorining oqimi. Gauss teoremasi.....	379
13.4.	Gauss teoremasini sig'im va elektr maydonini hisoblashda qo'llanishi.....	381
13.5.	Elektrostatik maydon energiyasi.....	384
13.6.	Elektrostatik maydonda mexanik kuchlar.....	386
13.7.	Ikkita dielektrik chegarasidagi elektr maydoni.....	388
13.8.	Elektrostatik maydonni hisoblash usullari.....	389
14- BOB.	O'ZGARMAS TOKNING ELEKTR MAYDONI.....	392
14.1.	O'tkazuvchanlik toki va uning zichligi.....	392
14.2.	Om, Kirxgof va Joul -Lens qonunlarining differensial shakli.....	392
14.3.	O'tkazuvchi muhitdagi elektr maydoni uchun Laplas tenglamasi.....	394
14.4.	Tokni bir o'tkazuvchi muhitdan boshqa o'tkazuvchi muhitga o'tishi.....	394
14.5.	O'tkazuvchi muhit elektr maydoni va elektrostatik maydon o'rtasidagi o'xshashliklar.....	395
14.6.	O'tkazuvchi muhitdagi elektr maydonini hisoblashga doir masalalar.....	397
15- BOB.	O'ZGARMAS TOKNING MAGNIT MAYDONI.....	400
15.1.	Magnit maydonni tavsiflovchi asosiy kattalik va munosabatlar.....	400

15.2.	To‘la tok qonuni va uni magnit maydonini hisoblashda qo‘llanishi.....	402
15.3.	Bio-Savar-Laplas qonuni va undan foydalanish.....	406
15.4.	Ikki muhit chegarasidagi magnit maydoni.....	408
15.5.	Magnit maydon energiyasi.....	409
15.6.	Magnit maydonidagi mexanik kuchlar.....	410
16- BOB.	ELEKTROMAGNIT MAYDON.....	414
16.1.	To‘la elektr tok va uning zichligi.....	414
16.2.	O‘tkazuvchanlik toki zichligining divergensiya va to‘la tokning uzluksizligi.....	416
16.3.	Maksvell tenglamalari.....	417
16.4.	Umov-Poynting teoremasi.....	421
16.5.	Dielektrik muhitda o‘zgaruvchan elektromagnit maydon....	425
16.6.	O‘tkazuvchi muhitda o‘zgaruvchan elektromagnit maydon. Nazariy elektrotexnikaga oid asosiy atamalar va tushunchalar izohli lug‘ati (Glossariy).....	430 433
	Foydalanilgan adabiyotlar.....	475
	ILOVALAR.....	478

KIRISH

“Nazariy elektrotexnika” fani mustaqil ilmiy yo‘nalish sifatida elektr va magnit maydonlarini o‘zaro bog‘langan holda tadqiq etish hamda elektrotexnik uskunalari elektr zanjirlarini hisoblash zarurati natijasida paydo bo‘ldi. “Nazariy elektrotexnika” fani elektromexanika va fizikaning rivojlanishi bilan uzviy bog‘langan holda shakllangan, chunki yangi fizik hodisalar va qonunlarning kashf etilishi yangi elektrotexnik qurilmalar paydo bo‘lishiga olib kelgan. Ushbu fanning rivojlanishi uning fizik asoslari vujudga kelishi bilan bevosita bog‘liq bo‘lgan.

Atoqli rus olimi M.V. Lomonosov (1711-1765) atmosferaning elektrlanish nazariyasini yaratdi, massa va harakat saqlanish qonunlarini kashf etdi. Buyuk italyan olimi A. Volta (1745-1827) 1799- yilda galvanik ustunni kashf etgandan so‘ng elektr tokini hosil qilish imkoniyati yuzaga keldi. 1785- yilda Buyuk fransuz olimi Sh. O. Kulon (1736-1806) elektr zaryadlarining o‘zaro ta’sir qonunini kashf etdi. Elektr zanjirlaridagi jarayonlarni tadqiq etib V.V. Petrov (1761-1834) 1802- yilda elektr yoyni hosil qildi va uni yoritish, metallarni eritish hamda payvandlash maqsadida qo‘llash mumkinligini ko‘rsatdi.

Elektr toklarining o‘zaro ta’sirlashish qonuni A.M. Amper (1775-1836) tomonidan kashf etildi. U fanga birinchi bo‘lib “Elektr toki va uning yo‘nalishi” tushunchalarini kiritdi. 1827 yilda nemis olimi G.S. Om (1787-1854) zanjirning bir qismidan o‘tayorgan tok kattaligi undagi kuchlanishga to‘g‘ri proporsional, uning qarshiligiga esa teskari proporsional ekanligini tajribada isbotlab berdi. Elektromagnit hodisalar to‘g‘risidagi ta’limotga katta hissa qo‘shgan ingliz olimi M. Faradey (1791-1867) 1831- yilda elektromagnit induksiya hodisasini kashf etdi. 1834-1838- yillarda J. Genri (1797-1878) o‘zinduksiya va o‘zaro induksiya hodisalarini kashf etdi. 1833- yilda rus akademigi E.X. Lens (1804-1865) induksion toklar yo‘nalishlari va ularning o‘zaro elektromagnit hamda elektrodinamik ta’siriga oid qonunni kashf etdi. Xususan, u elektromagnit inersiya prinsipini ta’riflab berdi. 1844- yilda E.X. Lens va ingliz tadqiqotchisi Joul (1819-1889) bir-biridan mustaqil holda o‘tkazgichdan tok o‘tayotganda uning qizishi natijasida ajralib chiqadigan issiqlik miqdori o‘tkazgich qarshiligiga, tok kvadratiga va uning o‘tish vaqtiga to‘g‘ri proporsionalligini ko‘rsatdi.

Dunyoda birinchi bo‘lib elektromagnit telegraf konstruksiyasini 1832- yilda Rossiyalik olim P.L. Shilling (1786-1837) yasagan. Elektrotexnikaning nazariy va amaliy rivojlanishida nihoyatda katta ahamiyatga ega bo‘lgan shoxobchalangan elektr zanjirlariga oid asosiy ikkita qonunni nemis fizigi G. R. Kirxgof (1824-1887) 1845- yilda ifodalab

berdi. Ko‘mir o‘zakli chug‘lanish lampasi rus injeneri A.N. Lodigin (1847-1923) tomonidan yaratilgan. 1850- yillarda fransuz olimi J.B. Fuko magnit maydonida harakatlanayotgan temirda uyurmaviy toklar (Fuko toklari) paydo bo‘lishi hisodan uning qizishi hodisasini kashf etdi.

XIX asrning ikkinchi yarmida rus olimi A.G. Stoletov (1839-1896), XX asr boshlarida esa V.K. Arkadyev (1884-1953) temir va ferromagnit materiallar magnit xossalari o‘rgandi. Rus olimi N.A. Umov (1846-1915) va ingliz olimi D.G. Poynting (1852-1914) jismlarda elektromagnit energiyaning harakatlanish tenglamasini tuzishga asos soldi.

Shunday qilib, 1800-1880- yillarda amaliy elektrotexnika, xususan telegrafiya, galvanoplastika va elektr yoritish texnikasi rivojlanishi bilan birga o‘zgaras tok zanjirlari nazariyasi ham ishlab chiqila boshlandi. Bu davrda elektr zanjirlari nazariyasining asosiy tushunchalari shakllandi va ularni hisoblash usullari yaratildi.

O‘zgaruvchan tokni amalda qo‘llanilishiga P.N. Yablochkov (1847-1894) o‘z hissasini qo‘shdi. 1876- yilda o‘zgaruvchi tok Yablochkovning sha‘midagi ko‘mir o‘zaklarni bir tekis cho‘g‘lanishini ta‘minladi va bitta elektr energiyasi manbaidan bir nechta lampani cho‘g‘lanish imkoniyati yuzaga keldi. Elektr energiyasidan foydalanish kengaygan sari uni uzoq masofalarga uzatish va taqsimlash muammosi yuzaga kela boshladi. Bu muammoni hal qilishda o‘zgaruvchan tok kuchlanishini o‘zgartirib beradigan elektrostatik qurilma - transformator birinchi bo‘lib P.N. Yablochkov tomonidan yaratildi.

O‘zgaruvchan tok elektr energiyasini xalq xo‘jaligida keng miqyosda qo‘llanishida rus olimi M.O. Dolivo-Dobrovolskiy (1862-1919) tomonidan uch fazali elektr tizimining yaratilishi muhim ahamiyat kasb etdi. U 1889- yilda uch fazali asinxron motorni va uch fazali zanjirning hozirgi kunda bizga ma‘lum bo‘lgan barcha qismlari(uch fazali generator, uch fazali transformator va uch fazali elektr uzatish liniyasi)ni yaratdi. M.O. Dolivo-Dobrovolskiy 1891- yilda elektr energiyasini uch fazali tok energiyasi ko‘rinishida 175 km masofaga uzatishga muvaffaq bo‘ldi. 1888- yilda serbiyalik olim N. Tesla aylanuvchan magnit maydoni hodisasini kashf etdi.

Elektr va magnit zanjirlarining nazariy masalalarini yechish bilan birga amaliy elektrotexnika elektromagnit maydonlarni hisoblash masalasini qo‘ydi. O‘tkazgichlar kesim yuzasida o‘zgaruvchan tok taqsimlanishini bilish elektromagnit maydon masalalarini yechish zaruratini yuzaga keltirdi. Sh. Kulon, A. Amper, M. Faradey va E.X. Lens qonunlari va g‘oyalarini o‘tkazilgan eksperimental tadqiqotlar natijalari bilan birga umumlashtirib D.K. Maksvell (1831-1879) 1855-1873-

yillarda elektromagnit maydondagi jarayonlarni ifodalovchi umumlashgan matematik tenglamalar sistemasini ishlab chiqdi. Keyinchalik G. R. Gers (1857-1894) 1884-1890- yillarda, O. Xevisayd (1850-1925) 1885- yilda, A.Eynshteyn (1879-1955) 1905- yilda, G. Lorents 1909- yilda va boshqalar bu tenglamalar sistemasini turli variantlarini bayon qildilar. G. Gers (1857-1894) tomonidan 1880- yilda elektromagnit to'liqini paydo qilish va uni masofaga uzatish hamda yorug'lik to'liqlari bosimi mavjudligini rus fizigi P.I. Lebedev (1902-1974) tomonidan 1895 yilda o'tkazilgan tajribalarda tasdiqlanishi elektromagnit maydon fizik reallik g'oyasini kengaytirdi va mukammallashtirdi.

O'zgaruvchan tokni keng tadbiiq etilishi juda ko'p nazariy va amaliy masalalarni yechilishini talab etdi. XIX- asr oxirlari va XX- asr boshlarida nazariy elektrotexnikada o'zgaruvchan tok nazariyasi deb atalgan butun bir bo'lim paydo bo'ldi. O'zgaruvchan tok nazariyasini rivojlantirishida 1893- yilda Ch.P. Shteynmets (1865-1923) tomonidan zanjirlarni hisoblashda kompleks usulning qo'llanilishi katta nazariy va amaliy ahamiyatga ega voqea bo'ldi va elektr zanjirlari kattaliklari va parametrlari orasidagi munosabatlarning matematik modellarini yaratishda muhim o'rin egalladi.

O. Xevisayd elektromagnit hodisalarni tadqiq etishda fizik jarayonlarni tushunish va ularni matematik ifodalashda chuqur uyg'unlik darajasiga yetkazdi. U bu jarayonlarni nafaqat sifat, balki miqdor jihatdan ham tavsiflaydigan ma'lumotlarni olishga muvaffaq bo'ldi. Bundan tashqari, O. Xevisayd tomonidan elektr zanjirlaridagi o'tkinchi jarayonlarni tavsiflaydigan differensial tenglamalarni operator yordamida algebraik shaklga o'tkazish usulini tavsiya etgan.

1895- yil A.S. Popov (1859-1905) insoniyatning madaniy hayotida yangi davr ochgan radio aloqani kashf etdi. Radiotexnikaning rivojlanishi elektr zanjirlari va elektromagnit maydon nazariyalarini rivojlantirishga katta turtki berdi.

1904- yilda Peterburg politexnika institutida professor V.F. Mitkevich (1872-1951) elektr va magnit hodisalari nazariyasi kursi bo'yicha ma'ruzalar o'qiy boshladi. 1905- yilda esa Moskva oliy texnika bilim yurtida o'zgaruvchan toklar nazariyasi kursi bo'yicha professor K.A. Krug (1873-1952) ma'ruza o'qiy boshladi. "Nazariy Elektrotexnika" fanining ikkinchi bosqichi 1900-1920- yillarga to'g'ri keladi. Bu davrda turli xil manbalarga ega bo'lgan chiziqli elektr zanjirlarni hisoblash usullari ishlab chiqildi. Kontur toklar va tugun potensiallar usullari bilan birga ekvivalent generator, uch fazali zanjirlar uchun simmetrik tashkil etuvchilar, ekvivalent o'zgartirish va boshqa usullar yaratildi. Chiziqli

zanjirlardagi dinamik jarayonlar nazariyasi o'zgaruvchan holat usuli bilan boyitildi, ya'ni o'tkinchi jarayonlarni ifodalovchi differensial tenglamalar sistemasini kompyuter yordamida samarali yechish usuli yaratildi. Murakkab elektr zanjirlardagi o'tkinchi jarayonlarni hisoblashda qo'llaniladigan klassik va operator usullarni mukammallashtirish bilan birga 1950-1970- yillarda chastotali yoki spektral usul keng qo'llanila boshlandi. Chiziqli zanjirlarni chastotaviy xarakteristikalarini zanjirni to'la holatini tavsiflaydi, chunki ular zanjirlarning inersion xossalari (induktiv va sig'im elementlari mavjud bo'lganligi uchun) hamda energiyani tarqalish jadalligiga (rezistiv elementlar bo'lganligi uchun) bog'liq bo'ladi.

Ferrorezonans hodisalarini va xususan ferrozonansli kuchlanish stabilizatorini P.L. Kalantarov (1892-1951) va A.G. Lure tadqiq etdilar.

"Nazariy elektrotexnika" fani yoki uning ayrim bo'limlariga oid o'quv adabiyotlari o'z davrida V.F. Mitkevich, K.A. Krug, P.L. Kalantarov, L.R. Neyman, K.S. Demirchyan, G.I. Atabekov, L.A. Bessonov, P.A. Ionkin, G.V. Zeveke, A.V. Netushil, S.V. Straxov, K.M. Polivanov va b. tomonidan chop etilgan.

O'zbekistonda elektrotexnika fanlarining rivojlanishi XX asrning 30-yillariga to'g'ri keladi.

Akademik H.F. Fozilov (1909-2003) rahbarligida (T.X. Nosirov, Q.R. Allayev va b.) berilgan elektr sistemalarning optimal rejimlarini hisoblash sohasidagi ilmiy ishlar katta ilmiy va amaliy ahamiyat kasb etdi.

Akademik G'R. Rahimov (1905-1972) tashabbusi bilan Markaziy Osiyoda birinchi bo'lib "Elektrotexnikaning nazariy asoslari" kafedrasini (1934 y.) tashkil etildi. Bu olim elektrotexnika fanini rivojlantirish sohasida ilmiy maktab yaratdi. Bu maktab ko'plab fan doktorlari (A. S. Karimov (1935-2002), P. F. Hasanov (1937-), Z. I. Ismoilov (1931), T. M. Qodirov (1938-2010), M. I. Ibodullayev, Y. R. Rashidov va b.) hamda nomzodlarini tayyorladi.

Elektr tizimlari rejimlarini ifodalaydigan katta o'lchamli nochiyiq tenglamalarni yechish va m nurli yulduz sxemasini m tomonli ko'pburchakka ekvivalent almashtirish formulalarini topish masalalarini S. Solihov hal etdi.

Elektr energetikasi sohasini axborot va boshqarish sistemalarisiz tasavvur qilish mumkin emas. EHM yordamida energetika sistemalari rejimlarini operativ boshqarish bo'yicha ma'lumotlarni ishlab chiqish sistemasining matematik modelini akademik J. Abdullayev (1927), elektr tarmoqlari optimal rejimini boshqarishni prof. E.P. Payziyev (1939-2001) taklif etdi. Tarqoq parametrli magnit zanjirlari, turli tabiatli zanjirlar umumlashgan nazariyalarini rivojlantirish, axborot va o'lchash texnikasiga

doir yangi prinsipdagi birlamchi o'zgartkichlarni ishlab chiqish bo'yicha prof. M.F. Zaripov(1929-2006) ilmiy maktab yaratdi.

Elektr energiyasidan samarali foydalanish yo'nalishida akademik M. Z. Homidxonov (1916-1972) va uning shogirdlari (N. Usmonxo'jayev (1932-2009), O. O. Hoshimov (1940), S. Usmonov, M. Husanov, A. Dadajonov va b.) va B. U. Umarov olib borgan ishlar ilmiy va amaliy ahamiyat kasb etadi.

Sanoat, transport, qurilish, qishloq va suv xo'jaligi ishlab chiqarish jarayonlarida elektr energiyasidan samarali foydalanish yo'nalishida professorlar P.V. Baydyuk (1914-1994), T. S. Kamolov (1935), X.G'.Karimov (1940-2014), N. A. Hamidov (1935-2014), N. X. Bozorov (1937-2005), A. R. Rajabov (1946), M. E. Mamedshaxov (1946), A. M. Muhammadiyev (1946), M. I. Ismoilov (1947-2015), A. A. Xoliqov (1948), M. M. Muhammadiyev (1957), T.Sh. G'oyibov (1958), X. M. Murodov(1960) va S. F. Amirov (1962) tadqiqotlarini qayd etish mumkin.

"Kadrlar tayyorlash milliy dasturi"da belgilangan vazifalarni amalga oshirish o'zbek tilida "Elektrotexnika" va "Nazariy elektrotexnika" fanlari bo'yicha yangi darslik va o'quv qo'llanmalarni nashr etishni taqozo etmoqda. Bu sohada akademik G'.R. Raximov, professorlar A.S. Karimov, S.M. Majidov (1929-2006), dotsentlar Mirhaydarov M.M., X.M. Mansurov, U. I. Ibragimov va N.A. Ahrorovlar mehnatini alohida ta'kidlash zarur.

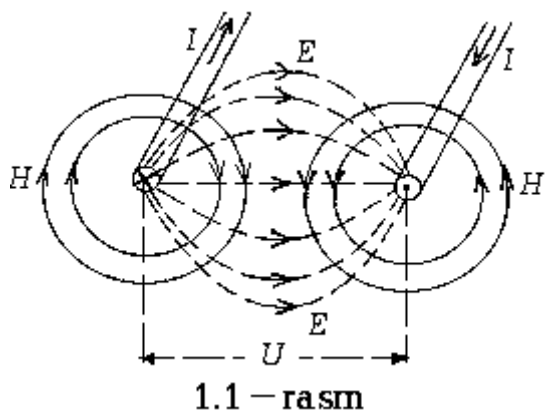
1- BO'LIM. CHIZIQLI ZANJIRLAR

1- BOB. O'ZGARMAS TOK CHIZIQLI ELEKTR ZANJIRLARI VA ULARNI HISOBLASH USULLARI

1.1. Elektr zanjirlarini tavsiflovchi asosiy kattaliklar

1.1.1. Elektr maydonining kuchlanganligi

Magnit maydonini o'zgarishi natijasida elektr maydoni va aksincha elektr maydonini o'zgarishi natijasida magnit maydoni hosil bo'lishi bu ikki maydonning o'zaro bog'liqligini bildiradi. Buni elektr energiyasini uzatish liniyasining ish faoliyati misolida ko'rish mumkin (1.1- rasm).



Liniya simlari orqali elektr energiyasini uzatishda bir-biridan izolyatsiya qilingan simlar U kuchlanish ta'sirida bo'ladi. Buning natijasida simlar orasida kuchlanganligi E bo'lgan elektr maydoni hosil bo'ladi. Liniya simlaridan I tok o'tishi natijasida ularning ichida va atrofida kuchlanganligi H bo'lgan magnit maydoni yuzaga keladi (1.1-rasmda

elektr maydoni uzoq chiziqlar, magnit maydoni esa uzluksiz chiziqlar bilan ko'rsatilgan).

1.1- rasmdagi maydonlar kartinasidan ko'rinib turibdiki, *elektr maydoni kuch chiziqlari berk emas - ular musbat zaryadlangan simdan boshlanib manfiy zaryadlangan simda tugaydi, magnit maydoni kuch chiziqlari esa berk - ularning boshi ham, oxiri ham yo'q.*

Elektr maydonining eng oddiy ko'rinishi qo'zg'almas elektr zaryadlarning maydoni hisoblanadi va u elektrostatik maydon deb ataladi. Bu maydonning har bir nuqtasi kuchlanganlik vektori $\vec{E}$ bilan tavsiflanadi.

Elektr maydonining kuchlanganligi unga kiritilgan nuqtaviy zaryadga maydon tomonidan ta'sir etayotgan kuchning shu zaryadga nisbatiga teng. Kuchlanganlik vektorining yo'nalishi nuqtaviy zaryadga ta'sir etayotgan kuch vektorining yo'nalishi bilan mos tushadi, binobarin:

$$\bar{E} = \frac{\bar{F}}{q_0} \left[\frac{N}{C} = \frac{Jl}{m \cdot C} = \frac{A \cdot V \cdot s}{m \cdot A \cdot s} = \frac{V}{m} \right]$$

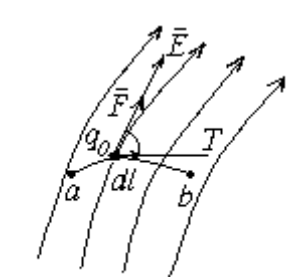
Nuqtaviy zaryad deb, shunday jism zaryadiga aytiladiki, uning o'lchami juda kichik bo'lib, zaryadi tadqiq etilayotgan maydon ko'rinishiga ta'sir etmaydi.

Agar $q_0 = 1$ bo'lsa, u holda $\bar{E} = \bar{F}$ bo'lib, elektr maydonining kuchlanganligi son jihatdan birlik zaryadga maydon tomonidan ta'sir etadigan kuchga teng bo'ladi.

Kuchlanganligi barcha nuqtalarda bir xil bo'lgan maydon *bir jinsli maydon* deb ataladi.

1.1.2. Elektr potensial va kuchlanish

Zaryadlangan zarrachani elektr maydoni tomonidan ta'sir etuvchi kuch yordamida ko'chirishda maydon energiyasining o'zgarishi hisobiga ma'lum bir ish bajariladi.



1.2 – rasm

Aytaylik, musbat q_0 zaryadli zarracha elektr maydonida ma'lum bir yo'l bo'ylab a nuqtadan b nuqtaga ko'chirilmoqda (1.2- rasm).

Zarrachaga maydon tomonidan ta'sir etayotgan kuch $\bar{F} = q_0 \bar{E}$ maydonning har bir nuqtasida kuchlanganlik kuch chiziqlariga urinma bo'ylab yo'naladi. 1.2-

rasmda α - $\bar{F}$ kuch vektori va ab yo'l trayektoriyasiga o'tkazilgan urinma orasidagi burchak. ab yo'l trayektoriyasidan zarracha harakati yo'nalishi bo'ylab $d\bar{l}$ elementar vektor ajratsak, u holda $d\bar{E}$ va $d\bar{l}$ vektorlar orasidagi burchak α bo'ladi.

Zaryadlangan zarrachani dl yo'l bo'ylab ko'chirishda maydon kuchlari quyidagi ifoda bilan aniqlanuvchi ish bajaradi:

$$dA = F dl \cos \alpha = q_0 E dl \cos \alpha = q_0 \bar{E} d\bar{l}.$$

Butun ab yo'l bo'ylab bajarilgan ish:

$$A = \int_a^b F \cos \alpha dl = \int_a^b E q_0 \cos \alpha dl = q_0 \int_a^b \bar{E} d\bar{l} \quad [J].$$

Elektr maydon o'zining har bir nuqtasida potensial energiyaga yoki ish bajarish qobiliyatiga ega. Bu qobiliyat potensial funksiya yoki potensial φ bilan aniqlanadi va u skalyar kattalik hisoblanadi. Elektr maydonga tegishli nuqta potensialining o'lchovi sifatida birlik zaryadni maydonning

shu nuqtasidan cheksizlikka ko‘chirishda maydon tomonidan bajarilgan ish qabul qilingan, ya’ni:

$$\varphi_a = \frac{A_a}{q_0} = \int_a^{\infty} \vec{E} d\vec{l} \quad [\text{V}].$$

Elektrostatika masalalarida odatda Yer yuzasining potentsiali nolga teng deb qabul qilinadi. Fazoning cheklangan sohasida joylashgan va cheksiz katta dielektrik muhit bilan o‘ralgan zaryadlangan jismlarga oid masalalarni yechishda bu jismdan cheksiz uzoqlikda joylashgan nuqtalar potentsiali odatda nolga teng deb olinadi.

q zaryaddan R masofada joylashgan nuqtaning potentsiali quyidagicha aniqlanadi:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi R \varepsilon_a},$$

bu yerda ε_a - moddaning absolyut dielektrik singdiruvchanligi.

Nuqtali zaryadni elektr maydoni kuchlari yordamida a nuqtadan b nuqtaga ko‘chirishda quyidagi tenglama bilan aniqlanadigan ish bajariladi:

$$A_{ab} = A_a - A_b = \varphi_a q_0 - \varphi_b q_0 = q_0 (\varphi_a - \varphi_b).$$

Elektr maydonining ikkita nuqtasi orasidagi potentsiallar ayirmasi elektr kuchlanish deb ataladi:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = \frac{A_{ab}}{q_0} = \int_a^b \vec{E} d\vec{l} \quad [\text{V}].$$

Elektr kuchlanish qiymati jihatdan birlik zaryadni maydonning bir nuqtasidan ikkinchi nuqtasiga ko‘chirishda bajarilgan ishga teng.

Kuchlanish - vektor kattalik bo‘lib, uning musbat yo‘nalishi potentsiali yuqori bo‘lgan nuqtadan potentsiali past bo‘lgan nuqtaga tomon olinadi, qiymati esa o‘zi aniqlanayotgan nuqtalar holatiga bog‘liq va zaryad ko‘chayotgan yo‘lga bog‘liq emas.

1.1.3. Elektr toki. Tok zichligi

Elektr zaryadlar erkin tashuvchilarining elektr maydoni ta'sirida tartibli harakati elektr tok deyiladi. Elektr tok son jihatdan quyidagicha aniqlanadi:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt},$$

bu yerda Δq - elementar zaryad, Δt - shu zaryadni biror yuzadan o‘tish vaqti.

Vaqt bo'yicha qiymati va yo'nalishi o'zgarmaydigan tok o'zgarmas tok, vaqt bo'yicha faqat qiymati o'zgaradigan tok pulsatsiyalanuvchi tok, vaqt bo'yicha qiymati va yo'nalishi o'zgaradigan tok esa o'zgaruvchan tok deb ataladi.

O'zgarmas tokning qiymati o'tkazgich ko'ndalang kesimidan 1 s vaqt mobaynida o'tadigan elektr miqdori yoki zaryad bilan aniqlanadi:

$$I = \frac{Q}{t} \left[\frac{C}{s} = A \right].$$

Amper - o'zgarmas tokning shunday qiymatiki, u cheksiz uzun va ingichka hamda vakuumda o'zaro 1 m masofada joylashgan ikkita o'tkazgichdan o'tganda ular orasida qiymati $2 \cdot 10^{-7}$ N ga teng bo'lgan kuch yuzaga keladi.

Elektr tokining musbat yo'nalishi sifatida musbat zaryadlarning manbaning "+" qismasidan "-" qismasiga harakat yo'nalishi shartli ravishda qabul qilingan.

Elektr tokini uzluksiz o'tishi uchun potentsiallar farqini hosil qiluvchi manba va zaryadlar harakati uchun berk yo'l bo'lishi shart.

O'tkazgichlarni elektr toki bilan qanday darajada yuklanganligini baholash uchun tok zichligi tushunchasidan foydalaniladi.

Tok zichligi vektor kattalik bo'lib, u Δs elementar yuzadan o'tayotgan Δi elementar tokning Δs yuzaga nisbati $\Delta s \rightarrow 0$ dagi limitiga teng:

$$\vec{\delta} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta i}{\Delta s} = \frac{di}{ds}.$$

Masalan, elektr mashinalari chulg'amlarida ruxsat etilgan tok zichligi $3,7 \text{ A/mm}^2$ ga teng.

Agar tok o'tkazgich kesimi bo'ylab bir tekis taqsimlangan bo'lsa, u holda tok zichligi:

$$\delta = \frac{I}{S}.$$

1.2. Elektr zanjiri va uning elementlari

Elektr zanjiri elektr tokini hosil qilish va uning o'tishini ta'minlaydigan qurilma va ob'ektlar majmuasi bo'lib, undagi elektromagnit jarayonlar elektr yurituvchi kuch (EYK), tok va kuchlanish tushunchalari bilan ifodalanadi.

Elektr zanjiri tushunchasi elektrotexnika fanining tayanch tushunchasidir.

Elektr energiyasi manbai, iste'molchi va ularni o'zaro birlashtiruvchi o'tkazgichlar elektr zanjirining asosiy elementlari, o'lchash asboblari, ulab-uzgichlar va himoyalash qurilmalari esa uning yordamchi elementlari hisoblanadi. Demak, elektr zanjirining elementi - bu elektr zanjiri tarkibiga kiruvchi alohida qurilma bo'lib, u zanjirda aniq funksiyani bajaradi.

Elektr zanjirining elementlari shartli belgilar bilan tasvirlanadi.

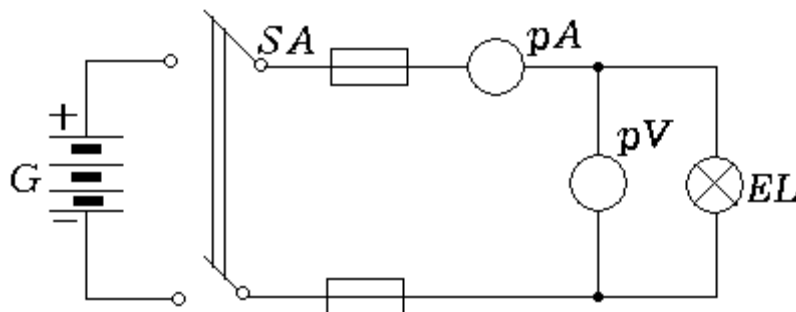
Elektr zanjirining elementlari va ularni o'zaro ulanishining grafik tasviri elektr zanjirining sxemasi deb ataladi.

1.3- rasmda oddiy elektr zanjirining sxemasi keltirilgan.

G - akkumulyator - elektr energiyasi manbai. U kimyoviy energiyani elektr energiyasiga aylantiradi. EL – cho'g'lanma lampa - iste'molchi, unda elektr energiyasi yorug'lik va issiqlik energiyalariga aylantiriladi. SA - kalit, zanjirni ulab uzadi. pA - ampermetr, pV - voltmetr. To'g'ri chiziqlar - ulagich simlar - o'tkazgichlardir.

Elektr energiyasi manbalarida turli tabiatli energiya maxsus o'zgartirgichlar vositasida elektr energiyasiga aylantiriladi.

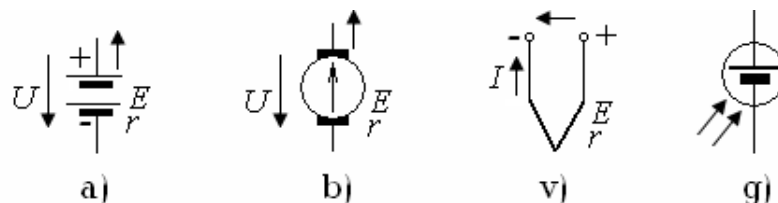
O'zgartiriladigan energiyaning turiga ko'ra elektr energiyasi manbalari kimyoviy va fizik manbalarga bo'linadi. Kimyoviy reagentlar orasida oksidlanish-qaytarilish jarayonlari hisobiga elektr energiyasi ishlab chiqaruvchi manbalar **kimyoviy manbalar** deyiladi. Kimyoviy manbalarga galvanik elementlar, akkumulyatorlar va batareyalar kiradi.



1.3- rasm

Mexanik, issiqlik, elektromagnit, yorug'lik, radiatsion nurlanish, yadroviy parchalanish energiyalarini elektr energiyasiga aylantiradigan qurilmalar **fizik manbalar** deyiladi. Ularga elektr generatorlar, termoelektr generatorlar, termoemission o'zgartgichlar, magnitogidrodinamik (MGD) generatorlar va quyosh nurlanishi hamda atom parchalanish generatorlari kiradi.

Elektr energiyasi manbalarining sxemalardagi shartli belgilari 1.4- rasmda keltirgan.

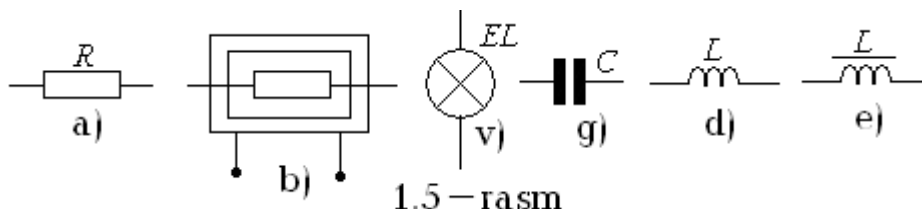


1.4 – rasm

1.4- rasm: a) galvanik element; b) doimiy magnitli o'zgarmas tok elektr generatori; v) termojuft; g) fotoelement.

Elektr energiyasi iste'molchilarining shartli belgilari - sxemalari 1.5 - a, b, v, g, d, e rasmlarda keltirgan.

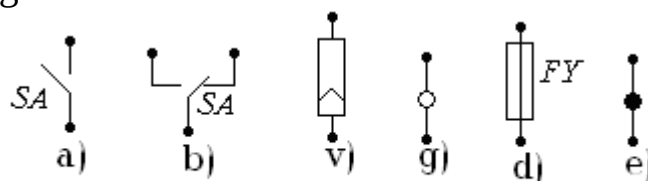
Elektr energiyasi iste'molchilari (elektr motorlar, elektr qo'ralar, issiqlik asboblari, cho'g'lanish lampalari, rezistorlar va b.) elektr energiyasini boshqa tur energiyaga aylantirish uchun xizmat qiladi.



1.5 – rasm

1.5- rasm: a) rezistor, b) elektr qizdirgich, v) cho'g'lanma lampa, g) kondensator, d) induktiv g'altak, e) o'zakli g'altak - drossel.

Elektr zanjiri yordamchi elementlarining shartli belgilari-sxemalari 1.6- rasmda keltirilgan.



1.6 – rasm

1.6- rasm: a) kalit (ulab-uzgich), b) qayta ulagich, v) shtepsel (raz'em), g) ajratish mumkin bo'lgan o'tkazgichning ulangan joyi-qisqich, d) eruvchan saqlagich, e) o'tkazgichlar kavsharlanib ulangan tugun

Manba bilan iste'molchilar o'zaro o'tkazgich simlar yordamida birlashtiriladi. Ular elektr energiyasini manbadan iste'molchiga kam isrof bilan uzatadi. Elektr zanjirlariga ko'pincha yordamchi va o'lchash qurilmalari ulanadi. Ular elektr zanjiri ish holatini (misol uchun saqlagichlar) boshqarish, o'ta kuchlanish va katta toklardan saqlash va h.k. uchun xizmat qiladi.

Demak, har qanday elektr zanjirining asosiy vazifasi elektr energiyasini manbadan iste'molchiga uzatishdan iboratdir.

Elektr zanjiridagi elektromagnit jarayonlar EYK, tok, kuchlanish, qarshilik (o'tkazuvchanlik), induktivlik, sig'im tushunchalari bilan ifodalanadi.

Har qanday tur energiyani elektr energiyasiga aylantirishda EYK hosil bo'ladi.

O'zgaras tok zanjirlarida EYK skalyar kattalik bo'lib, tashqi maydon va induksiyalangan elektr maydonining elektr toki hosil qilish xususiyatini tavsiflaydi.

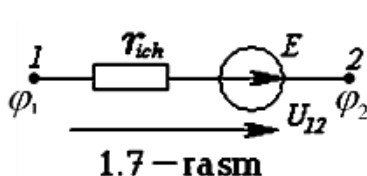
Manba ichida zaryadlangan zarrachani siljitish uchun tashqi kuchlar tomonidan bajariladigan *A* ishni shu zarracha *q* zaryadiga bo'lgan nisbati EYKning qiymatini aniqlaydi:

$$E = \frac{A}{q}, [V]$$

Agar $q=1\text{ C}$ bo'lsa, unda $E=A$ bo'ladi.

Binobarin, EYK manbaining ichida potentsiali pastroq qismdan potentsial yuqoriroq bo'lgan qismga birlamchi zaryadlarni ko'chirish uchun bajarilgan ish EYKga teng. Agar manbaning ichki qarshiligi nolga teng, yani $r_{ich}=0$ bo'lsa, u holda EYK qiymat jihatdan energiya manbaidan tok o'tayotgan holatda musbat va manfiy qisqichlar orasidagi kuchlanishga teng bo'ladi (1.7 - rasm):

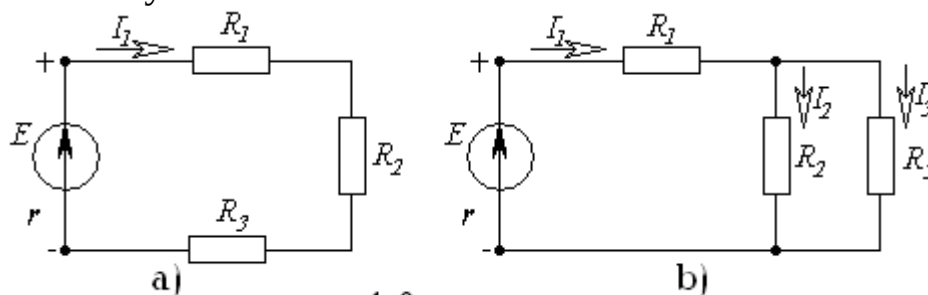
$$E = \varphi_1 - \varphi_2 = U_{12}.$$



1.7 - rasm

Berk zanjirda EYK ta'sirida *I* tok hosil bo'ladi. Elektr zanjirlari *shoxobchalanmagan* va *shoxobchalanagan* bo'ladi. Agar berk zanjirning barcha qismlaridan bitta tok o'tsa, u holda bunday zanjir shoxobchalanmagan bo'ladi (1.8- rasm, a).

Shoxobchalanagan zanjirning har bir shoxobchasida o'zining toki bo'ladi (1.8- rasm, b). Elektr sxemada shoxobcha, tugun va kontur tushunchalaridan foydalaniladi.



1.8 - rasm

Shoxobcha - elektr zanjirining bir xil qiymatli tok o'tuvchi qismi. Bunda elektr zanjirining elementlari ketma-ket ulangan qismi tushuniladi.

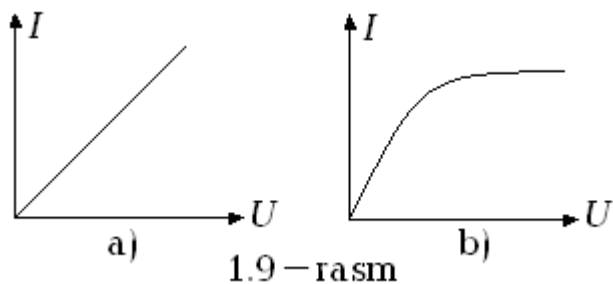
Tugun - elektr zanjirining uchtadan kam bo'lmagan shoxobchalari ulangan o'rni.

Kontur - elektr zanjirning shoxobchalaridan hosil bo'lgan berk yo'l.

O'zgaras tok - I harfi bilan, qarshilik - R va o'tkazuvchanlik - G harflar bilan belgilanadi.

Elektr zanjiri elementi qismalaridagi kuchlanishni undan o'tuvchi tokka bog'liqligi elementning volt-ampere xarakteristikasi (VAX) deb ataladi (1.9- rasm). Masalan, rezistordan o'tuvchi tok bilan shu rezistordagi kuchlanish orasidagi bog'lanish rezistorning VAX bo'ladi.

Amalda absissa o'qiga kuchlanish qiymatini, ordinata o'qiga esa tok qiymatini tanlangan masshtabda belgilab, elementning VAX quriladi. Agar rezistor VAX to'g'ri chiziq bo'lsa, u holda bunday rezistor *chiziqli rezistor*, chiziqli elementlardan tuzilgan zanjir esa *chiziqli elektr zanjiri* deb ataladi (1.9-rasm, a). Agar rezistorning VAX egri chiziq bo'lsa (1.9-rasm, b), u holda bunday rezistor *nochiziqli rezistor*, bunday rezistorlardan iborat elektr zanjiri esa, *nochiziqli elektr zanjiri* deb ataladi.



Chiziqli passiv element - rezistor R qarshilikka ega. Undan o'tuvchi tok va rezistorning qismalaridagi kuchlanish U ning o'zaro bog'lanishini *Om qonuni* ifodalaydi: $I = U/R$.

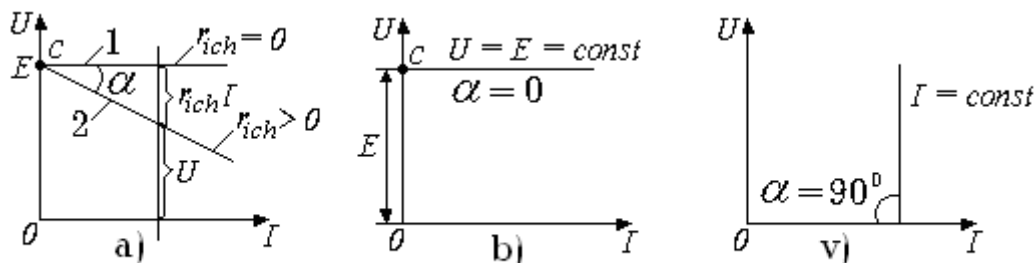
Qarshilikka teskari bo'lgan kattalik *o'tkazuvchanlik* deb ataladi. O'lchov birligi Simens [S].

Chiziqli aktiv element - elektromagnit energiyasi manbai bo'lib, shartli ravishda ikki turga bo'linadi: EYK manbai va tok manbai. Bu manbalar amalda ideal va real manbalar ko'rinishida bo'lishi mumkin.

Ideal EYK manbai. Agar elektr energiyasi manbai qismalaridagi kuchlanish U undan o'tayotgan tok I qiymatiga bog'liq bo'lmasa, u holda bunday manba **ideal EYK manbai** deyiladi. Ideal EYK manbai uchun manbaning ichki qarshiligi $r_{ich}=0$, (1.10- rasm, a). Shuning uchun $U = E = const$ bo'ladi. Ideal EYK manbai VAX absissa o'qiga parallel to'g'ri chiziqdan iborat (1.10- rasm, a dagi 1- to'g'ri chiziq).

Real EYK manbai. Bunday EYK manbaining ichki qarshiligi noldan farq qiladi. Shuning uchun ham manba qismlaridagi kuchlanish $U_{ab} = E - r_{ich}I$, ya'ni U tok qiymati I ga bog'liq bo'ladi. Real EYK manbai VAX 1.10- rasm, a da keltirilgan (2- to'g'ri chiziq). Real EYK manbaiga misol tariqasida akkumulyator batareyasi, o'zgaras tok generatorini keltirish mumkin.

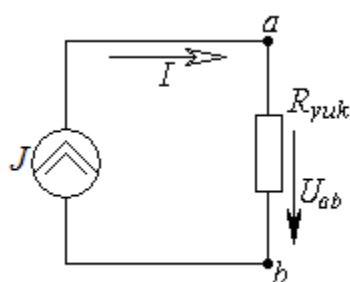
Real manbaning EYKi miqdor jihatidan uning salt ish rejimida (tok nolga teng) qismalaridagi potentsiallar ayirmasi - kuchlanishga teng (1.10-rasm, b) bo'ladi. Bu manbaga tashqi zanjir ulanganda uning EYKi avvalgi



1.10 – rasm

qiymatini saqlab qola olmaydi, chunki manba qisman ichki qarshilikka ega. Tok ortib borishi bilan $I r_{ich}$ ko'payadi, kuchlanish $U_{ab} = E - r_{ich} I$ esa, kamayadi (1.10- rasm, a dagi 2- to'g'ri chiziq).

Ideal tok manbai. Agar manbaning toki u ta'minlab turgan zanjirning qarshiligiga (manba toki uning qismalaridagi kuchlanishga) bog'liq bo'lmasa, ya'ni, manba ichki qarshiligi cheksiz katta bo'lsa, u holda bunday manba ideal tok manbai deyiladi (1.11- rasm). Agar manbaning

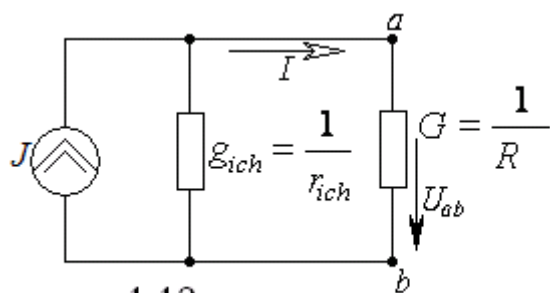


1.11 – rasm

EYKi E va ichki qarshiligi r_{ich} ni cheksiz oshirib borsak (1.10- rasm, a dagi 2- to'g'ri chiziq), unda c nuqta ordinata o'qi bo'yicha cheksizlikka, α burchagi esa 90° ga intiladi. Bunday manba ideal tok manbai deb ataladi (1.10- rasm, v). Agar 1.10- rasm, v dagi koordinata o'qlaridagi kattaliklar o'rinlari o'zaro almashtirilsa, u holda grafik 1.10- rasmdagi 1- to'g'ri chiziq ko'rinishida bo'ladi.

Demak, tok manbai elektromagnit energiyasi manbai bo'lib, manba toki va ichki o'tkazuvchanligi bilan tavsiflanadi. Demak, ideal tok manbaining ichki o'tkazuvchanligi $g_{ich} = 0$.

Real tok manbai. Real tok manbai ma'lum bir qiymatli ichki



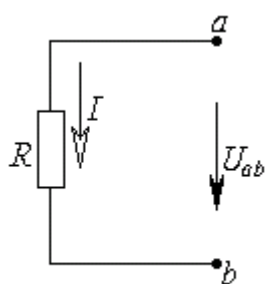
1.12 – rasm

o'tkazuvchanlikka ega bo'ladi. Bunda $I = E/r_{ich}$, $g_{ich} = 1/r_{ich}$, $E = I/g_{ich}$. Real tok manbaidan tashqi zanjirga o'tayotgan tok: $I = J - U g_{ich}$.

Tok manbaiga misol qilib elektrostatik generatorni ko'rsatish mumkin.

Bog‘liq bo‘lgan EYK va tok manbalari elektr energiyasi manbalarining muhim turlaridan hisoblanadi. Bog‘liq bo‘lgan EYK (tok) manbai deb shunday manbaga aytiladiki, uning EYK(tok)i zanjir qismidagi tok yoki kuchlanishga bog‘liq bo‘ladi. Bunday manbalar ko‘pincha boshqariladigan manbalar deb ataladi, ya’ni manba EYK(tok)i zanjir qismidagi tok yoki kuchlanish yordamida boshqariladi, deb hisoblanadi.

1.3. Om qonuni



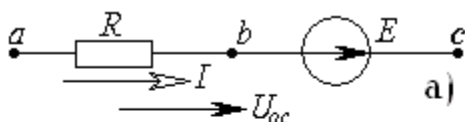
1.13 – rasm

Agar zanjirning biror qismida EYK manbai bo‘lmasa (1.13- rasm), u holda undagi tok bilan kuchlanish orasidagi bog‘liqlik quyidagicha aniqlanadi:

$$U_{ab} = RI \text{ yoki } I = \frac{U_{ab}}{R} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R}.$$

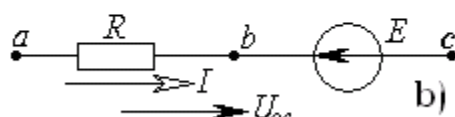
1.4. Zanjirning EYK manbai qismi uchun Om qonuni

Agar zanjirning biror qismida EYK manbai bo‘lsa, u holda bu zanjir uchun potentsiallar ayirmasi EYKning yo‘nalishini e’tiborga olgan holda aniqlanadi. Om qonuni esa quyidagicha ifodalanadi (1.14- rasm, a):



$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_c + E}{R} = \frac{U_{ac} + E}{R}.$$

1.14- rasm, b uchun esa:



$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_c - E}{R} = \frac{U_{ac} - E}{R}.$$

1.14 – rasm

Umumiy holda, elektr zanjiri tarkibida bir nechta EYK manbai va rezistorlar bo‘lsa,

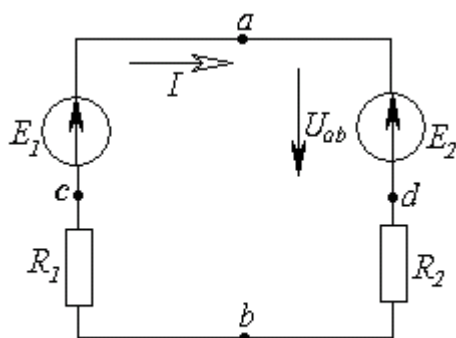
tok $I = \frac{\varphi_a - \varphi_c + \Sigma E}{\Sigma R_{ac}}$ ifodadan aniqlanadi.

Bu formula *umumlashgan Om qonuni* deyiladi.

Bir konturli elektr zanjiri uchun Om qonuni quyidagicha yoziladi:

$$I = \Sigma E / \Sigma R$$

bunda ΣR - ichki va tashqi qarshiliklarning zanjir bo‘yicha arifmetik yig‘indisi, ΣE - zanjirdagi EYKlarning algebraik yig‘indisi.



1.15 – rasm

Agar konturdagi tok yoʻnalishi undagi EYK yoʻnalishi bilan bir xil boʻlsa, u holda EYK $E \Sigma E$ da musbat, qarama-qarshi yoʻnalishda boʻlsa, manfiy ishora bilan olinadi.

Masala: shoxobchalanmagan zanjirda (1.15- rasm) EYK $E_1 = 110\text{ V}$, $E_2 = 48\text{ V}$, rezistor $R_1 = 18\ \Omega$, $R_2 = 13\ \Omega$. a va b nuqtalar orasidagi kuchlanishni aniqlang.

Tokning musbat yoʻnalishini soat mili harakati yoʻnalishi boʻyicha qabul qilamiz. Om qonuniga asosan:

$$I = \frac{\sum E}{\sum R} = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{110 - 48}{18 + 13} = 2\text{ A}.$$

EYK E_1 ning yoʻnalishi tok I yoʻnalishi bilan bir xil boʻlgani uchun E_1 musbat ishorada, E_2 yoʻnalishi esa tok I yoʻnalishiga teskari boʻlgani uchun manfiy ishorada olindi. Tok yoʻnalishi ixtiyoriy qabul qilinadi. Agar tokning topilgan qiymati manfiy ishora bilan chiqsa, u holda tokning haqiqiy yoʻnalishi dastlab qabul qilingan tok yoʻnalishiga teskari yoʻnalgan boʻladi.

a va b nuqtalar orasidagi potensiallar ayirmasi U_{ab} ni aniqlash uchun zanjirning adb qismi olinib, unga zanjirning EYK manbali qismi uchun Om qonuni qoʻllaniladi:

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_b - E_2}{R_2} = \frac{U_{ab} - E_2}{R_2}, \quad \text{bundan}$$

$$U_{ab} = E_2 + R_2 I = 48 + 13 \cdot 2 = 74\text{ V}.$$

$$\text{Zanjirning } acb \text{ qismi uchun esa } I = \frac{\varphi_b - \varphi_a + E_1}{R_1} = \frac{U_{ba} + E_1}{R_1}, \text{ bundan}$$

$$U_{ba} = -E_1 + R_1 I = -110 + 18 \cdot 2 = -74\text{ V}.$$

$$\text{Demak, } U_{ab} = 74\text{ V} \text{ yoki } U_{ba} = -74\text{ V}.$$

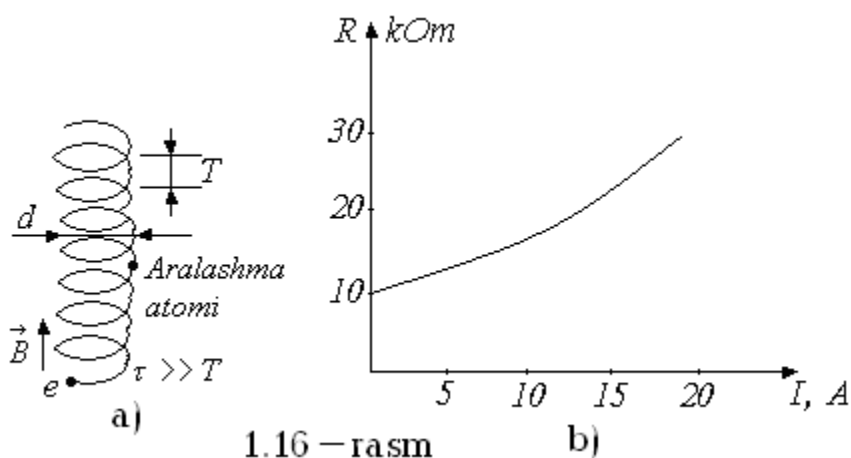
1.5. Katta toklarda Om qonunining buzilishi

Shu paytgacha biz elektronlarni faqat elektr maydoni ta'siridagi harakatini oʻrganib keldik. Lekin ma'lumki, oʻtkazgichdan oʻtayotgan tok magnit maydonining manbaidir. Magnit maydoni esa oʻtkazgichni nafaqat tashqarisida, balki ichkarisida ham mavjuddir.

Misol uchun $I = 10\text{ A}$ tok oʻtayotgan va diametri $d = 1\text{ mm}$ boʻlgan oʻtkazgich atrofidagi magnit maydonining induksiyasi $B = \left(4\mu_0 I / d\right) \approx 0,012$

T ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Gn/m}$ - magnit doimiysi). Tokning magnit maydoni ma'lum bir sharoitlarda Om qonunining buzilishiga olib kelishi mumkin.

Darhaqiqat, magnit maydonida harakatlanayotgan elektronga uning trayektoriyasini o'zgartiruvchi Lorens kuchi ta'sir qiladi. Agar maydon induksiyasi yo'nalishi B elektron tezligi yo'nalishi v ga perpendikulyar bo'lsa, u holda elektron trayektoriyasi $r = mv/eB$ radiusli aylana ko'rinishiga ega bo'ladi (m, e - elektron massasi va zaryadi). Agar B va v vektorlar orasidagi burchak α bo'lsa, u holda elektron diametri $d = 2(mv/eB)\sin\alpha$ bo'lgan spiral bo'yicha harakat qiladi (1.16- rasm, a). Bunda elektron



1.16 – rasm

spiralning bir o'ramini $T = 2\pi m/eB$ vaqt davomida bosib o'tadi. Agar elektronning erkin harakatlanish vaqti $\tau \gg T$ bo'lsa, u spiral bo'ylab harakatlanadi. Bu holda spiralning diametri $d < vT$ τ vaqt davomida magnit maydoni yo'qligidagi elektronning siljish masofasi $l = v\tau$ dan ancha kam bo'ladi. Shuning uchun τ vaqt davomida elektron diametri d bo'lgan quvurda "qamalib" qolganday bo'ladi.

Natijada o'tkazgichning qarshiligi magnit maydoni bo'lmagan holga nisbatan kattaroq bo'ladi. Binobarin, o'z tokining magnit maydoni ta'sirida bo'lgan o'tkazgich qarshiligini o'zgarishi katta toklarda Om qonunining buzilishiga olib keladi.

Agar $\tau < T$ bo'lsa, u holda ikkita ketma-ket keladigan to'qnashuvlar orasidagi elektronlar harakati to'g'ri chiziqdan juda kam farq qiladi. Bu holda magnit maydoni o'tkazgich qarshiligiga amalda ta'sir qilmaydi.

Magnit maydonining induksiyasining o'tkazgich qarshiligiga ta'sir qiladigan qiymatini elektronni aylanma orbita bo'ylab harakat davri $T = 2\pi m/eB$ ning erkin harakat vaqti τ ga tengligidan keltirib chiqariladi, ya'ni: $B_0 = 2\pi m/e\tau$.

Metall o'tkazgichlarda mazkur qiymat taxminan $0,01 \text{ T}$ ga teng. Bunday maydon diametri $d=1 \text{ mm}$ bo'lgan simdan $I=10 \text{ A}$ tok o'tganda paydo bo'ladi.

Metall o'tkazgich qarshiligini undan o'tayotgan tokka bog'liqligining eksperimental grafigi 1.16- rasm, b da keltirilgan. Grafikdan ko'rinib turibdiki, tok oshishi bilan qarshilik bir necha barobar ortadi. Shunday qilib, tok magnit maydonining u o'tayotgan o'tkazgich qarshiligiga ta'sir qilishi Om qonunining buzilishiga olib keladi.

Biz o'tkazgichlarda Om qonunining katta toklarda buzilishini fizik sabablarini ko'rib chiqdik. Bundan tashqari, texnikada keng qo'llaniladigan nochiziq elementlar - diod va tranzistorlarda hamda turli metallarning o'zaro kontaktlashgan joylarida Om qonunining buzilishi kuzatiladi.

O'zgaruvchan elektr va magnit maydonlari ta'siridagi o'tkazgichlarda ham Om qonuni buzilishi ro'y beradi.

1.6. Potensial diagramma

Zanjirning biror qismi yoki berk zanjir (kontur) belgilangan nuqtalaridagi potenciallar qiymatini shu zanjir qarshiliklarining qiymatiga qarab o'zgarish grafigi *potensial diagramma* deb ataladi. Potensial diagrammani qurish uchun to'g'ri burchakli koordinatalar tekisligining absissa o'qiga kontur bo'yicha olingan rezistorlar qarshiliklari qiymati, ordinata o'qiga esa tegishli potenciallar qiymati mos ravishda qo'yiladi. Diagrammadan zanjir yoki konturning biror qismiga tegishli potenciallarni aniqlash mumkin bo'ladi.

1-masala: bir konturli elektr zanjir uchun potenciallar diagrammasini quring (1.17- rasm).

Berilgan: $E_1 = 24 \text{ V}$; $E_2 = 110 \text{ V}$; $R_1 = 4 \text{ } \Omega$; $R_2 = 3 \text{ } \Omega$; $R_3 = 7 \text{ } \Omega$;
 $r_{ich1} = r_{ich2} = 1 \text{ } \Omega$.

Yechish: EYK $E_2 > E_1$ bo'lganligi uchun tokning haqiqiy yo'nalishi E_2 EYKning yo'nalishi bilan bir xil bo'ladi.

Berk zanjir uchun Om qonuniga ko'ra undagi tokni topamiz:

$$I = \frac{E_2 - E_1}{R_1 + r_{ich1} + R_2 + r_{ich2} + R_3} = \frac{110 - 24}{4 + 1 + 3 + 1 + 7} = 5,375 \text{ A.}$$

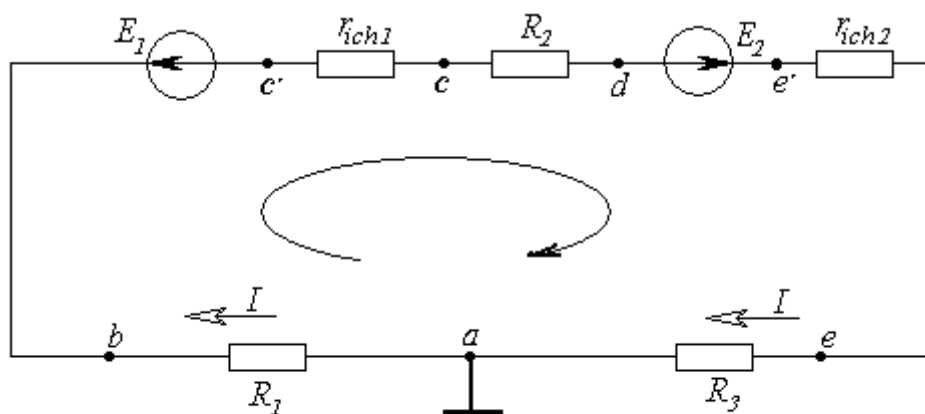
Potensial diagrammani qurish uchun zanjirning barcha nuqtalari potenciallarini bilish zarur. a nuqtani yerga ulangan deb qabul qilamiz. Shuning uchun ham uning potentsiali $\varphi_a = 0$ bo'ladi. Elektr zanjirining a nuqtasidan b nuqtasiga o'tishda R_1 qarshilikli rezistor mavjud. Bu

rezistorda qiymati a va b nuqtalar potentsiallari ayirmasiga teng bo'lgan kuchlanish pasayishi hosil bo'ladi, ya'ni:

$$\varphi_a - \varphi_b = R_1 I, \text{ bundan } \varphi_b = \varphi_a - R_1 I = -21,5 \text{ V.}$$

b va c' nuqtalar orasida E_1 EYK manbai ulanganligi va uning yo'nalishi zanjirdagi tok yo'nalishiga qarama-qarshi bo'lganligi bois c' nuqta potentsiali b nuqta potentsialidan E_1 kattalikka pasayadi, ya'ni:

$$\varphi_{c'} = \varphi_b - E_1 = -21,5 - 24 = -45,5 \text{ V.}$$



1.17 – rasm

Zanjirning c' nuqtasidan c nuqtasiga o'tishda r_{ich1} rezistor mavjud. Shuning uchun:

$$\varphi_c = \varphi_{c'} - r_{ich1} \cdot I = -45,5 - 5,375 = -50,875 \text{ V.}$$

Endi boshqa nuqtalarning potentsiallarini topamiz:

$$\varphi_c - \varphi_d = R_2 I,$$

$$\varphi_d = \varphi_c - R_2 I = -50,875 - 16,12 = -66,995 \text{ V.}$$

$$\varphi_{e'} - \varphi_d = E_2$$

$$\varphi_{e'} = \varphi_d + E_2 = -66,995 + 110 \approx 43,01 \text{ V.}$$

$$\varphi_e = \varphi_{e'} - r_{ich2} I = 43 - 5,375 = 37,625 \text{ V.}$$

$$\varphi_e - \varphi_a = R_3 I$$

$$\varphi_a = \varphi_e - R_3 I = 37,625 - 37,625 = 0 \text{ V.}$$

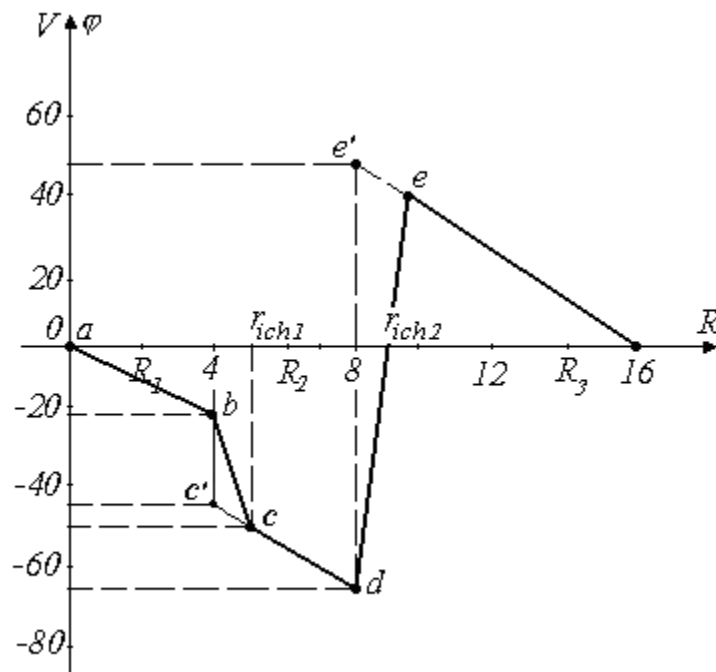
Potensial diagrammani koordinatalar tekisligida qurish uchun berilgan konturning ekvivalent qarshiligini hisoblaymiz:

$$R_{\text{экв}} = R_1 + r_{ich1} + R_2 + r_{ich2} + R_3 = 16 \Omega. \text{ Qarshilik va potensial uchun}$$

masshtab tanlaymiz: $m_R = 0,2 \Omega/\text{mm}$, $m_U = 2 \text{ V/mm}$.

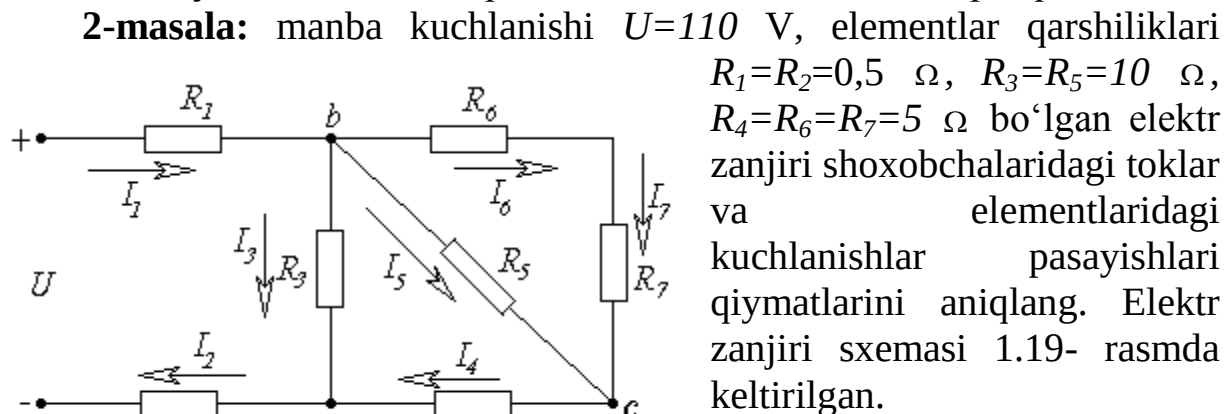
Absissa o'qiga $R_1, r_{ich1}, R_2, r_{ich2}, R_3$ qarshiliklar qiymatlari navbat bilan qo'yiladi (1.18- rasm). Ordinata o'qiga esa sxemaning yuqorida keltirilgan qarshiliklardan keyingi nuqtalari potentsiallarining qiymatlari mos ravishda

qo'yiladi. Ushbu potentsiallar va ularga mos qarshiliklar qiymatlari kesishgan nuqtalar o'zaro tutashtirilib, ko'rilayotgan zanjir uchun potentsial diagramma hosil qilinadi. Shuni aytib o'tish joizki, zanjirning EYK manbai joylashgan(bc' va de') qismlariga mos keluvchi potentsial diagrammaning bo'lagi vertikal to'g'ri chiziq ko'rinishida bo'lsa-da, real EYK manbai ichki qarshiligini manbadan ajratib bo'lmasligi bois, zanjirning EYK manbai joylashgan qismlariga mos keluvchi potentsial diagrammaning bo'lagi og'ma to'g'ri chiziq ko'rinishida bo'ladi (1.18- rasmda bc va de uzoq chiziqlar).



1.18 – rasm

Potentsial diagrammadan berilgan kesma og'ish burchagining tangensi tok miqdoriga teng bo'lishiga ishonch hosil qilish mumkin. de' uchastkada $E_2=110$ V, ya'ni $r_{ich}I=5,37$ V potentsialidan 20 martadan ko'proq.



1.19 – rasm

Yechish. Toklar qiymatini to'g'ridan-to'g'ri aniqlash

mumkin emas, chunki elementlardagi kuchlanish pasayishlari qiymatlari noma'lum. Shuning uchun elektr zanjiri sxemasini o'zgartirish usulini qo'llab, uning ekvivalent qarshiligini hisoblaymiz.

$$R_{bc} = \frac{(R_6 + R_7)R_5}{R_6 + R_7 + R_5} = \frac{(5+5) \cdot 10}{5+5+10} = 5 \Omega,$$

$$R_{ab} = \frac{(R_{bc} + R_4)R_3}{R_{bc} + R_4 + R_3} = \frac{(5+5) \cdot 10}{5+5+10} = 5 \Omega,$$

Nihoyat, zanjir ekvivalent qarshiligi :

$$R_{ekv} = R_{ab} + R_1 + R_2 = 5 + 0,5 + 0,5 = 6 \Omega.$$

Zanjirdagi umumiy tok Om qonuniga binoan aniqlanadi:

$$I_1 = \frac{U}{R_{\text{экв}}} = \frac{110}{6} = 18,33 \text{ A}.$$

Zanjirning ab qismidagi kuchlanish pasayishi:
 $U_{ab} = R_{ab}I_1 = 5 \cdot 18,33 = 91,65 \text{ V}$

yoki $U_{ab} = U - (R_1 + R_2)I_1 = 110 - (0,5 + 0,5) \cdot 18,33 = 91,67 \text{ V}.$

Shoxobchalardan o'tuvchi toklar:

$$I_3 = \frac{U_{ab}}{R_3} = \frac{91,65}{10} = 9,16 \text{ A},$$

$$I_4 = I_1 - I_3 = 18,33 - 9,16 = 9,17 \text{ A}.$$

$I_5 = I_6$ bo'lgani uchun R_5 va R_6 hamda R_7 rezistorlardan o'tuvchi toklar:

$$I_5 = I_6 = I_4 / 2 = 9,16 / 2 = 4,58 \text{ A. Chunki:}$$

$$R_6 + R_7 = 5 + 5 = 10 \Omega \text{ va } R_5 = 10 \Omega.$$

Tegishli kuchlanish pasayishlarining qiymatlari esa:

$$U_{bc} = R_5 I_5 = 10 \cdot 4,58 = 45,8 \text{ V},$$

$$U_{ac} = R_4 I_4 = 5 \cdot 9,17 = 45,85 \text{ V}.$$

3-masala: 1.20 - rasmda keltirgan elektr zanjirini hisoblang. Berilgan: $I_5 = 20 \text{ A}$, $R_1 = R_3 = 8 \Omega$, $R_2 = R_4 = 4 \Omega$, $R_5 = R_6 = 1,5 \Omega$, $R_7 = 3 \Omega$.

Yechish. Masala shartiga e'tibor berilsa, unda manba kuchlanishining qiymati berilmagan. Shuning uchun dastlab rezistor va shoxobcha toklari bo'yicha kuchlanishlarni hisoblaymiz:

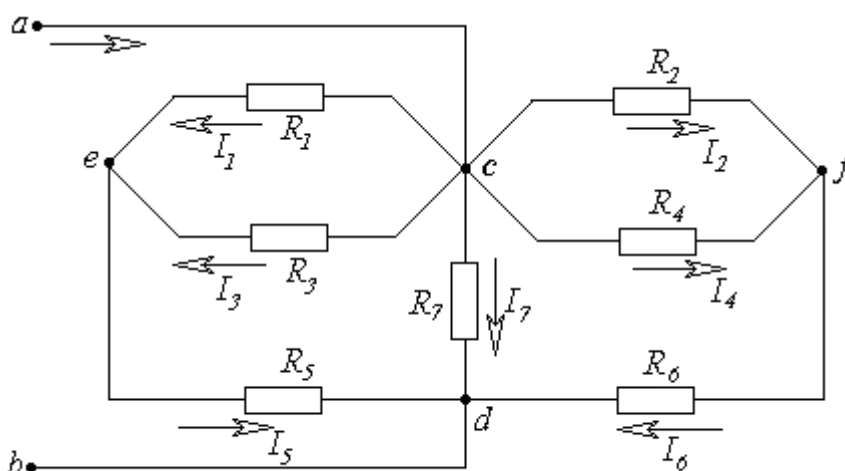
$$U_{ed} = R_5 I_5 = 1,5 \cdot 20 = 30 \text{ V}.$$

$$U_{ec} = R_1 I_1 = R_3 I_3 = I_5 \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = 80 \text{ V},$$

$$U_{cd} = U_{ed} + U_{ec} = 110 \text{ V}.$$

Zanjirning R_6 qarshiligidan o'tayotgan tok:

$$I_6 = \frac{U_{cd}}{R_{246}} = \frac{U_{cd}}{R_6 + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4}} = \frac{110}{1,5 + \frac{4 \cdot 4}{4 + 4}} = \frac{110}{3,5} = 31,4 \text{ A},$$



1.20 – rasm

$R_1=R_3$ va $R_2=R_4$ bo'lgani uchun $I_2=I_4$ bo'ladi, ya'ni:

$$I_2 = I_4 = \frac{I_6}{2} = \frac{31,4}{2} = 15,7 \text{ A}.$$

U_{cf} kuchlanish pasayishi:

$$U_{cf} = R_2 I_2 = 4 \cdot 15,7 = 62,8 \text{ V}.$$

R_7 rezistordan o'tuvchi tok:

$$I_7 = \frac{U_{cd}}{R_7} = \frac{110}{3} = 36,6 \text{ A}.$$

Zanjirning shoxobchalanmagan qismidan o'tuvchi umumiy tok:

$$I = \frac{U_{cd}}{R_{um}} = \frac{R_7 R_{246} R_{135} U_{cd}}{R_{246} R_{135} + R_7 R_{135} + R_7 R_{246}} = \frac{110}{1,25} = 88 \text{ A}.$$

1.7. Elektr energiyasi va elektr quvvati. Quvvatlar balansi

1.7.1. Elektr energiyasi

Oddiy elektr zanjiri uchun tok Om qonuniga ko'ra quyidagicha aniqlanadi: $I = \frac{E}{R + r_{ich}}$, bundan $E = IR + Ir_{ich}$.

$IR = U$ ekanligini hisobga olib, $E = U + Ir_{ich}$ ifodani hosil qilamiz. Oxirgi tenglamani ikkala tomonini It ga ko'paytiramiz:

$$EIt = UIt + I^2 r_{ich} t,$$

bu yerda $EIt = W_G$ - manba energiyasi yoki u bajargan ish. $U = A/q = W/q$, $q = It$, $\Delta W = I^2 r_{ich} t$ tengliklardan $W_G = W + \Delta W$ ni hosil qilamiz. Bunda ΔW - manba ichki qarshiligida isrof bo'lgan energiya. $W - R$ qarshilikli iste'molchida sarf bo'lgan energiya.

Shuni ta'kidlash kerakki, ish va energiya teng kuchli tushunchalardir. Energiyani o'lchash uchun jism shu energiyani sarflab bajargan ishini o'lchash kerak bo'ladi.

Energiyaning o'lchov birligi $[W] = [UIt] = [V \cdot A \cdot c = J]$.

1 kVt·soat = 3600000 J.

1.7.2. Elektr quvvati

Elektr quvvati - elektr energiyasini uzatish va boshqa tur energiyaga aylantirish tezligini xarakterlovchi fizik kattalikdir:

$$P_G = \frac{W_G}{t} = E_G I,$$

bu yerda P_G - manbaning quvvati.

Quvvatning o'lchov birligi vatt. 1 vatt - 1 sekund davomida 1 J ish bajarishga teng quvvat.

Energiya manbaining iste'molchiga berayotgan quvvati:

$$P = UI = I^2 R = U^2 G.$$

Manba ichki qarshiligida isrof bo'lgan quvvat: $\Delta P_G = I^2 r_{ich}$.

1.7.3. Elektr energiyasi manbaining FIK

Iste'molchi quvvati (foydali quvvat)ning energiya manbai quvvatiga nisbati uning foydali ish ko'effitsiyenti (FIK) deb ataladi, ya'ni:

$$\eta = \frac{P}{P_G} = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E} = \frac{IR}{IR + Ir_{ich}} = \frac{R}{R + r_{ich}}.$$

Tenglamadan ko'rinib turibdiki, manba ichki qarshiligi qancha kichik bo'lsa, uning FIK shuncha katta bo'ladi.

Endi qanday shart bajarilganda energiya manbai maksimal foydali quvvat uzatishini aniqlaymiz. Buning uchun $P = I^2 R$ tenglamani $I = E / (R + r_{ich})$ ifodani hisobga olgan holda quyidagicha o'zgartiramiz:

$$P = \frac{E^2}{R + 2r_{ich} + \frac{r_{ich}^2}{R}} = f(R).$$

$P = f(R)$ funksiyani maksimumga tekshiramiz, ya'ni $P = f(R)$ funksiyaning R bo'yicha hosilasini nolga tenglashtiramiz:

$$\frac{df(R)}{dR} = 1 - \frac{r_{ich}^2}{R^2} = 0 \quad \text{yoki} \quad R = r_{ich}. \quad \text{Bu shartni} \quad P = f(R) \quad \text{ga qo'yib,}$$

$$P_{\max} = \frac{E^2}{4r_{ich}} \quad \text{ni hosil qilamiz.}$$

Shunday qilib, EYK manbai maksimal foydali quvvatda ishlashi uchun tashqi zanjirning qarshiligi R manba ichki qarshiligi r_{ich} ga teng bo'lishi shart. *Bu rejim moslangan iste'molchi rejimi deb ataladi.*

Shu bilan birga bu rejimda manba quvvatining 50 % i ichki qarshilikda isrof bo'ladi va bunda $\eta = \frac{R}{R + r_{ich}} = \frac{R}{2R} = 0,5$ ga teng.

Bu rejim avtomatika, telemexanika va aloqa texnikasida kichik quvvatli signallarni uzatishda ishlatiladi. Katta quvvatli signallarni uzatishda bu rejimda ishlashga ruxsat etilmaydi. Katta quvvatli manbalar, odatda $R = (10...20)r_{ich}$ rejimda ishlab, FIK 95% gacha yetadi.

1.7.4. Elektr zanjirlarida quvvatlar balansi

Energiya saqlanish qonuniga ko'ra o'zgarmas tok zanjiriga ulangan manbalar quvvatlari algebraik yig'indisi zanjirning barcha iste'molchilaridagi quvvatlar arifmetik yig'indisiga tengdir, ya'ni:

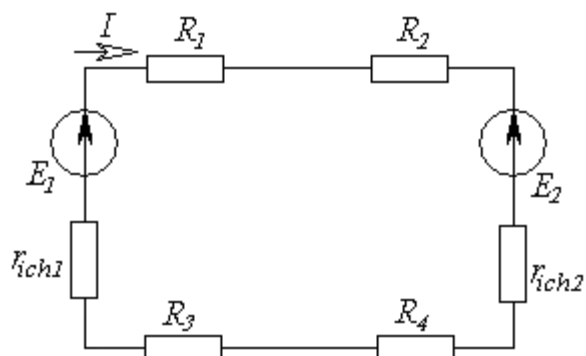
$$\Sigma EI = \Sigma I^2 R.$$

Bu ifoda energetik balans (muvozanat) tenglamasi deyiladi, ya'ni manbalarning ishlab chiqargan elektr energiyasi(quvvati) iste'molchilarda, uzatish liniyasida va manbalarning o'zida sarf bo'lgan energiya(quvvat)ga tengdir.

Agar elektr zanjirida tok yo'nalishi EYK yo'nalishi bilan bir xil bo'lsa, u holda manba vaqt birligi ichida zanjirga energiya uzatuvchi manba hisoblanadi. Agar tok yo'nalishi EYK yo'nalishiga qarama-qarshi bo'lsa, u holda EYK manbai zanjirga energiya bermaydi, aksincha energiyani qabul qiladi, ya'ni iste'molchi vazifasini bajaradi. Misol tariqasida akkumulyatorning zaryadlanish jarayonini keltirish mumkin. Bunda EI ko'paytma quvvatlar muvozanati tenglamasiga manfiy ishora bilan kiradi.

1.21- rasmda keltirilgan zanjir uchun energetik balans tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega:

$$E_1 I - E_2 I = R_1 I^2 + R_2 I^2 + R_3 I^2 + R_4 I^2 + r_{ich1} I^2 + r_{ich2} I^2.$$



1.21 – rasm

Agar elektr zanjiriga EYK va tok manbalari ulangan bo'lsa, ya'ni zanjirning ayrim tugunlariga EYK manbaidan tashqari tok manbai ham ulangan bo'lsa, u holda bir tugundan ikkinchi tugun tomon yo'nalgan tok manbaidan hosil bo'lgan quvvat sarfini hisobga olish kerak bo'ladi. Masalan, zanjirning a tuguniga I_k tok kirib b tugunidan chiqsa, u holda tok

manbai sarflayotgan quvvat $P = U_{ab} I_k$ bo'ladi. Bunday holda energetik muvozanat tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$\sum_{i=1}^n R_i I_i^2 = \sum_{k=1}^m E I_k + \sum_{k=1}^m U_{ab} I_k.$$

Bu tenglama quvvatlar muvozanatining umumiy tenglamasi deyiladi.

1.8. Kirxgof qonunlari

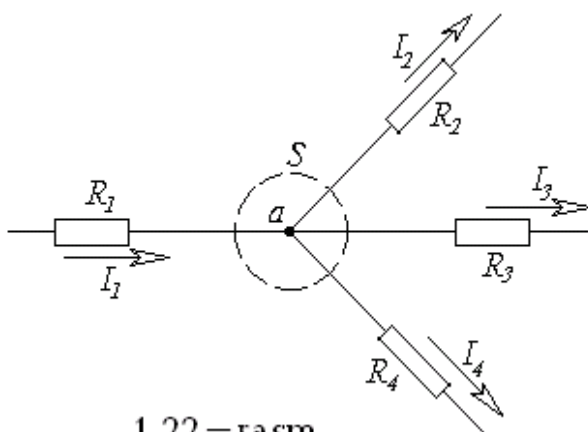
Har qanday elektr zanjiridagi jarayonlar Kirxgofning 1- va 2 - qonunlari bilan ifodalanadi.

1- qonun. Kirxgofning 1- qonuni zanjirning tugunlariga tegishli bo'lib, unga ko'ra zanjirning istalgan tugunida toklarning algebraik yig'indisi nolga teng bo'ladi, ya'ni:

$$\sum_{k=1}^m I_k = 0$$

yoki elektr zanjirining istalgan tuguniga kiruvchi toklarning arifmetik yig'indisi shu tugundan chiquvchi toklarning arifmetik yig'indisiga tengdir, ya'ni:

$$\sum_{i=1}^m I_i = \sum_{j=1}^q I_j.$$



1.22 – rasm

1.22- rasmda elektr zanjirining a tuguni ko'rsatilgan. Agar a tugunga kiruvchi toklar musbat ishora bilan olinsa,

tugundan chiquvchi toklar ishorasi manfiy olinadi (yoki aksincha).

Kirxgofning 1-qonuniga asosan: $I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0$ yoki $I_1 = I_2 + I_3 + I_4$.

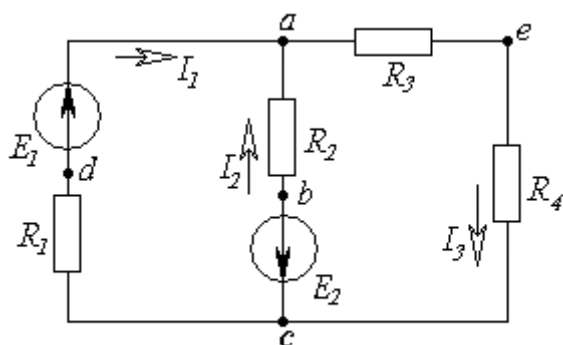
Kirxgof 1-qonunining fizik ma'nosi: elektr zanjirining tugunida zaryadlarning harakati uzluksizdir va unda zaryadlar to'planib qolmaydi.

2- qonun. Kirxgofning 2- qonuni zanjirning berk konturlariga tegishli bo'lib, unga ko'ra elektr zanjirining istalgan berk konturida kuchlanishlar pasayishining algebraik yig'indisi shu konturdagi EYKlarning algebraik yig'indisi teng, ya'ni:

$$\sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{i=1}^m E_i.$$

Agar konturni aylanib chiqish yo'nalishi bilan tok yoki EYK yo'nalishi bir xil bo'lsa, u holda yig'indiga tegishli tashkil etuvchilar "musbat" ishora bilan, aks holda esa "manfiy" ishora bilan kiradi.

Kirxgofning 2- qonunini boshqa ko'rinishda yozish ham mumkin: zanjirning ixtiyoriy konturida kuchlanishlarning algebraik yig'indisi nolga teng:



1.23 – rasm

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0.$$

1.23- rasmdagi $abcda$ kontur uchun $U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} + U_{da} = 0$ yoki $R_1 I_1 - R_2 I_2 = E_1 + E_2$. Kirxgof qonunlari chiziqli va nochiziqli zanjirlarni hisoblashda keng qo'llaniladi.

1.9. Kirxgof qonunlari asosida murakkab elektr zanjirlarining topologik tenglamalarini tuzish

Har qanday murakkab elektr zanjiri shoxobchalaridagi toklarni aniqlash uchun Kirxgof qonunlaridan foydalaniladi. Zanjirdagi tugunlar soni q , shoxobchalar soni m va tok manbalari soni m_{TM} deb belgilansa, har bir shoxobchadan o'tuvchi tokni Kirxgof qonunlari asosida hisoblashda ma'lum tartibdagi ketma-ketlikni tavsiya etish mumkin. Bunda tok manbai ulangan shoxobchalardan o'tuvchi tok qiymati va yo'nalishi ma'lum bo'lganligi bois ular umumiy toklar sonidan ayriladi. Zanjirning qolgan shoxobchalaridagi noma'lum toklarni hisoblashga kirishishdan avval quyidagilarni bajarish kerak bo'ladi:

a) har bir shoxobchadagi toklar yoʻnalishlarini ixtiyoriy tanlash va ularni sxemada belgilash;

b) Kirxgof 2- qonuni boʻyicha tenglamalar tuzish uchun konturlarni aylanib chiqish yoʻnalishini ixtiyoriy (soat mili harakati yoʻnalishida yoki unga teskari) tanlash va ularni sxemada belgilash.

Kirxgof 1- qonuniga asoslangan va oʻzaro bogʻliq boʻlmagan tenglamalar sistemasini tuzish uchun tugunlar sonidan bitta kam tenglama tuzish kerak.

Kirxgof 2- qonuniga asoslanib tuzilgan tenglamalar soni umumiy shoxobchalar sonidan tok manbalari ulangan shoxobchalar soni va Kirxgofning 1- qonuni boʻyicha tuzilgan tenglamalar sonini ayirib topiladi, ya'ni konturlar uchun tuzilgan tenglamalar soni:

$$k = (m - m_{TM}) - (q - 1) = m - m_{TM} - q + 1.$$

Kirxgof 2- qonuni boʻyicha tenglamalarni oʻzaro bogʻliq boʻlmagan (mustaqil) konturlar uchun tuzish lozim. *Oʻzaro bogʻliq boʻlmagan kontur deb shunday konturga aytiladiki, uning tarkibida boshqa konturlarga tegishli boʻlmagan kamida bitta shoxobcha boʻladi.*

Kirxgof 1- va 2- qonunlari asosida tuzilgan chiziqli algebraik tenglamalar sistemasi - oʻzgarmas tok zanjirlarining matematik modeli hisoblanadi.

Elektr zanjirlari nazariyasida ikki turdagi masalalar uchraydi. *Birinchi turdagi masalalarda* sxemasi va elementlari ma'lum boʻlgan zanjir shoxobchalaridagi toklar va uning ayrim qismlaridagi kuchlanishlar va quvvatlarni hisoblash kerak boʻladi. Bu turdagi masalalar zanjirlarni analiz masalalari deb ataladi. *Ikkinchi turdagi masalalarda* teskari masala - zanjirning ba'zi bir uchastkalaridagi tok va kuchlanish berilgan boʻlib, zanjir sxemasi va uning elementlari parametrlarini aniqlash kerak boʻladi. Bunday masalalar elektr zanjirlarining sintez masalalari deyiladi. Ikkala turdagi masalalarni yechish uchun ham koʻpincha zanjirning matematik modeli tuziladi.

Quyida nazariy elektrotexnikada koʻp uchraydigan zanjirlarni Kirxgof qonunlari asosida matematik modelini tuzishni 1.24- rasmdagi zanjir misolida koʻrib chiqamiz.

1. Har bir shoxobchadagi toklar yoʻnalishi ixtiyoriy tanlab olinadi.

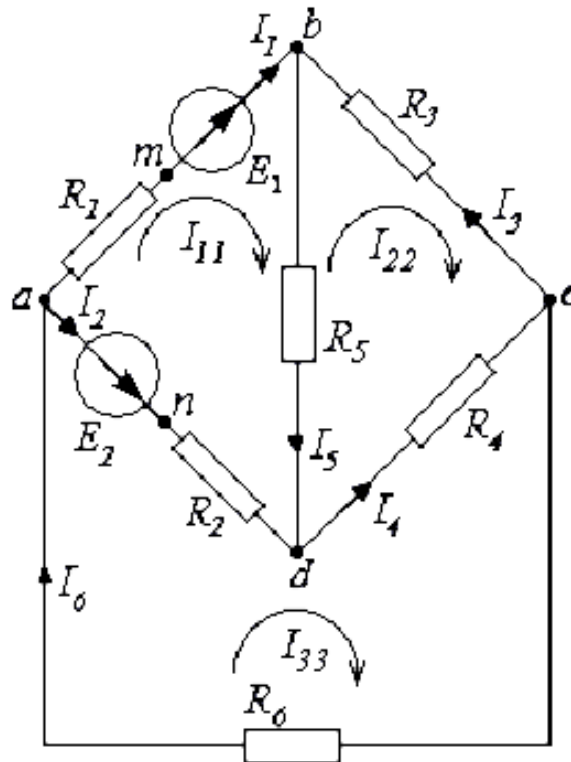
2. Kirxgof 1- qonuniga asosan tenglamalar tuzamiz.

Ularning soni zanjir tugunlaridan bitta kam boʻladi:

a tugun uchun: $I_6 - I_1 - I_2 = 0$,

b tugun uchun: $I_1 + I_3 - I_5 = 0$,

c tugun uchun: $-I_3 + I_4 - I_6 = 0$.



1.24 – rasm

3. Zanjir mustaqil konturlarini aylanib chiqish yo‘nalishi tanlanadi. Kirxgofning ikkinchi qonuniga ko‘ra mustaqil konturlar uchun tenglamalar tuziladi:

$$abda \text{ kontur uchun: } R_1 I_1 + R_5 I_5 - R_2 I_2 = E_1 - E_2,$$

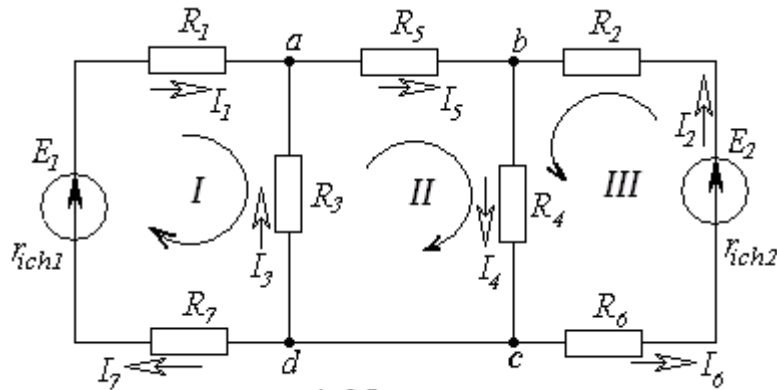
$$dbcd \text{ kontur uchun: } -R_5 I_5 - R_3 I_3 - R_4 I_4 = 0,$$

$$adca \text{ kontur uchun: } R_2 I_2 + R_4 I_4 + R_6 I_6 = E_2.$$

Bu tenglamalarda yo‘nalishlari konturlarni aylanib chiqish yo‘nalishi bilan mos keladigan EYK va toklar ishorasi musbat, yo‘nalishlari aylanib chiqish yo‘nalishiga qarama-qarshi bo‘lgan EYK va toklar ishorasi esa manfiy ishora bilan yoziladi. Bu misoldan ko‘rinib turibdiki, tuzilgan tenglamalar soni zanjirdagi noma'lum toklar yoki toklari aniqlanishi kerak bo‘lgan shoxobchalar soniga tengdir. Olti noma'lum tokli oltita tenglamalardan iborat sistema yuqorida ko‘rilayotgan zanjirning matematik modelidir. Agar hisoblash natijasida biror bir shoxobchadagi tok ishorasi manfiy chiqsa, u holda bu tokning haqiqiy yo‘nalishi dastlab tanlangan yo‘nalishga nisbatan qarama-qarshi bo‘ladi.

Masala: Kirxgof qonunlaridan foydalanib 1.25- rasmda keltirilgan elektr zanjiri shoxobchalaridan o‘tuvchi toklarni aniqlang. $R_1 = 0,3 \, \Omega$; $R_7 =$

$0,3 \Omega$; $R_2 = R_6 = 0,4 \Omega$; $R_3 = R_4 = 0,4 \Omega$; $R_5 = 6 \Omega$; $E_1 = 110 \text{ V}$; $E_2 = 48 \text{ V}$.



1.25 – rasm

EYK manbalarining ichki qarshiligi $r_{ich1} = 0,1 \Omega$, $r_{ich2} = 0,2 \Omega$.

Yechish. Berilgan sxemada tugunlar soni $q=3$ (c va d nuqtalar potentsiallari bir xil). Noma'lum toklar yo'nalishlarini ixtiyoriy tanlaymiz. Sxemada

beshta shoxobcha bo'lganligi bois shuncha tokni aniqlash lozim. Demak, beshta tenglama tuzib, ularni birgalikda yechish kerak.

Kirxgof 1- qonuni bo'yicha tenglamalar soni $T-1=3-1=2$

a tugun uchun: $I_1 + I_3 - I_5 = 0$

b tugun uchun: $I_2 + I_5 - I_4 = 0$

Qolgan 3 ta tenglamani I- , II- va III- konturlar uchun Kirxgofning ikkinchi qonuni asosida tuzamiz. Ma'lumki, konturlarni aylanib chiqish yo'nalishi ixtiyoriy tarzda tanlanadi.

I- kontur uchun:

$$E_1 = (r_{ich1} + R_1 + R_7)I_1 - R_3I_3,$$

III- kontur uchun:

$$E_2 = (r_{ich2} + R_2 + R_6)I_2 + R_4I_4,$$

nihoyat II- kontur uchun:

$$0 = R_3I_3 + R_5I_5 + R_4I_4,$$

Chunki, II- kontur passiv kontur, u faqat passiv elementlar - R_3 , R_4 va R_5 rezistorlardan tarkib topgan. Unda EYK manbai yo'q.

Tenglamalar sistemasini yechish natijasida $I_3 = -45 \text{ A}$ aniqlanadi. Manfiy ishora I_3 tokning haqiqiy yo'nalishi dastlabki tanlangan yo'nalishiga qarama-qarshi yo'nalganligini ko'rsatadi.

$$I_4 = 30 \text{ A}, \quad I_1 = 50 \text{ A}, \quad I_2 = 25 \text{ A}, \quad I_5 = 5 \text{ A}.$$

Zanjirning cd qismi uchun tokning yo'nalishini ixtiyoriy ravishda c tugundan d tugunga yo'nalgan deb qabul qilaylik. Bu qism uchun $R_{cd} = 0$.

Kirxgof 1- qonuniga binoan:

$$I_4 = I_{cd} + I_6.$$

$$I_{cd} = I_4 - I_6 = 25 - 30 = -5 \text{ A}.$$

Manfiy ishora I_{cd} tokning haqiqiy yo'nalishi dastlabki qabul qilingan yo'nalishiga qarama-qarshi ekanligini bildiradi.

1.10. Chiziqli elektr zanjir sxemalarini ekvivalent o'zgartirish

Elektr zanjirlarni tahlil qilishda ko'p hollarda uni soddalashtirish zarur bo'ladi. Buning uchun sxemaning ayrim qismlarini yanada sodda ekvivalent zanjir bilan almashtirish lozim bo'ladi. Agar elektr zanjir sxemasini o'zaro almashtirganda zanjir elementlaridagi tok va kuchlanishlarning qiymatlari o'zgarmasa, u holda ular o'zaro ekvivalent, yani almashgan bo'ladi.

Elektr zanjirning ayrim qismlarini unga ekvivalent bo'lgan qismlar bilan almashtirish ekvivalent o'zgartirish deb ataladi.

Agar elektr zanjirining ikkita qismi har qanday tashqi ta'sirda ham ekvivalentlik xususiyatini saqlab qolsa, u holda zanjirning bunday qismlari mutlaq ekvivalent qismlar deyiladi.

Elektr zanjirlarini ekvivalent o'zgartirish tegishli elektr muvozanat tenglamalari sistemasini ekvivalent o'zgartirishga asoslangan. Amalda esa elektr zanjirlarini o'zgartirish elektr muvozanat tenglamalarini tuzmasdan aniq qoidalar asosida bevosita sxemalar yordamida bajariladi.

1.10.1. Ketma-ket ulangan elementlardan iborat zanjirni ekvivalent o'zgartirish

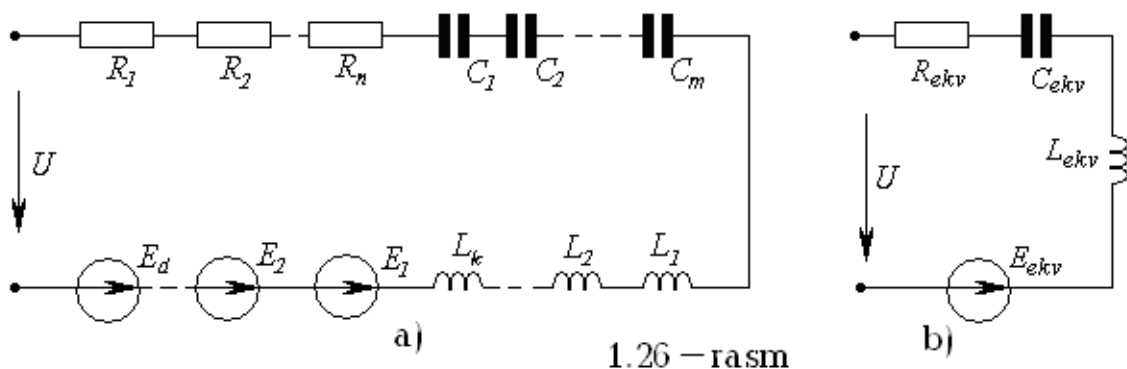
1.26- rasm, *a* da keltirilgan sxemada *n* ta rezistor, *m* ta kondensator, *k* ta induktivlik va *d* ta EYK manbalari o'zaro ketma-ket tutashgan va *U* kuchlanishli manbaga ulangan.

Zanjirning barcha elementlaridan bir xil tok o'tganligi sababli shu berk kontur uchun Kirxgofning 2- qonuniga asosan quyidagi elektr muvozanat tenglamasini yozish mumkin:

$$(R_1 + \dots + R_n)i + \frac{1}{C_1} \int_0^t idt + \dots + \frac{1}{C_n} \int_0^t idt + L_1 \left(\frac{di}{dt} \right) + \dots + L_K \left(\frac{di}{dt} \right) = U - (E_1 + \dots + E_d) \quad (1.2)$$

Bir xil hadlarni umumlashtirib (1.2) tenglamani quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$R_{ekv} i + \left(\frac{1}{C_{ekv}} \right) \int_0^t idt + L_{ekv} \left(\frac{di}{dt} \right) = U - E_{ekv}, \quad (1.3)$$

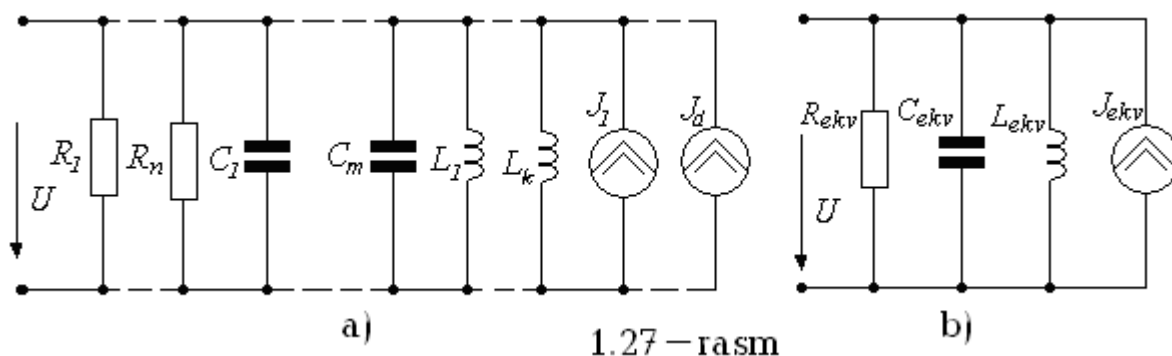


bunda $R_{ekv} = \sum_{i=1}^n R_i$; $\frac{1}{C_{ekv}} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{C_i}$; $L_{ekv} = \sum_{i=1}^k L_i$; $E_{ekv} = \sum_{i=1}^d E_i$.

(1.3) tenglama o'zgartirilgan sxema(1.26- rasm, b)ning tenglamasidir. Shunday qilib, zanjir bir xil elementli qismlarini ekvivalent yagona mos elementlar, ya'ni ekvivalent rezistiv R_{ekv} , induktiv L_{ekv} va sig'im C_{ekv} elementlari hamda E_{ekv} manbai bilan almashtirsak, uning bir xil turdagi elementlardan tarkib topgan qismlaridagi tok va kuchlanish o'zgarmaydi. Bunda EYK manbalari va kuchlanishlar algebraik yig'indisi olinadi. Konturni tanlangan aylanib chiqish yo'nalishiga qarab EYK larning ishoralari manfiy yoki musbat bo'ladi. Kondensatorlar o'zaro ketma-ket ulanganda umumiy C_{ekv} ning teskari qiymati ketma-ket ulangan kondensatorlar sig'imlarining teskari qiymatlari yig'indisiga teng va C_{ekv} hamma vaqt har bir ketma-ket ulangan sig'im qiymatidan ham kichik bo'ladi. Agar bir xil sig'imli m ta kondensator ketma-ket ulangan bo'lsa, C_{ekv} har bir kondensator sig'imidan m marta kam bo'ladi.

1.10.2. Parallel ulangan elementlardan iborat zanjirlarni ekvivalent o'zgartirish

1.27-rasm, a da keltirilgan elektr zanjir sxemasida n ta rezistor, m ta kondensator, k ta induktivlik va d ta tok manbalari o'zaro parallel ulangan. Bu zanjir umumlashgan ikki tugunli zanjir deyiladi.



Zanjir barcha elementlari bir xil kuchlanishga ega. Shuning uchun zanjirning elektr muvozanat tenglamasi Kirxgof 1- qonuniga asosan tuziladi:

$$i = \frac{1}{R_1}u + \frac{1}{R_2}u + \dots \frac{1}{R_n}u + C_1 \frac{du}{dt} + C_2 \frac{du}{dt} + \dots C_m \frac{du}{dt} + \frac{1}{L_1} \int_{-\infty}^t u dt + \frac{1}{L_2} \int_{-\infty}^t u dt + \dots + \frac{1}{L_k} \int_{-\infty}^t u dt - (J_1 + J_2 + \dots + J_d).$$

Bir xil hadlarni ekvivalentga keltirib quyidagicha yozish mumkin:

$$i = \frac{1}{R_{ekv}}u + C_{ekv} \frac{du}{dt} + \frac{1}{L_{ekv}} \int_{-\infty}^t u dt - J_{ekv}, \quad (1.4)$$

bu yerda $\frac{1}{R_{ekv}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}; C_{ekv} = \sum_{i=1}^m C_i; \frac{1}{L_{ekv}} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{L_i}; J_{ekv} = \sum_{i=1}^d J_i.$

(1.4) tenglamaga 1.27-rasm, *b* dagi o'zgartirilgan ekvivalent sxema mos keladi. Har bir guruhda parallel ulangan bir xil turdagi elementlar ekvivalent element bilan almashtirilsa, ular parametrlari R_{ekv} , C_{ekv} , L_{ekv} , J_{ekv} bo'lib, (1.4) ifodalar yordamida aniqlanadi. Umumlashgan ikki tugunli zanjir(1.27-rasm, *b*)da kirish kuchlanishi va toki qiymatlari o'zgarmay qoladi. O'zaro parallel ulangan kondensatorlar sig'imlari uchun C_{ekv} va tok manbalari toklari ekvivalent qiymati J_{ekv} o'zaro parallel ulangan elementlar parametrlarining yig'indisiga teng. Bu yerda tok manbalari toklarining yig'indisi algebraik yig'indi bo'lib, undagi qo'shiluvchilar ishoralari toklar yo'nalishiga qarab olinadi, ya'ni tenglama qaysi tugunga nisbatan tuzilgan bo'lsa, o'sha tugunga nisbatan tok manbalari yo'nalishlari e'tiborga olinadi. Agar bir xil sig'imli kondensatorlar o'zaro parallel ulangan bo'lsa, u holda $C_{ekv} = mC$ bo'ladi. Parallel ulangan rezistorlar va induktivliklar parametrlari ekvivalent qiymatlarining teskari qiymati alohida har bir element uchun teskari olingan qiymatlari yig'indisiga teng. R_{ekv} va L_{ekv} qiymatlari har bir element parametric qiymatidan ham kam bo'ladi. Bir xil qarshilik va induktivlikka ega bo'lgan elementlar o'zaro parallel ulanganda, ularning ekvivalent parametrlari: $R_{ekv} = R/n$ va $L_{ekv} = L/k$ bo'ladi.

1.10.3. Aralash ulangan elementlardan iborat zanjirlarni ekvivalent o'zgartirish

Aralash ulangan zanjirda parallel yoki ketma-ket ulangan elementlar bitta ekvivalent ikki qutblik bilan almashtiriladi. Bunda ekvivalent

o'tkazuvchanlik parallel ulangan elementlar o'tkazuvchanliklarining yig'indisiga teng bo'ladi.

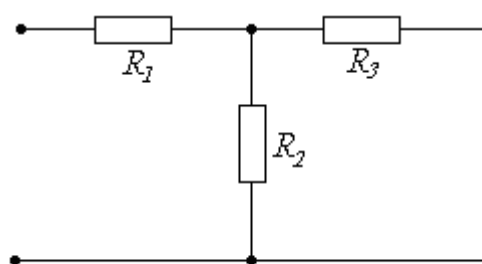
Bir xil turdagi ketma-ket ulangan elementlarni bitta ekvivalent ikki qutblik bilan almashtirib, uning umumiy qarshiligi ketma-ket ulangan qarshiliklar yig'indisiga teng deb olinadi. Elementlari aralash ulangan sxemalarga zanjirsimon yoki narvonsimon zanjirlar kiradi. Ularning kirish qarshiligi yoki kirish o'tkazuvchanligi quyidagi uzluksiz zanjirsimon kasr bilan ifodalanishi mumkin:

$$a_1 + \frac{1}{a_2 + \frac{1}{a_3 + \frac{1}{\vdots + \frac{1}{a_{n-1} + \frac{1}{a_n}}}}},$$

bu yerda $a_1, a_2, a_3, a_4, \dots, a_n$ koeffitsiyentlar zanjirsimon kasr elementlari deb ataladi. Kasr elementlarining soni n chegarali zanjirsimon kasr bo'lishi mumkin. Oddiy narvonsimon zanjir (1.28- rasm) umumiy qarshiligini aniqlaymiz.

$$R = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = R_1 + \frac{1}{\left(\frac{1}{R_2}\right) + \left(\frac{1}{R_3}\right)}.$$

Bu formuladagi R_2 qarshilikni $G_2 = 1/R_2$ o'tkazuvchanlik bilan almashtiramiz va quyidagi ifodani hosil qilamiz:



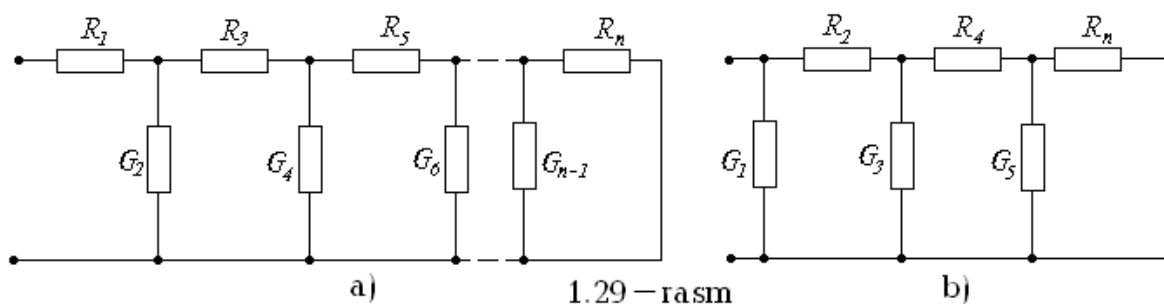
1.28 – rasm

$$R = R_1 + \frac{1}{G_2 + \left(\frac{1}{R_3}\right)}.$$

Shunday qilib, ko'rilayotgan zanjir kirish qarshiligi zanjirsimon kasr ko'rinishida tasvirlanadi, bunda a_1, a_2, a_3 lar tegishli R_1, R_2, R_3 lardir. Xuddi shunday o'zgartirishlardan foydalanib, narvonsimon zanjir kirish qarshiligini zanjirsimon kasr ko'rinishida ifodalaymiz (1.29- rasm, a):

$$R = R_1 + \frac{1}{G_2 + \frac{1}{R_3 + \frac{1}{G_4 + \dots + \frac{1}{G_{2n+2} + \frac{1}{R_{2n-1} + \frac{1}{G_{2n}}}}}}}$$

Narvonsimon zanjir shoxobchalarining tashkil etuvchilari ($R_1, R_3 \dots R_n$) va ikki qutblik ko'ndalang shoxobchalariga kiruvchi ($G_2, G_4, G_6, \dots, G_{n-1}$) lardir. Agar narvonsimon zanjirlarning ko'ndalang shoxobchasi to'g'ridan-to'g'ri tashqi qismlarga ulansa (1.29-rasm, b), unda zanjirsimon kasr kirish o'tkazuvchanlik ko'rinishida yoziladi:



$$G = G_1 + \frac{1}{R_2 + \frac{1}{G_3 + \dots + \frac{1}{R_{2n-2} + \frac{1}{G_{2n-1} + \frac{1}{R_{2n}}}}}}$$

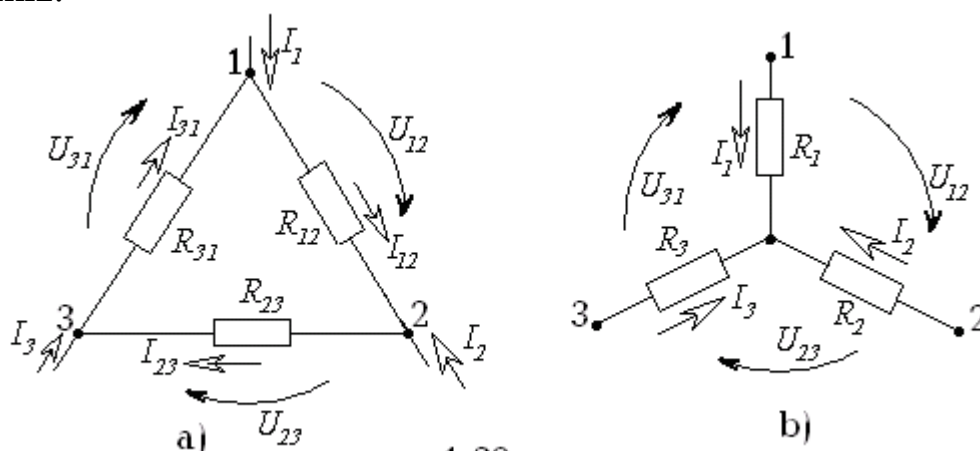
1.10.4. Qarshiliklar uchburchagini qarshiliklar yulduziga va aksincha ekvivalent o'zgartirishlar

Murakkab zanjirlarni hisoblashda sxemadagi qarshiliklar uchburchagini qarshiliklar yulduziga yoki aksincha ekvivalent o'zgartirilganda zanjir ancha soddalashadi. Quyida shu o'zgartirishlar mohiyati keltirilgan.

Qarshiliklar uchburchagini unga ekvivalent bo'lgan qarshiliklar yulduziga o'zgartirish zanjirning uchburchak sxemasi bo'yicha ulangan qismini yulduz sxemada ulangan qism bilan almashtirish bo'lib, bu holda zanjirning qolgan qismlarida tok va kuchlanishlar o'zgarmay qoladi. 1.30-rasmda passiv ideal ikki qutbliklarning uchburchak va yulduz ulangan sxemalari keltirilgan. Bu ikkita elektr zanjiri bo'laklarining o'zaro ekvivalentlik shartlarini aniqlaymiz. Ta'rifga asosan, agar sxemalar o'zgartirilganda tugunlardagi I_1, I_2, I_3 toklar va shu tugunlararo U_{12}, U_{23}, U_{31} kuchlanishlar o'zgarmay qolsa, u holda bu zanjir bo'laklari o'zaro ekvivalent bo'ladi. Uchta kuchlanishlardan faqat ikkitasi o'zaro bog'liq bo'lganligi uchun uchinchi kuchlanishlar muvozanat tenglamasiga ko'ra aniqlash mumkin.

Uchburchak sxema qarshiliklarini yulduz sxema qarshiliklariga ekvivalentlash uchun birinchi zanjir qismlari orasidagi uchta kuchlanishdan har qanday ikkitasi ikkinchi zanjirning mos qismlari orasidagi kuchlanishga teng deb olinadi (bu holda tashqi qismlarga keluvchi toklar qiymati o'zgarmay qoladi).

Uchburchak tomonlari R_{12}, R_{23}, R_{31} qarshiliklaridagi toklarni tugunga keluvchi I_1, I_2, I_3 toklar orqali aniqlaymiz. Kirxgof qonunlariga asosan zanjirga tegishli quyidagi elektr muvozanati tenglamalari sistemasini tuzamiz:



1.30 – rasm

$$I_1 + I_{31} - I_{12} = 0, I_2 + I_{12} - I_{23} = 0, R_{12}I_{12} + R_{23}I_{23} + R_{31}I_{31} = 0.$$

Bu tenglamalarni I_{12}, I_{23}, I_{31} toklarga nisbatan yechamiz.

$$\begin{aligned} I_{12} &= (R_{31}I_1 - R_{23}I_2) / (R_{12} + R_{23} + R_{31}), \\ I_{23} &= (R_{12}I_2 - R_{31}I_3) / (R_{12} + R_{23} + R_{31}), \\ I_{31} &= (R_{23}I_3 - R_{12}I_1) / (R_{12} + R_{23} + R_{31}). \end{aligned} \quad (1.5)$$

(1.5) tenglamalardan foydalanib, uchburchak sxema kuchlanishlarini topamiz:

$$U_{12} = R_{12}I_{12} = R_{12}(R_{31}I_1 - R_{23}I_2) / (R_{12} + R_{23} + R_{31}),$$

$$U_{23} = R_{23}I_{23} = R_{23}(R_{12}I_2 - R_{31}I_3) / (R_{12} + R_{23} + R_{31}).$$

Yulduz sxemasiga (1.30- rasm, b) tegishli kuchlanishlar $U_{12} = R_1I_1 - R_2I_2$ va $U_{23} = R_2I_2 - R_3I_3$ bo'ladi.

Endi U_{12} va U_{23} kuchlanishlarni o'zaro tenglashtirib, tashqi o'tkazgich simlar orasidagi munosabatlarni aniqlaymiz.

$$\begin{aligned} \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}I_1 - \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}I_2 &= R_1I_1 - R_2I_2, \\ \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}I_2 - \frac{R_{23}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}I_3 &= R_2I_2 - R_3I_3. \end{aligned} \quad (1.6)$$

(1.6) tenglamalar tashqi o'tkazgich simlardagi har qanday toklarda bajarilishi shart. Bu tenglamalarda avval $I_2 = 0$, keyin esa $I_3 = 0$ deb olib, qarshiliklar orasidagi bog'lanish formulasini topamiz. Bu holda zanjir bo'laklari o'zaro ekvivalent bo'ladi:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \quad R_2 = \frac{R_{12}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; \\ R_3 &= \frac{R_{23}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Berilgan R_{12}, R_{23}, R_{31} qarshiliklar bo'yicha yulduz sxema uchun R_1, R_2, R_3 qarshiliklarni hisoblaymiz. Buning uchun qarshiliklar uchburchagini unga ekvivalent qarshiliklar yulduziga o'zgartiramiz. 1.30- rasmdan ko'rinib turibdiki, bunday o'zgartirishda zanjirdagi R_{12}, R_{23}, R_{31} qarshiliklardan iborat kontur o'rniga yangi yulduz sxema, ya'ni R_1, R_2, R_3 qarshiliklari birlashtirilgan tugunli sxema paydo bo'ladi.

(1.7) tenglamalar sistemasini R_{12}, R_{23}, R_{31} qarshiliklariga nisbatan yechib, yulduz sxema qarshiliklarini ekvivalent uchburchak sxema qarshiliklari orqali ifodalarini aniqlaymiz:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1R_2}{R_3}, R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2R_3}{R_1}, R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3R_1}{R_2}. \quad (1.8)$$

Yulduzni uchburchakka o'zgartirish sxemasida tugunlar soni kamayadi, ammo zanjirda yangi R_{12} , R_{23} , R_{31} qarshiliklardan tuzilgan kontur paydo bo'ladi. (1.8) tenglamalardagi qarshiliklarni o'tkazuvchanliklar bilan almashtiramiz. O'zgartirishlarni bajarib, uchburchak tomonlarini belgilovchi elementlar o'tkazuvchanliklarini aniqlaymiz:

$$G_{12} = \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2 + G_3}, \quad G_{23} = \frac{G_2 G_3}{G_1 + G_2 + G_3}, \quad G_{31} = \frac{G_3 G_1}{G_1 + G_2 + G_3}. \quad (1.9)$$

O'tkazuvchanliklarni aniqlash formulalari (1.9) yulduz sxema qarshiliklarini aniqlash formulalari (1.7) ning strukturasi bilan bir xildir. Xuddi shunday yulduz sxema nurlari o'tkazuvchanliklari (G_1 , G_2 , G_3) ni aniqlash struktura jihatidan (1.8) tenglamalarga o'xshaydi. (1.9) tenglamalarga asoslanib n nurli yulduzni n tomonli ko'pburchakka o'zgartirish tenglamasini yozamiz:

$$G_{kl} = G_k G_l / G_1 + G_2 + \dots + G_N.$$

G_{kl} - n tomonli ko'pburchak bir tomonining o'tkazuvchanligi, ya'ni k va l tugunlarni birlashtiruvchi tomonning o'tkazuvchanligi, $G_1, G_2 \dots G_n$ - yulduz nurlarini tashkil etuvchi elementlar o'tkazuvchanligi.

n tomonli ko'pburchakni n nurli yulduzga aylantirish umumiy holda mumkin emas.

Yuqorida keltirilgan o'zgartirishlar ko'p hollarda zanjir tahlilini ancha soddalashtiradi, xususiyl hollarda esa bu o'zgartirishlar murakkab zanjir bo'laklarini soddalashtirishga olib keladi.

1.10.5. EYK va tok manbaiga ega bo'lgan parallel shoxobchalarni ekvivalent o'zgartirish

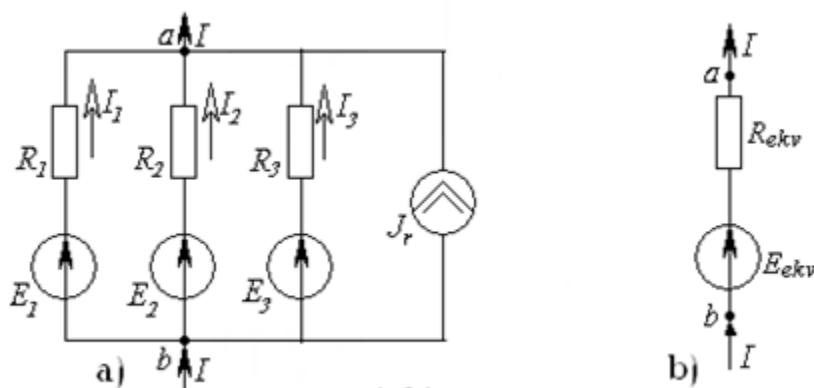
Murakkab elektr zanjirlarini hisoblashda EYK, tok manbai va qarshiliklari bo'lgan bir nechta parallel ulangan shoxobchalarni bitta ekvivalent shoxobcha bilan almashtirish jiddiy yengilliklarga olib keladi. Agar tok I ning har qanday qiymatida a , b qismlardagi kuchlanish U_{ab} ikkala sxemada bir xilda qolsa, u holda 1.31- rasm, b da keltirilgan zanjir 1.31-rasm, a da tasvirlangan zanjirga ekvivalent bo'ladi. R_{ekv} va E_{ekv} qanday qiymatlarga teng bo'lishini aniqlash uchun ikkala sxema uchun quyidagi tenglamalar tuzamiz:

$$\begin{aligned}
I_1 + I_2 + I_3 + J_r + J_s &= I_{ekv}, \\
I_1 &= (E_1 - U_{ab})/R_1 = (E_1 - U_{ab})G_1, \\
I_2 &= (E_2 - U_{ab})/R_2 = (E_2 - U_{ab})G_2.
\end{aligned}$$

.....

$$I_n = (E_n - U_{ab})G_n.$$

Demak:
$$I = \sum_{k=1}^n G_k E_k + \sum_{k=1}^q I_k - U_{ab} \sum_{k=1}^n G_k, \quad (1.10)$$



1.31 - rasm

bu yerda n - EYK manbai shoxobchalar soni, q - tok manbai ulangan shoxobchalar soni.

1.31-rasm, b uchun quyidagi tenglamalarni yozamiz:

$$I = E_{ekv} G_{ekv} - U_{ab} G_{ekv} = (E_{ekv} - U_{ab}) G_{ekv}. \quad (1.11)$$

1.31- rasm, a va b lardagi toklar tengligi I tok va U_{ab} kuchlanishning har qanday qiymatlarida bajarilishi kerak, bu faqat (1.10) tenglamadagi U_{ab} ning koeffitsiyenti (1.11) tenglamadagi U_{ab} ning koeffitsiyentiga teng bo'lgandagina bajariladi, ya'ni:

$$G_{ekv} = \sum_{k=1}^n G_k. \quad (1.12)$$

Agar (1.10) va (1.11) tenglamalardagi U_{ab} ga tegishli hadlar va toklar mos ravishda o'zaro teng bo'lsa, unda ekvivalentlik shartidan:

$$\sum_{k=1}^n G_k E_k + \sum_{k=1}^q J_{TM} = G_{ekv} E_{ekv} \quad (1.13)$$

bo'ladi.

(1.13) ifodadan E_{ekv} quyidagicha hisoblanadi:

$$E_{ekv} = \frac{\sum_{k=1}^n G_k E_k + \sum_{k=1}^q J_{TM}}{\sum_{k=1}^n G_k}. \quad (1.14)$$

(1.12) formula orqali ekvivalent o'tkazuvchanlik G_{ekv} ni aniqlash va u orqali R_{ekv} ni hisoblash mumkin (1.31- rasm, b).

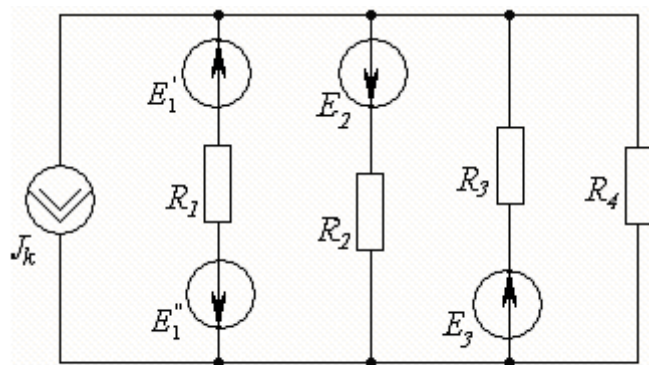
(1.14) formuladan quyidagilar kelib chiqadi: agar biron bir shoxobchada EYK manbai bo'lmasa, u holda bu shoxobcha o'tkazuvchanligi (1.14) formulaning maxrajida bo'ladi, agar biror shoxobchada EYK manbaining yo'nalishi 1.31- rasm, a da ko'rsatilganidan teskari bo'lsa, u holda shu EYK ga tegishli had (1.14) formula suratiga manfiy ishora bilan kiradi.

1.31- rasm, a va b dagi shoxobchalar o'zaro ekvivalentdir.

Masala. 1.32- rasmda keltirgan zanjirni ekvivalent shoxobcha bilan almashtiring! Berilgan: $E_1' = 12\text{ V}$; $E_1'' = 24\text{ V}$; $E_2 = 36\text{ V}$; $E_3 = 48\text{ V}$; $R_1 = 2\ \Omega$; $R_2 = 4\ \Omega$; $R_3 = 10\ \Omega$; $R_4 = 5\ \Omega$; $J_k = 6\text{ A}$.

Yechish. 1. O'tkazuvchanliklarni aniqlaymiz:

$$G_1 = \frac{1}{2} = 0,5\text{ S}; \quad G_2 = \frac{1}{4} = 0,25\text{ S}; \quad G_3 = \frac{1}{10} = 0,1\text{ S}; \quad G_4 = \frac{1}{5} = 0,2\text{ S}.$$



1.32 – rasm

2. Ekvivalent rezistor qarshiligi:

$$R_{ekv} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n G_k} = \frac{1}{0,5 + 0,25 + 0,1 + 0,2} = 0,95\ \Omega.$$

3. Ekvivalent EYK esa:

$$E_{ekv} = \frac{\sum_{k=1}^n G_k E_k - J_{TM}}{\sum G_k} = \frac{(12 - 24) \cdot 0,5 - 36 \cdot 0,25 + 48 \cdot 1 - 6}{1,05} = \frac{27}{1,05} = 25,7\text{ V}$$

Javob: $R_{ekv} = 0,95\ \Omega$, $E_{ekv} = 25,7\text{ V}$.

1.11. Proporsional kattaliklar usuli

Proporsional kattaliklar usulini bitta manbadan ta'minlanayotgan va qarshiliklari o'zaro aralash ulangan zanjirni hisoblashda qo'llash maqsadga muvofiq.

Hisoblash ketma-ketligi quyidagicha:

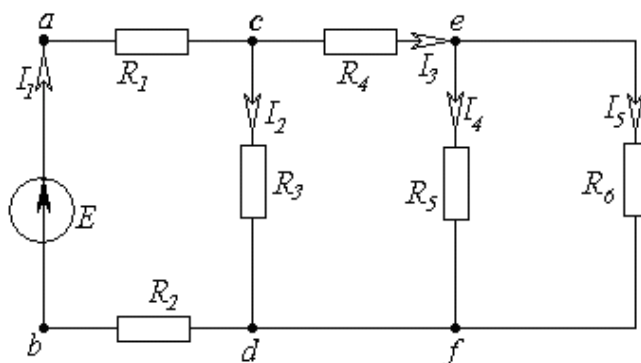
1) manbadan eng uzoqda joylashgan shoxobchadagi tokka ixtiyoriy, masalan 1 A qiymat beriladi;

2) tanlangan shoxobchadagi tok qiymatidan foydalanib, qolgan barcha shoxobchalardagi tok va kuchlanishlar hisoblab topiladi;

3) qayta hisoblash koeffitsiyenti topiladi: u manba EYK ini zanjir qismalaridagi hisoblab topilgan kuchlanishga bo'lgan nisbatiga teng;

4) barcha shoxobchalardagi hisoblab topilgan toklar va kuchlanishlarni qayta hisoblash koeffitsiyentiga ko'paytirib, tok va kuchlanishlarning haqiqiy qiymatlari topiladi.

Masala. 1.33- rasmda keltirilgan zanjir shoxobchalaridagi toklar proporsional kattaliklar usuli yordamida topilsin. $R_1 = R_2 = 3\ \Omega$; $R_3 = 26\ \Omega$; $R_4 = 6\ \Omega$; $R_5 = 4\ \Omega$; $R_6 = 8\ \Omega$; $E = 200\text{ V}$.



1.33 – rasm

Yechish. $I'_5 = 1\text{ A}$ deb qabul qilamiz. Shunga ko'ra, boshqa shoxobchalardagi toklar va kuchlanishlarni quyidagicha hisoblaymiz:

$$U_{ed} = R_6 I'_5 = 8 \cdot 1 = 8\text{ V}, \quad I'_4 = U_{ed} / R_5 = 8 / 4 = 2\text{ A}, \quad I'_3 = I'_5 + I'_4 = 1 + 2 = 3\text{ A},$$

$$U_{cd} = U_{ed} + R_4 I'_3 = 8 + 3 \cdot 6 = 26\text{ V}, \quad I'_2 = U_{cd} / R_3 = 26 / 26 = 1\text{ A},$$

$$I'_1 = I'_2 + I'_3 = 1 + 3 = 4\text{ A}, \quad U_{ab} = U_{cd} + I'_1 (R_1 + R_2) = 26 + 4(3 + 3) = 50\text{ V}.$$

Qayta hisoblash koeffitsiyenti:

$$k = E / U_{ab} = 200 / 50 = 4.$$

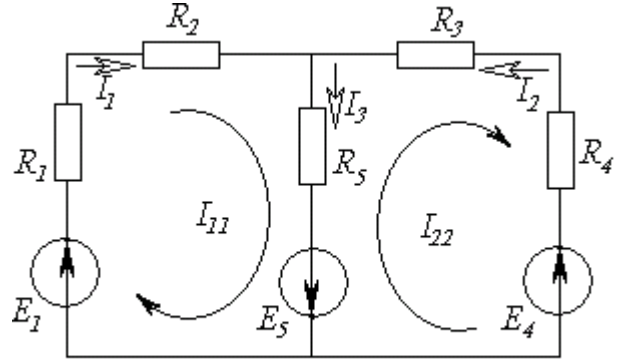
Demak, haqiqiy toklar qiymatlari:

$$I_1 = k I'_1 = 4 \cdot 4 = 16\text{ A}, \quad I_2 = 4 \cdot 1 = 4\text{ A}, \quad I_3 = 4 \cdot 3 = 12\text{ A},$$

$$I_4 = 4 \cdot 2 = 8\text{ A}, \quad I_5 = 4 \cdot 1 = 4\text{ A}.$$

1.12. Kontur toklar usuli

Kontur toklar usulini faqat chiziqli zanjirlar uchun qo'llash mumkin. Bu usul Maksvell tomonidan ishlab chiqilgan bo'lib, unda o'zaro bog'liq bo'lmagan (mustaqil) konturdan yagona kontur toki o'tadi, deb faraz qilinadi va shoxobchalar toki shu kontur toklari orqali aniqlanadi. Kontur toklar usuli - Kirxgof 2-qonuniga asoslanadi. Tenglamalar shu kontur toklariga nisbatan tuziladi va yechiladi. Topilgan kontur toklar asosida esa shoxobchalardagi haqiqiy toklar aniqlanadi. Shunday qilib, kontur toklar usuli asosida tuzilgan tenglamalarda noma'lumlar soni



1.34 - rasmi

o'zaro bog'liq bo'lmagan konturlar soniga teng bo'ladi. Kontur toklar usuli murakkab zanjirdagi mustaqil konturlar soni tugunlar sonidan kam bo'lganda samarali qo'llaniladi.

1.34- rasmda keltirgan sxema uchun tenglamalar tuzamiz. Bu sxemada ikkita bog'liq bo'lmagan kontur mavjud. Bu konturlardan o'tadigan kontur toklar orqali shoxobchalardagi toklarni aniqlash mumkin.

Faraz qilaylik, sxemaning chap konturida soat mili harakati yo'nalishida I_{11} , o'ngdagi konturda esa shu yo'nalishda I_{22} kontur toklari o'tmoqda. Har bir kontur uchun Kirxgof 2-qonuniga asoslanib tenglamalar tuzamiz. Bunda R_5 qarshilikli shoxobchadan ikkala kontur toklar ayirmasi (yoki yig'indisi) o'tishi mumkin. Bunday shoxobcha yondosh shoxobcha deyiladi.

Yondosh shoxobchalardagi haqiqiy toklarni aniqlash uchun kontur toklar yo'nalishi albatta e'tiborga olinishi kerak. Konturlarni aylanib chiqish yo'nalishini ham soat mili bo'yicha olamiz. 1- kontur uchun:

$$(R_1 + R_2)I_{11} + R_5(I_{11} - I_{22}) = E_1 + E_5$$

$$\text{yoki} \quad (R_1 + R_2 + R_5)I_{11} - R_5I_{22} = E_1 + E_5. \quad (1.15)$$

1- kontur uchun:

$$R_5(I_{22} - I_{11}) + (R_3 + R_4)I_{22} = -E_4 - E_5$$

$$\text{yoki} \quad -R_5I_{11} + (R_3 + R_4 + R_5)I_{22} = -E_4 - E_5. \quad (1.16)$$

(1.15) tenglamada I_{11} oldidagi koeffitsiyent birinchi konturga tegishli xususiy qarshiliklar yig'indisidir, uni R_{11} bilan belgilaymiz, I_{22} oldidagi koeffitsiyent esa konturlar orasidagi o'zaro qarshilik, uni R_{12} bilan belgilaymiz. (1.16) tenglamada esa I_{11} oldidagi koeffitsiyentni R_{21} , I_{22}

oldidagi koeffitsiyentni esa R_{22} bilan belgilaymiz. R_{11} , R_{22} - tegishli mustaqil konturlar xususiy qarshiliklari, $R_{12}=R_{21}$ - konturlararo o‘zaro qarshiliklar deyiladi. (1.15) va (1.16) tenglamalar o‘ng tomonini mos ravishda E_{11} va E_{22} bilan belgilaymiz, bunda E_{11} , E_{22} - mos ravishda birinchi va ikkinchi konturdagi EYK lar algebraik yig‘indisi. Agar EYK yo‘nalishi konturni aylanib chiqish yo‘nalishi bilan bir xil bo‘lsa, u *musbat* ishora bilan, aks holda esa *manfiy* ishora bilan olinadi. Bu holatda yuqoridagi tenglamalarni quyidagi shaklda yozish mumkin:

$$R_{11}I_{11} + R_{12}I_{22} = E_{11}, \quad R_{21}I_{11} + R_{22}I_{22} = E_{22},$$

bu yerda:

$$R_{11} = R_1 + R_2 + R_5, \quad R_{22} = R_3 + R_4 + R_5, \quad R_{12} = R_{21} = -R_5,$$

$$E_{11} = E_1 + E_5, \quad E_{22} = -E_4 - E_5.$$

Agar sxemada mustaqil konturlar soni ikkitadan ko‘p, masalan uchta bo‘lsa, u holda tenglamalar sistemasi quyidagi shaklda yoziladi:

$$R_{11}I_{11} + R_{12}I_{22} + R_{13}I_{33} = E_{11},$$

$$R_{21}I_{11} + R_{22}I_{22} + R_{23}I_{33} = E_{22},$$

$$R_{31}I_{11} + R_{32}I_{22} + R_{33}I_{33} = E_{33}.$$

yoki matritsa ko‘rinishida $[R][I] = [E]$,

bunda

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}; \quad [I] = \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{bmatrix}; \quad [E] = \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \end{bmatrix}.$$

Tenglamalar sistemasi yechimida qaysi bir kontur toki manfiy ishorali chiqsa, shu kontur tokining haqiqiy yo‘nalishi dastlab qabul qilinganiga teskari bo‘ladi. Konturlararo qarshilikdan ikkita yondosh kontur toklari o‘tadi.

Shoxobchadagi tok qiymati shu shoxobchadan o‘tadigan kontur toklar bilan aniqlanadi. Masalan, R_5 shoxobchadan I_{11} - I_{22} ayirma tok o‘tadi, bu ayirma tok shoxobchadagi haqiqiy tokdir. Agar elektr zanjirida n ta o‘zaro bog‘liq bo‘lmagan konturlar bo‘lsa, unda n ta mustaqil tenglamalar sistemasi tuziladi. Bunda n ta tenglamalar sistemasining umumiy yechimi quyidagicha bo‘ladi:

$$I_{kk} = \frac{\Delta_{k1}}{\Delta} E_{11} + \frac{\Delta_{k2}}{\Delta} E_{22} + \frac{\Delta_{k3}}{\Delta} E_{33} + \dots + \frac{\Delta_{kn}}{\Delta} E_{nn}$$

bu tenglamada: $\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{vmatrix}$ - sistemaning bosh determinanti,

Δ_{km} – algebraik to‘ldiruvchi bo‘lib, uni hisoblashda Δ determinantdan k -ustun va m - qatorni o‘chiriladi va u $(-1)^{k+m}$ ga ko‘paytiriladi.

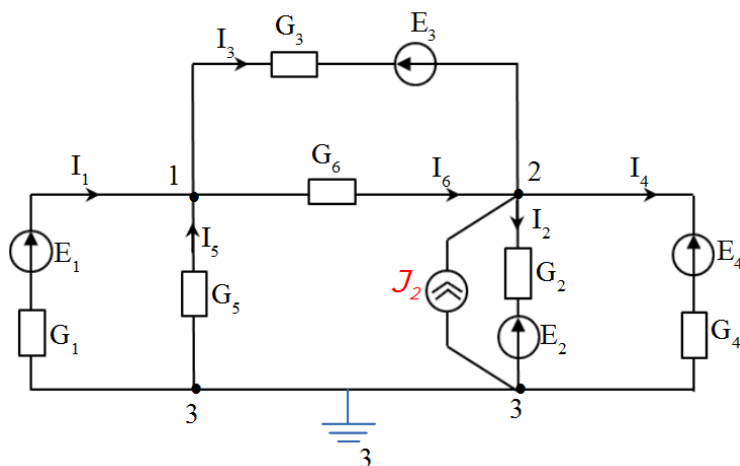
Agar bosh aniqlovchining chap burchagi yuqorisidan o‘ng burchagi pastiga diagonal o‘tkazsak, u determinantni ikki qismga bo‘ladi. Bu determinantning bosh diagonalga nisbatan *simmetriklik xususiyatidir*. Shu simmetriyaga asoslanib, $\Delta_{km} = \Delta_{mk}$ tenglikni yozish mumkin.

1.13. Tugun potentsiallar usuli

Tugun potentsiallar usuli zanjirdagi tugunlar soni mustaqil konturlar sonidan kam bo‘lganda samarali qo‘llaniladi. Bu usulga ko‘ra Kirxgof 1-qonuniga asoslanib, elektr zanjiri tugunlaridagi potentsiallar zanjir *tayanch* tuguniga nisbatan aniqlanadi. *Bunda tayanch tugun potentsiali nolga teng, deb qabul qilinadi*. Ma'lumki, har qanday shoxobchadagi kuchlanish shu shoxobcha ulangan tugunlar potentsiallarining ayirmasiga teng bo‘lib, bu kuchlanishni shu shoxobcha o‘tkazuvchanligiga ko‘paytmasi esa shoxobcha tokiga teng bo‘ladi.

Ushbu usul noma'lum toklarni topishda tugun potentsiallarini aniqlashga asoslanganligi uchun *tugun potentsiallar usuli deb ataladi*.

1.35- rasmda keltirilgan elektr sxemada to‘rtta EYK manbai, bitta tok



1.35- rasm

manbai J_2 , uchta tugun va to'rtta mustaqil kontur mavjud. Bu sxemada uchunchi tugunni tayanch tugun deb qabul qilamiz va uni shartli ravishda yerga ulaymiz. Demak, $\varphi_3=0$. Boshqa tugunlar uchun Kirgof birinchi qonuniga ko'ra shoxobchalardagi toklar yo'nalishini ixtiyoriy olib, quyidagi tenglamalarni tuzamiz:

$$-I_3 - I_6 + I_1 + I_5 = 0;$$

$$-I_2 - I_4 + I_3 + I_6 + J_2 = 0;$$

Shoxobchalardagi toklarni Om qonuniga ko'ra quyidagicha ifodalaymiz:

$$I_1 = (\varphi_3 - \varphi_1 + E_1)G_1 = (-\varphi_1 + E_1)G_1;$$

$$I_2 = (\varphi_2 - \varphi_3 - E_3)G_2 = (\varphi_2 - E_2)G_2;$$

$$I_3 = (\varphi_1 - \varphi_2 - E_3)G_3;$$

$$I_4 = (\varphi_2 - \varphi_3 + E_4)G_4;$$

$$I_5 = (\varphi_3 - \varphi_1)G_5 = -\varphi_1 G_5;$$

$$I_6 = (\varphi_1 - \varphi_2)G_6.$$

Bu ifodalarni avval tuzilgan Kirgof 1-teglamalr sistemasiga qo'yib va ba'zi o'zgartirishlardan so'ng:

$$\varphi_1(G_1 + G_3 + G_5 + G_6) - \varphi_2(G_3 + G_6) = E_1 G_1 + E_3 G_3;$$

$$-\varphi_1(G_3 + G_6) + \varphi_2(G_2 + G_3 + G_4 + G_6) = E_2 G_2 - E_3 G_3 - E_4 G_4 + J_2$$

Hosil bo'lgan tugun potentsiallar tenglamasini quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$\varphi_1 G_{11} - \varphi_2 G_{12} = I_{11};$$

$$-\varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} = I_{22},$$

bunda $G_1 + G_3 + G_5 + G_6 = G_{11}$ - birinchi tugunga ulangan shoxobchalar o'tkazuvchanliklarining yigindisi; $G_2 + G_3 + G_4 + G_6 = G_{22}$ - ikkinchi tugunga ulangan shoxobchalar o'tkazuvchanliklarining yig'indisi; $G_3 + G_6 = G_{12} = G_{21}$ - birinchi va ikkinchi tugunlarga ulangan shoxobchalar o'tkazuvchanliklarining yig'indisi; $E_1 G_1 + E_3 G_3 = I_{11}$ - birinchi tugun tugun toki; $E_2 G_2 - E_3 G_3 - E_4 G_4 - J_2 = I_{22}$ - ikkinchi tugun tugun toki.

Agar manba EYKi ko'rilayotgan tugunga yo'nalgan bo'lsa, u holda EG ko'paytma egishli englamada "+" ishora bilan, aks holda esa "-" ishoda bilan olinadi.

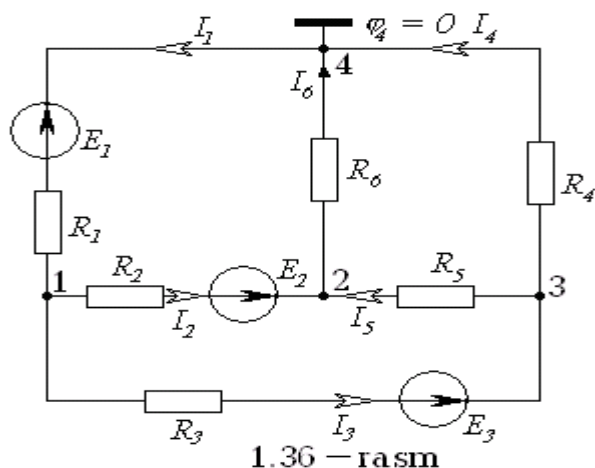
Agar sxema n ta tugunga ega bo'lsa, unga quyidagi $n-1$ tenglamalar sistemasi to'g'ri keladi:

$$\begin{aligned}
&\varphi_1 G_{11} - \varphi_2 G_{12} - \varphi_3 G_{13} - \dots - \varphi_{n-1} G_{1,n-1} = I_{11}; \\
&-\varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} - \varphi_3 G_{23} - \dots - \varphi_{n-1} G_{2,n-1} = I_{22} \\
&-\varphi_1 G_{31} - \varphi_2 G_{32} + \varphi_3 G_{33} - \dots - \varphi_{n-1} G_{3,n-1} = I_{33}. \\
&\dots\dots\dots \\
&-\varphi_1 G_{n-1,1} - \varphi_2 G_{n-1,2} + \varphi_3 G_{n-1,3} - \dots - \varphi_{n-1} G_{n-1,n-1} = I_{n-1,n-1}.
\end{aligned}$$

Mazkur tenglamalar tahlili shuni ko'rsatadiki, agar biron bir tugunga tok manbai ulangan bo'lsa va u shu tugunga kirayotgan bo'lsa, ushbu manba toki tegishli tenglamada "+" ishora bilan, aks holda esa "-" ishora bilan olinadi.

Murakkab zanjirni tugun potentsiallari usulida hisolash tartibi quyidagicha:

- 1) zanjir shoxobchalaridagi toklar musbat yo'nalishi belgilanadi;
- 2) ixtiyoriy tugunning potentsiali no'lga teng deb olinadi;
- 3) boshqa tugunlar uchun potentsiallar tenglamasi tuziladi;
- 4) tugun potentsiallar tenglamalari yechiladi;



5) topilgan potentsiallar EYK va shoxobcha o'tkazuvchanliklari asosida Om qonuni bo'yicha shoxobcha toklari aniqlanadi;

6) aniqlangan toklar Kirxgof qonunlari va quvvatlar balansi bo'yicha tekshiriladi.

Masala. 1.36- rasmda keltirilgan zanjir shoxobchalaridagi toklar tugun potentsiallar usuli

yordamida topilsin.

$E_1 = 6 \text{ V}$, $E_2 = 12 \text{ V}$, $E_3 = 18 \text{ V}$, $R_1 = R_2 = R_3 = 2 \text{ } \Omega$, $R_4 = R_5 = R_6 = 2 \text{ } \Omega$.

Yechish. Shoxobchalardagi toklar yo'nalishlarini ixtiyoriy tanlab olamiz va 4- tugun potentsialini nolga tenglaymiz. Keyin boshqa tugunlar potentsiallari uchun quyidagi tenglamalar sistemasini tuzamiz:

$$\begin{aligned}
\varphi_1 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - \varphi_2 \frac{1}{R_2} - \varphi_3 \frac{1}{R_3} &= -E_1 \frac{1}{R_1} - E_2 \frac{1}{R_2} - E_3 \frac{1}{R_3}, \\
-\varphi_1 \left(\frac{1}{R_2} \right) + \varphi_2 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \right) - \varphi_3 \frac{1}{R_5} &= E_2 \frac{1}{R_2},
\end{aligned}$$

$$-\varphi_1 \frac{1}{R_3} - \varphi_2 \frac{1}{R_5} + \varphi_3 \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right) = E_3 \frac{1}{R_3}.$$

Hosil bo'lgan sistemani shoxobchalar qarshiligi va ulardagi EYK qiymatlarini hisobga olgan holda yechib, tugunlar potentsiallarini topamiz:

$$\varphi_1 = -9 \text{ V}; \quad \varphi_2 = 3 \text{ V}; \quad \varphi_3 = 6 \text{ V}.$$

Shoxobchalardagi toklarni Om qonuni asosida quyidagicha aniqlaymiz:

$$I_1 = (\varphi_4 - \varphi_1 - E_1) \frac{1}{R_1} = (-\varphi_1 - E_1) \frac{1}{R_1} = (9 - 6) \cdot \frac{1}{2} = 1,5 \text{ A},$$

$$I_2 = (\varphi_1 - \varphi_2 + E_2) \frac{1}{R_2} = (-9 - 3 + 12) \cdot \frac{1}{2} = 0,$$

$$I_3 = (\varphi_1 - \varphi_3 + E_3) \frac{1}{R_3} = (-9 - 6 + 18) \cdot \frac{1}{2} = 1,5 \text{ A},$$

$$I_4 = (\varphi_3 - \varphi_4) \frac{1}{R_4} = (6 - 0) \frac{1}{6} = 1 \text{ A},$$

$$I_5 = (\varphi_3 - \varphi_2) \frac{1}{R_5} = (6 - 3) \frac{1}{6} = 0,5 \text{ A},$$

$$I_6 = (\varphi_2 - \varphi_4) \frac{1}{R_6} = (3 - 0) \frac{1}{6} = 0,5 \text{ A}.$$

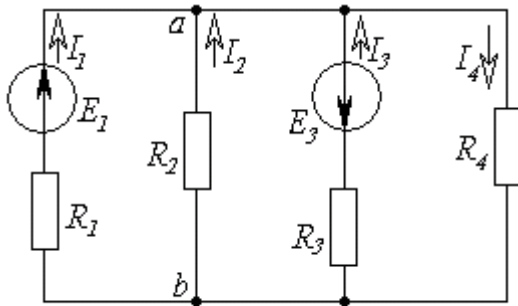
1.14. Ikki tugun usuli

Ba'zi hollarda zanjirda faqat ikkita tugun bo'lib, konturlar soni ko'p bo'ladi (1.37- rasm). Bunday zanjirlarni hisoblash uchun eng qulay bo'lgan usul tugun potentsiallar usulining xususiy holi - ikki tugun usulidan foydalaniladi. Bunda tenglamalar soni $T-1=2-1=1$ tani tashkil etadi.

"b" nuqtani tayanch tugun deb olib, uni shartli ravishda yerga ulaymiz. Bunda faqat "a" nuqtani potensialini aniqlasak, masalani yechish uchun yetarli bo'ladi. Buning uchun parallel ulangan shoxobchalarni bitta ekvivalent manba bilan almashtiramiz. Berilgan sxema uchun *a* va *b* tugunlar orasidagi kuchlanish:

$$U_{ab} = \frac{\sum E_k G_k + \sum I_k}{\sum G_k}.$$

U_{ab} kuchlanishni hisoblaganimizdan keyin har bir shoxobchadagi tokni Om qonuniga binoan topamiz:



1.37 – rasm

$$I_n = G_n(E - U_{ab}),$$

bunda n – parallel shoxobchalar soni.

Masala. 1.37- rasmda berilgan elektr zanjiridagi toklarni ikki tugun usuli yordamida aniqlang va quvvatlar balansini tekshiring. $E_1 = 110$ V, $E_2 = 48$ V, $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 4 \Omega$, $R_3 = 2 \Omega$, $R_4 = 10 \Omega$.

Yechish.

$$U_{ab} = \frac{G_1 E_1 - G_3 E_3}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4} = \frac{0,5 \cdot 110 - 0,5 \cdot 48}{0,5 + 0,25 + 0,5 + 0,1} = \frac{31}{1,35} = 22,96 \text{ V},$$

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1} = \frac{110 - 22,96}{2} = \frac{87,04}{2} = 43,52 \text{ A},$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U_{ab}}{R_2} = \frac{0 - 22,96}{4} = -5,74 \text{ A},$$

$$I_3 = \frac{-E_3 - U_{ab}}{R_3} = \frac{-48 - 22,96}{2} = \frac{-70,96}{2} = -35,48 \text{ A},$$

$$I_4 = \frac{E_4 + U_{ab}}{R_4} = \frac{0 + 22,96}{10} = 2,3 \text{ A}.$$

Quvvatlar balansini tekshirish uchun iste'molchi va manba quvvatlarini hisoblaymiz:

$$P_{ist} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 = 2 \cdot (43,52)^2 + 4 \cdot (-5,74)^2 + 2 \cdot (-35,48)^2 + 10 \cdot (-2,29)^2 = 6489,87 \approx 6490 \text{ Vt},$$

$$P_M = E_1 I_1 - E_3 I_3 = 110 \cdot 43,52 - 48(-35,48) = 6490,2 \text{ Vt}.$$

Demak, $P_M \approx P_{ist}$.

1.15. Ustma-ustlash prinsipi va uni elektr zanjirlarini hisoblashda qo'llash

Ustma-ustlash teoremasi: "Chiziqli elektr zanjirlarida o'zaro bog'liq bo'lmagan bir nechta manbalar umumiy ta'siri alohida olingan har bir manba ta'siri natijalarining algebraik yig'indisiga teng".

Ma'lumki, kontur toklar usuliga binoan elektr zanjirida EYK manbai ta'sirida shoxobchalardan o'tuvchi kontur toklar kontur EYK larining

chiziqli funksiyasidir. Matematik jihatdan bu quyidagi tenglik bilan ifodalanadi:

$$I_k = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^n \Delta_{ik} E_{ii} \quad (1.17)$$

(1.17) tenglamaning fizik ma'nosi shundan iboratki, murakkab chiziqli elektr zanjirining istalgan shoxobchasidagi tok alohida olingan har bir EYK manbaining ta'siridan shu shoxobchasida hosil bo'lgan toklar algebraik yig'indisiga teng.

Bu prinsip *superpozitsiya (ustma-ustlash)* prinsipi deyiladi. Ushbu prinsipga asosan kontur yoki shoxobchadagi toklarni aniqlash usuli *ustma-ustlash usuli* deb ataladi.

Murakkab elektr zanjirini ustma-ustlash usulida hisoblash quyidagi ketma-ketlikda bajariladi:

a) har bir EYK manbai ta'siridan shoxobchalarda hosil bo'lgan xususiy toklar aniqlanadi, bunda fikran sxemada yagona EYK manbai qoldirilib, boshqa EYK lar olib tashlanadi va ularning ichki qarshiliklari zanjirga EYK lar o'rniga ulangan, deb qabul qilinadi;

b) shoxobchalardagi haqiqiy toklar esa alohida hisoblangan xususiy toklar algebraik yig'indisiga teng bo'ladi.

Agar chiziqli zanjirda tok manbalari ulangan bo'lsa, tugunlardagi potensiallar yoki shoxobchalardagi kuchlanishlar har bir tok manbai toklarining chiziqli funksiyasi bo'ladi. Ular matematik ko'rinishda quyidagi formula bilan ifodalandi:

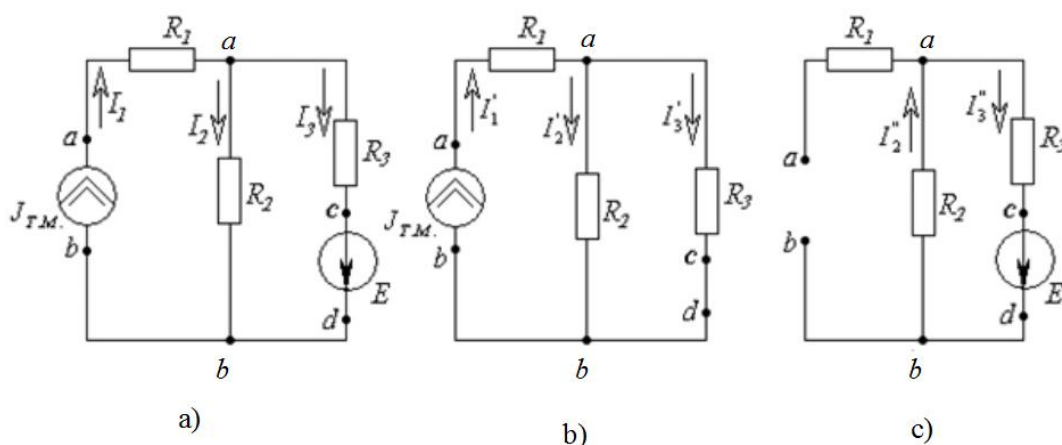
$$\varphi_k(U_k) = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^{q-1} I_i \Delta_{ik}. \quad (1.18)$$

(1.18) formulaning fizik ma'nosi: chiziqli elektr zanjirda har bir tugun potentsiali shu tugunda alohida har bir tok manbaining ta'siridan hosil bo'lgan potentsiallar algebraik yig'indisiga tengdir. Ustma-ustlash usuliga binoan har bir tugun potentsialini aniqlashda fikran bitta tok manbai qoldirilib, qolganlari sxemadan chiqariladi, ularning o'rniga esa tok manbalarining ichki o'tkazuvchanliklari ulangan deb qaraladi (ideal tok manbaida $G_{ich} = 0$ bo'lganligi sababli shoxobcha uzuq qoldiriladi).

Agar murakkab zanjirga bir vaqtda EYK va tok manbalari ulangan bo'lsa, bunda ham ustma-ustlash usulini qo'llash mumkin.

Masala. 1.38- rasmdagi sxema uchun ustma-ustlash usuli yordamida shoxobchalardagi toklarni aniqlang va quvvatlar balansini tekshiring!

Berilgan: $R_1 = 2 \, \Omega$, $R_2 = 4 \, \Omega$, $R_3 = 6 \, \Omega$, $I_{TM} = 5 \, A$, $E = 24 \, V$.



1.38-rasm

Yechish: a) shoxobchalardagi toklar yo‘nalishini ixtiyoriy belgilaymiz, EYK manbaini sxemadan chiqarib tashlab c va d nuqtalarni birlashtiramiz. Chunki, EYK manbaining ichki qarshiligi $r_{ich} = 0$ (1.38-rasm, b). Shu sxema uchun shoxobchalarda tok manbai ta'siridan hosil bo‘lgan xususiy toklarni quyidagicha aniqlaymiz:

$$I_1' = J_{TM} = 5A, \quad I_2' = \frac{U_{ab}}{R_2} = I_1' \frac{R_2 R_3}{(R_2 + R_3)R_2} = 3A, \quad I_3' = \frac{U_{ab}}{R_3} = I_1' \frac{R_2 R_3}{(R_2 + R_3)R_3} = 2A.$$

Endi EYK manbai ta'siridan zanjir shoxobchalaridagi xususiy toklarni aniqlaymiz. Bunda fikran tok manbai sxemadan olib tashlanadi va a va b nuqtalar orasi uzoq qoldiriladi, chunki, tok manbaining ichki o‘tkazuvchanligi $G_{ich} = 0$ ga teng (1.38- rasm, c).

Demak, 1.38- rasm, c uchun:

$$I_1'' = 0; \quad I_2'' = I_3'' = E / (R_2 + R_3) = \frac{24}{10} = 2,4 A.$$

b) ustma-ustlash prinsipidan foydalanib, har bir shoxobchadagi haqiqiy toklarni aniqlaymiz:

$$I_1 = I_1' + I_1'' = 5 + 0 = 5A, \quad I_2 = I_2' - I_2'' = 3 - 2,4 = 0,6A,$$

$$I_3 = I_3' + I_3'' = 2 + 2,4 = 4,4A.$$

a nuqtaning potentsiali:

$$\varphi_a = \varphi_b + R_2 I_2 + R_1 I_1, \quad U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = R_2 I_2 + R_1 I_1 = 4 \cdot 0,6 + 2 \cdot 5 = 12,4V.$$

Tok manbai quvvati:

$$P_{ab} = U_{ab} J_{TM} = 12,4 \cdot 5 = 62,0 \text{ Vt}.$$

EYK manbai quvvati esa

$$EI_3 = 20 \cdot 4,4 = 88 \text{ Vt}.$$

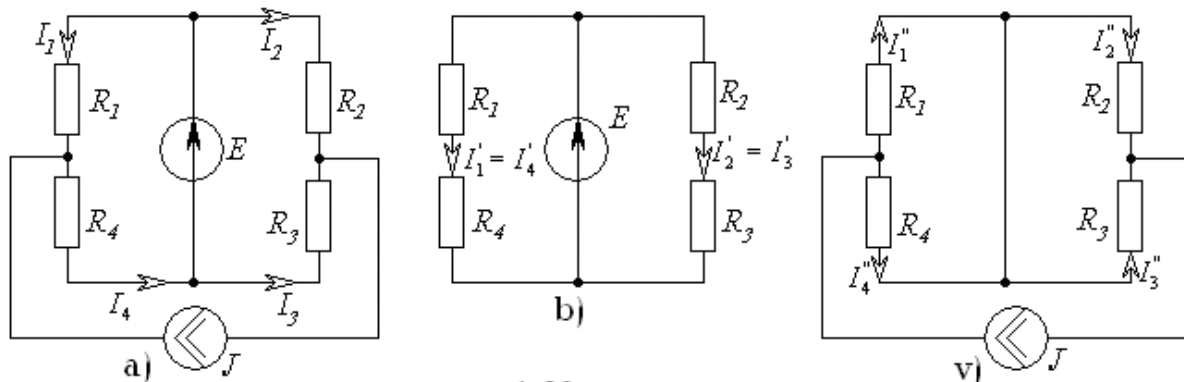
Quvvatlar balansi:

$$P_{ist} = P_{manba} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 = U_{ab} J_{TM} + EI_3.$$

$$P_{ist} = 2 \cdot 25 + 4 \cdot 0,36 + 6 \cdot 19,36 = 50 + 1,44 + 116,16 = 167,6 \text{ Vt},$$

$$P_{manba} = U_{ab} J_{TM} + EI_3 = 12,4 \cdot 5 + 24 \cdot 4,4 = 62 + 105,6 = 167,6 \text{ Vt}.$$

Masala. 1.39- rasmda keltirilgan zanjir shoxobchalaridagi toklar ustma-ustlash usulida aniqlansin! Bunda: $E = 5 \text{ V}$, $J = 1 \text{ A}$, $R_1 = R_2 = 2 \Omega$, $R_3 = R_4 = 3 \Omega$.



1.39 – rasm

Yechish: toklarni aniqlash uchun ikkita alohida zanjir toklarini hisoblash kerak (1.39- rasm, b va v).

$$I'_1 = I'_4 = E / (R_1 + R_4) = 5 / (2 + 3) = 1 \text{ A},$$

$$I'_2 = I'_3 = E / (R_2 + R_3) = 5 / (3 + 2) = 1 \text{ A}.$$

EYK manbai tufayli R_1 va R_4 , R_2 va R_3 qarshiliklar parallel ulangan (1.39-rasm, v). Shu sababli J tok manбайдan shoxobchalarda hosil bo'lgan xususiy toklar R_1 va R_4 yoki R_2 va R_3 lar orqali hisoblanadi:

$$I''_1 = J \frac{R_4}{R_1 + R_4} = 1 \cdot \frac{3}{3 + 2} = 0,6 \text{ A}, I''_4 = J \frac{R_1}{R_1 + R_4} = 1 \cdot \frac{2}{5} = 0,4 \text{ A},$$

$$I''_2 = J \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 1 \cdot \frac{2}{2 + 3} = 0,4 \text{ A}, I''_3 = J \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 1 \cdot \frac{3}{2 + 3} = 0,6 \text{ A}.$$

Berilgan sxema shoxobchalaridagi haqiqiy toklar alohida ajratilgan sxemalar (1.39-,rasm b va v) mos shoxobchalaridagi xususiy toklar algebraik yig'indisiga teng:

$$I_1 = I'_1 - I''_1 = 1 - 0,6 = 0,4 \text{ A}; \quad I_4 = I'_4 + I''_4 = 1 + 0,4 = 1,4 \text{ A};$$

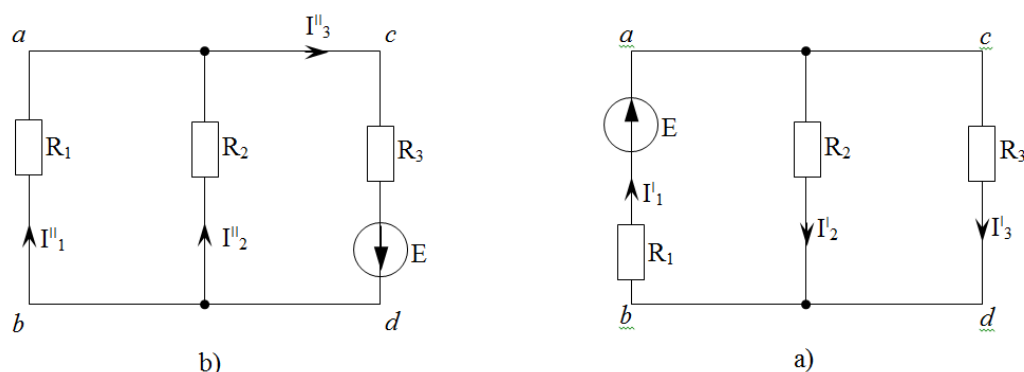
$$I_2 = I'_2 + I''_2 = 1 + 0,4 = 1,4 \text{ A}; \quad I_3 = -I'_3 + I''_3 = -1 + 0,6 = -0,4 \text{ A}.$$

1.16. O‘zarolik xususiyati va uni tarmoqlangan elektr zanjirlarini hisoblashda qo‘llash

O‘zarolik xususiyatini ma’nosi quyidagilardan ibrat:

Agar elektr zanjirining ab shoxobchasidagi EYK shu zanjir passiv cd shoxobchasida I tok hosil qilsa, xuddi shu EYK cd shoxobchaga ulanganda u ab shoxobchada xuddi shunday I tok hosil qiladi.

Bu xossani eng sodda sxema uchun isbotlaymiz.



1.40- rasm

cd shoxobchadagi tok (1.40- rasm, a):

$$I_3'' = \frac{U_{cd}}{R_3} = I_1' \frac{R_2 R_3}{(R_2 + R_3) R_3} = \frac{E}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} = \frac{E R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

ab shoxobchadagi tok (1.40- rasm, b):

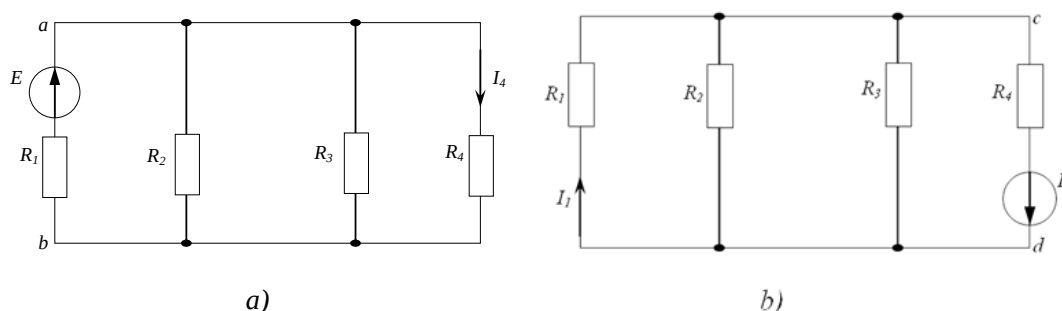
$$I_1'' = \frac{U_{ab}}{R_1} = I_3' \frac{R_1 R_3}{(R_1 + R_2) R_1} = \frac{E}{R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{E R_2}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

Zanjirlarni hisoblashda o‘zarolik xususiyatidan foydalanilganda shoxobchalardagi EYK va toklar yo‘nalishlarini hisobga olish kerak. Masalan, ab shoxobchadagi tok EYK yo‘nalishida bo‘lsa, unda cd shoxobchadagi tok EYK yo‘nalishi bilan bir xil bo‘lishi lozim.

Masala. O‘zarolik xususiyatidan foydalanib, 1.41- rasm, a zanjirdagi I_4 tok aniqlansin! Quyidagilar berilgan: $R_1=R_2=R_3=18 \, \Omega$; $R_4=2 \, \Omega$; $E=48 \, \text{V}$;

Yechish. O‘zarolik xususiyatiga ko‘ra, tarkibida R_1 qarshilik bo‘lgan shoxobchadagi EYK manbai R_4 qarshilikli shoxobchaga ulansa (1.41- rasm, b), unda $I_1=I_4$ bo‘ladi. Shu zanjirni hisobalaymiz. Rezistorlar $R_1=R_2=R_3$ paralel ulangani uchun:

$$R_{123} = \frac{R}{3} = \frac{18}{3} = 6 \, \Omega .$$



1.41-rasm

Zanjir ekvivalent qarshiligi: $R_{ekv} = R_4 + R_{123} = 2 + 6 = 8 \, \Omega$.
 cd shohobchadagi tokni hisoblaymiz:

$$R_{123} = \frac{E}{R_{ekv}} = \frac{48}{8} = 6 \, A.$$

Bu tok R_1, R_2, R_3 qarshiliklari bir-biriga teng bo'lgan rezistordan o'tib, uchta teng qisimga bo'linadi. Shu sababli $I_1 = I_4 = \frac{I}{3} = \frac{6}{3} = 2 \, A$.

1.17. Aktiv ikki qutblik haqida teorema va uni murakkab elektr zanjirlarni hisoblashda qo'llash. Ekvivalent generator usuli

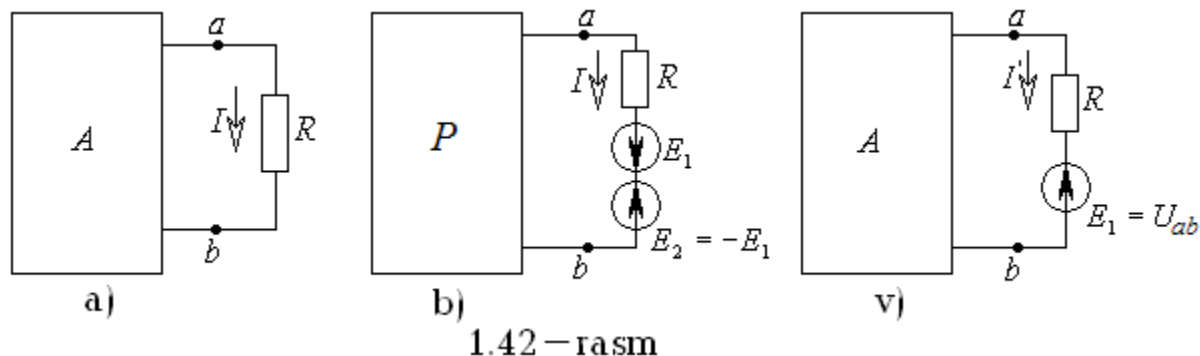
Elektr zanjirlari nazariyasida ikki qutblik tushunchasi keng qo'llaniladi. Har qanday elektr sxemasida fikran biror shoxobchani ajratib olib, sxemaning qolgan elementlarini tartibli ravishda to'rtburchak ichiga joylashtirish mumkin. To'rtburchak ichiga olingan sxema ajratilgan shoxobchaga nisbatan *ekvivalent ikki qutblik* deb ataladi. Demak, ikki qutblik - bu elektr zanjiri sxemasining umumiy nomi bo'lib, u o'zining ikki qismalari (qutblari) bilan ajratilgan shoxobchaga ulanadi.

Agar ikki qutblikda EYK yoki tok manbalari bo'lsa, u holda bunday ikki qutblik *aktiv ikki qutblik deb ataladi* va to'rtburchak ichiga A harfi yoziladi (1.42- rasm, a).

Agar ikki qutblikda EYK yoki tok manbalari bo'lmasa yoki ular o'zaro kompensatsiyalangan bo'lsa, u holda bunday ikki qutblik *passiv ikki qutblik deb ataladi* va to'rtburchak ichiga P harfi yoziladi.

Aktiv ikki qutblik (Ekvivalent EYK manbayi) haqida teorema: agar chiziqli elektr zanjirining istalgan mn shoxobchasiga nisbatan uning qolgan qismi EYKi ajratilgan mn shoxobcha qismalaridagi salt ish rejimi

kuchlanishiga, ichki qarshiligi esa shu shoxobcha uzilgan holatda m va n qismalari orasidagi passiv elektr janjirining kompleks qarshiligiga teng bo'lgan aktiv ikki qutblik(ekvivalent EYK manbayi) bilan almashtirilsa, mn shoxobchadagi tok o'zgarishsiz saqlanadi.



Ushbu teoremaga ko'ra ajratilgan shoxobchaga nisbatan ikki qutblikli elektr zanjirini hisoblashda ikki qutblikni ekvivalent generator bilan almashtirib, uning EYKi ajratilgan shoxobchaning qismalaridagi salt rejimdagi kuchlanishga, ichki qarshiligi esa ikki qutblikning kirish qarshiligiga teng qilib olinadi.

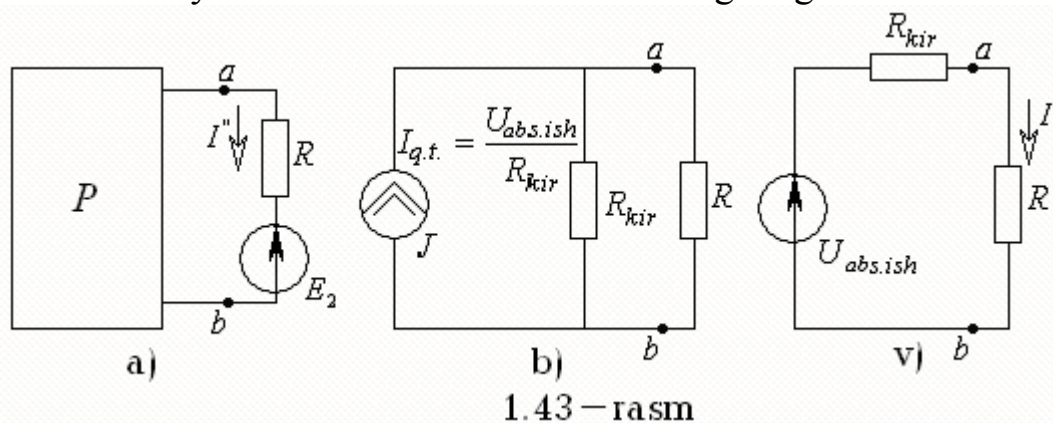
Masalan, berilgan zanjir ab shoxobchasidagi tok aniqlanishi kerak bo'lsin (1.42- rasm, a). Buning uchun zanjirning qolgan qismini fikran to'rtburchak ichiga olib hamda bu sxemadagi EYK va qarshiliklarni ekvivalent parametrlar bilan almashtiramiz. Agar ab shoxobchaga qiymati bir xil va o'zaro teskari yo'nalgan ikkita E_1 va E_2 EYK manbalarini ulasak, u holda shu shoxobchadan o'tayotgan tok qiymati o'zgarmaydi (1.42- rasm, b). Superpozitsiya prinsipiga asosan shoxobcha tokini ikkita I' va I'' toklar yig'indisidan iborat, deb qaraymiz. Tok I' E_1 EYK manbai orqali o'tadi. Shu sababdan I' va I'' toklarni aniqlashda 1.42- rasm, v va 1.43- rasm, a lardan foydalanamiz.

Passiv ikki qutblik sxemasida barcha EYK manbalari olib tashlanadi, ammo bu manbalar ichki qarshiliklari sxemada qoldiriladi. E_1 EYK U_{ab} kuchlanishga teskari yo'nalgan. Zanjirning EYK manbai bo'lgan shoxobchasi uchun Om qonuniga asosan:

$$I' = (U_{ab} - E_1) / R.$$

Endi E_1 EYK qiymatini o'zgartirib, tok I' ifodasini nolga tenglab olamiz. Zanjir ab shoxobchasidagi tokni nolga tenglash, shu shoxobchani uzish bilan ekvivalentdir. *Passiv ikki qutblikning bunday rejimi salt ish rejimi deyiladi.* Salt ish rejimida ab qismalardagi kuchlanishni $U_{ab.s.ish}$, deb

belgilaymiz. Agar E_1 EYKni $U_{ab.s.ish}$ ga teng qilib olsak, unda $I' = 0$ bo'ladi. Umumiy tok esa: $I = I' + I''$. $I' = 0$ bo'lganligi sababli



1.43 – rasm

$I = I''$. I'' tok 1.43- rasm, v dagi sxemaga asosan quyidagicha aniqlanadi:

$$I'' = \frac{E_2}{R + R_{kir}} = \frac{U_{ab.s.ish}}{R + R_{kir}} = I. \quad (1.20)$$

Bu ifodada R_{kir} ikki qutblik ab qismalariga nisbatan kirish qarshiligidir.

(1.20) tenglamaga 1.43- rasm, a dagi ekvivalent sxema mos keladi. Bunday EYK li ikki qutblikni $E = U_{ab.s.ish}$ va qarshiligi R_{kir} ga teng bo'lgan ekvivalent generator bilan almashtirish mumkin. Shuning uchun ham bu usul *ekvivalent generator usuli* deb ataladi. Ba'zi adabiyotlarda bu usul aktiv ikki qutblik yoki salt ish va qisqa tutashish usuli deb ham nomlangan.

Bu usulda tokni aniqlash quyidagi ketma-ketlikda bajariladi:

a) elektr zanjirining R rezistorli shoxobchasidagi tokni aniqlash kerak bo'lganda shu shoxobcha fikran uziladi, uning uzilgan a va b qismalaridagi kuchlanish U_{ab} aniqlanadi;

b) ikki qutublik ichki EYK manbalari qisqa tutashtirilgan holatda ab qismalariga nisbatan kirish qarshiligi R_{kir} hisoblanadi;

v) shoxobchadan o'tayotgan tok quyidagi formula yordamida topiladi:

$$I = U_{ab.s.ish} / (R + R_{kir}). \quad (1.21)$$

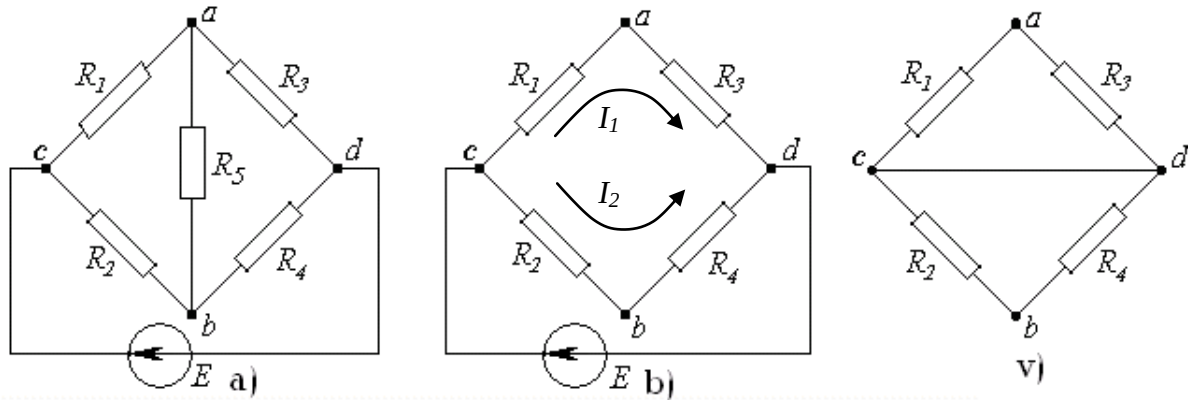
Agar ab shoxobchadagi qarshilikni nolga tenglasak ($R_{ab} = 0$), u holda sxemada qisqa tutashish rejimi sodir etiladi va shoxobchadan o'tuvchi tok qisqa tutashish toki bo'ladi ($I_{q.t}$). (1.21) formulada $R=0$ bo'lganida $I_{q.t} = U_{ab.s.ish} / R_{kir}$, bundan $R_{kir} = U_{ab.s.ish} / I_{q.t}$, (1.22) topiladi.

(1.22) formuladan ko'rinib turibdiki, $U_{ab.s.ish}$ va R_{kir} larni aniqlash uchun tajriba usulidan foydalanish ham mumkin.

Buning uchun ab qismalaridagi salt ish rejimi kuchlanishi $U_{ab.s.ish}$ o'lchanadi va zanjir qisqa tutashish rejimiga o'tkazilib, shoxobchadagi qisqa tutashish toki $I_{q.t}$ aniqlanadi, keyin R_{kir} hisoblanadi:

$$R_{kir} = U_{ab.s.ish} / I_{q.t.}$$

1- masala. 1.44- rasm, *a* da keltirilgan ko‘prik sxemaning *ab* diagonalidagi tok ekvivalent generator usuli yordamida aniqlansin!.



1.44 – rasm

Berilgan: $R_1 = R_4 = 1 \, \Omega$, $R_2 = 4 \, \Omega$, $R_3 = 2 \, \Omega$, $R_5 = 2 \, \Omega$, $E_1 = 10 \, \text{V}$.

Yechish. *ab* shoxobchani uzamiz (1.44- rasm, *b*) va salt ish rejimi uchun U_{ab} kuchlanishni quyidagicha aniqlaymiz:

$$\varphi_a = \varphi_b + R_2 I_2 - R_1 I_1 = \varphi_b + \frac{E}{R_2 + R_4} R_2 - \frac{E}{R_1 + R_3} R_1.$$

$$U_{ab.s.ish} = \varphi_a - \varphi_b = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_3} \right) E = \left(\frac{4}{4+1} - \frac{1}{1+2} \right) 10 \approx 4,67 \, \text{V}.$$

EYK manbalarini fikran qisqa tutashtirilgan holatdagi *ab* qismalariga nisbatan kirish qarshiligini aniqlaymiz (1.44- rasm, *v*), ya’ni bu holatda sxemadagi *c* va *d* nuqtalar o‘zaro qisqa tutashtirilgan bo‘ladi. Shuni hisobga olsak:

$$R_{kir} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4} = \frac{1 \cdot 2}{1+2} + \frac{4 \cdot 1}{4+1} \approx 1,47 \, \Omega.$$

Endi *ab* shoxobchadagi tokni hisoblaymiz:

$$I = \frac{U_{ab.s.ish}}{R_5 + R_{kir}} = \frac{4,67}{2 + 1,47} = \frac{4,67}{3,47} = 1,39 \, \text{A}.$$

2- masala. 1.45- rasm, *a* zanjirdagi I_5 tok ekvivalent generator usulida aniqlansin! Quyidagilar berilgan:

$E_1 = 50 \, \text{V}$; $E_2 = 80 \, \text{V}$; $E_3 = 100 \, \text{V}$; $R_4 = 20 \, \text{Om}$; $R_1 = 10 \, \Omega$;

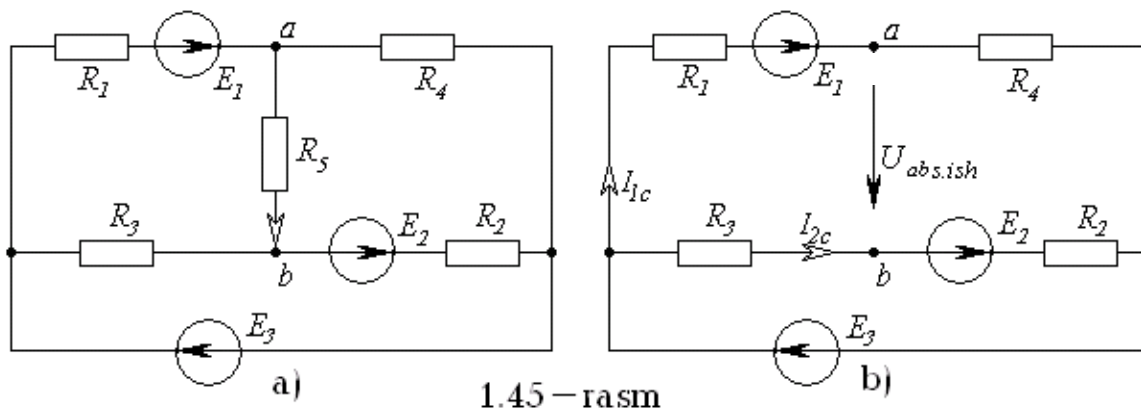
$R_2 = 20 \, \Omega$; $R_3 = 40 \, \Omega$; $R_5 = 20 \, \Omega$.

Yechish: Tokini aniqlash kerak bo‘lgan shoxobchani uzamiz va uzilish nuqtalari *ab* orasidagi $U_{ab.s.ish}$ kuchlanishni aniqlaymiz. Uzilish natijasida hosil bo‘lgan sxema 1.45- rasm, *b* da keltirilgan.

Kirxgofning ikkinchi qonuni asosida:

$$E_3 + E_1 = (R_4 + R_1)I_{1s.ish.}, \quad E_3 + E_2 = (R_3 + R_2)I_{2s.ish.}$$

1.45-rasm, b dagi zanjir shoxobchalaridagi toklarni aniqlaymiz:



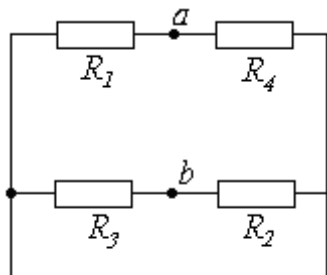
1.45 – rasm

$$I_{1s.ish.} = \frac{(E_3 + E_1)}{(R_4 + R_1)} = \frac{100 + 50}{20 + 10} = 5 \text{ A}, \quad I_{2s.ish.} = \frac{(E_3 + E_2)}{(R_3 + R_2)} = \frac{(100 + 80)}{(40 + 20)} = 3 \text{ A}.$$

2. Salt ish kuchlanishi:

$$U_{ab.s.ish.} = \varphi_a - \varphi_b = E_1 - R_1 I_{1s.ish.} + R_3 I_{2s.ish.} = 50 - 10 \cdot 5 + 40 \cdot 3 = 120 \text{ V}.$$

Uzilgan nuqtalarga nisbatan butun zanjirning kirish qarshiligini aniqlaymiz. Bunda uchala EYK manbalarini fikran qisqa tutashtiramiz (1.46-rasm).



1.46 – rasm

$$R_{kir} = \frac{R_1 R_4}{R_1 + R_4} + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{10 \cdot 20}{10 + 20} + \frac{20 \cdot 40}{20 + 40} = 20 \Omega.$$

3. Izlanayotgan tokni hisoblaymiz:

$$I_5 = \frac{U_{ab.s.ish.}}{R_{kir} + R_5} = \frac{120}{20 + 20} = 3 \text{ A}.$$

1.18. Asosiy topologik tushunchalar va ularni elektr zanjirlarni hisoblashda qo‘llash

Elektr zanjirlarini hisoblashda izlanayotgan elektr kattaliklar va ularning nisbatlarini aniqlash uchun umumiy holda Kirxgof qonunlari asosida tuzilgan tenglamalar sistemasini yechish zarurligi avvalgi paragraflarda ko‘rsatilgan edi.

Agar elektr sxemasi m ta shoxobcha va n ta tugunga ega bo‘lsa, shoxobchalardagi qarshiliklar qiymatlari, kuchlanish va tok manbalari qiymatlari va yo‘nalishlari berilgan bo‘lsa, shoxobchalardagi toklarni hisoblash uchun dastlab Kirxgof 1- qonuniga asoslanib $y = n-1$ ta tugunlar

uchun tenglamalar tuziladi, so'ngra esa Kirxgof 2- qonuni bo'yicha o'zaro bog'liq bo'lmagan konturlar uchun tenglamalar soni $k = m - m_{TM} - (n - 1)$ asosida aniqlanadi va tegishli tenglamalar tuziladi.

Demak, tenglamalar soni shoxobchalar soniga teng bo'ladi. O'zaro bog'liq bo'lmagan konturlar soni k ni aniqlashda va tenglamalar tuzishda elektr zanjiri sxemasini *graf shaklida* ifodalash elektr zanjirlarini hisoblashda ma'lum qulayliklar yaratadi.

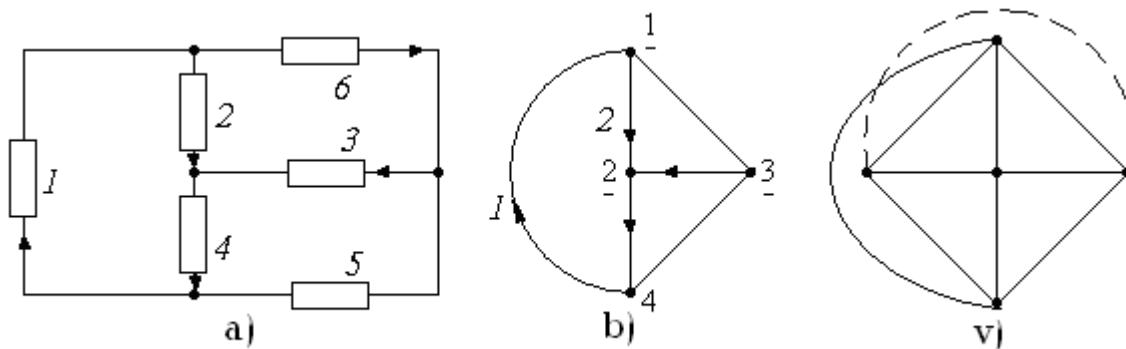
Elektr zanjiri shoxobchalarini o'zaro birlashtirishni chizmada ifodalovchi geometrik struktura *sxemasi grafi* deb ataladi. *Graf - elektr zanjiri sxemasidagi barcha axborotni o'zida mujassamlashtiruvchi geometrik tuzilmadan iborat chizmadir.* Bu chizmada elektr zanjiri shoxobchalari kesma bilan, tugunlar esa nuqta bilan, kuchlanish manbai qisqa tutashgan shoxobcha, tok manbai uzilgan shoxobcha yordamida ko'rsatiladi. Shunday qilib, graf bu ikki xil elementlar tizimidir. Bunday tizimda tugunlar - graf cho'qqisi - nuqta bilan belgilanadi. Shoxobcha - graf qirrasasi - kesma bilan ko'rsatiladi. Bu kesma ikkita tugunni o'zaro birlashtiradi. Elektr zanjiri grafi har xil ko'rinishda bo'lishi mumkin:

a) planar-yassi graf; b) noplanar-fazoviy graf.

Planar graf chizma tekislikligida o'zaro kesishmagan shoxobchalar - kesmalar bilan tasvirlanadi (1.47 - rasm, a, b).

Noplanar grafni chizma tekisligida o'zaro kesishmagan shoxobchalar bilan tasvirlab bo'lmaydi. Unda o'zaro kesishgan kesmalar ham bo'ladi. (1.47- rasm, v).

Agar graf har qanday qismi tayanch (asosiy) graf elementlaridan tashkil topgan bo'lsa, uning bu qismi - *qismaniy graf (podgraf)* deyiladi. Qismaniy graf asosiy grafning ba'zi shoxobchalarini(kesmalarini)olib tashlash natijasida hosil bo'ladi. Qismaniy grafning muhim qismi graf yo'li deb ataladi. U uzluksiz shoxobchalar ketma-ketligidan iborat bo'lib, ikkita tanlangan tugunni bog'lovchisi sifatida oraliqdagi tugunlardan faqat bir marta o'tadi.



1.47 – rasm

Agar berilgan grafda ikkita tugun orasida kamida bitta - yagona graf yo'li bo'lsa, bunday graf *bog'langan graf deb* ataladi. Elektr zanjirlarida bog'langan graf elementlari o'zaro ulangan zanjirni tasvirlaydi. Kirxgof qonunlari asosida berilgan zanjir elektr holati tenglamalarini tuzishda zanjir shoxobchalaridagi tok yo'nalishi graf kesmalarida belgilanadi. Natijada zanjir shoxobchalari yo'naltirilgan grafi hosil bo'lib, bunday graf *yo'naltirilgan graf* deyiladi.

Demak, grafdagi yo'nalishlar elektr zanjiri shoxobchalaridagi toklar yo'nalishlarini ko'rsatadi.

Barcha tugunlarni o'z ichiga olgan graf qismi berk kontursiz bo'lsa, *uni graf daraxti deb* ataladi.

Graf daraxti shoxobchalari - kesmalari elektr zanjiri sxemasidagi tugunlar sonidan bittaga kam bo'ladi, ya'ni $n-1$ ga teng.

Graf daraxti tarkibiga kirmagan shoxobchalar vatarlar yoki *graf daraxtining asosiy shoxobchalari deyiladi*.

Graf daraxti asosiy shoxobchalarining yig'indisi *daraxt to'ldiruvchisi* deb ataladi.

Shunday qilib, elektr zanjirining grafi n ta shoxobchaga, graf daraxti $n-1$ ta shoxobchaga ega bo'lib, daraxt asosiy shoxobchalari soni $m-(n-1)$ ga teng. Bu esa o'zaro bog'liq bo'lmagan konturlar soniga tengdir.

Endi misol tariqasida quyidagi elektr zanjiri sxemasi (1.48- rasm, a) va uning grafini keltiramiz.

1.48-rasm, a dagi sxema grafini har xil ko'rinishda tasvirlash mumkin (1.48- rasm, b da yo'naltirilmagan graf va 1.48- rasm, v, g, larda yo'naltirilgan graflar keltirilgan).

Yo'naltirilgan graf (1.48- rasm, v) uchun Kirxgof qonunlari bo'yicha quyidagi tenglamalarni yozish mumkin:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0, \quad I_6 - I_3 - I_4 = 0, \quad I_5 - I_1 - I_6 = 0,$$

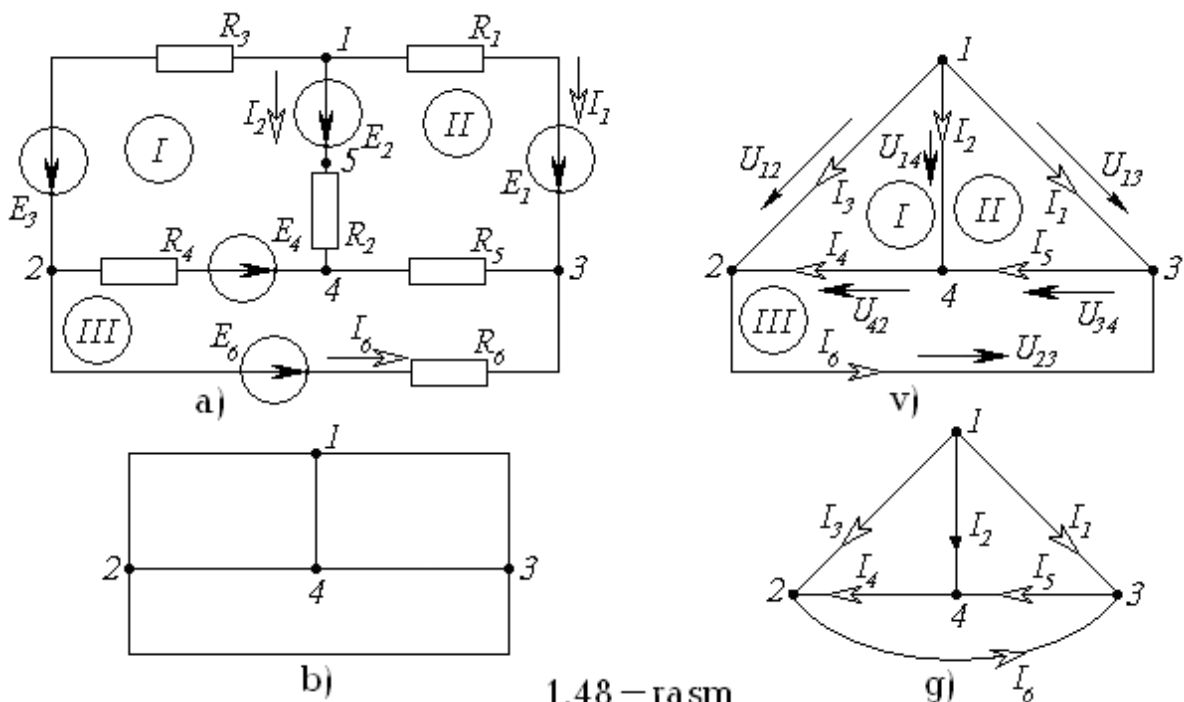
$$U_{14} + U_{42} - U_{12} = 0, \quad U_{13} - U_{23} - U_{12} = 0, \quad U_{23} + U_{34} + U_{42} = 0.$$

So'nggi tenglamalardagi kuchlanishlar quyidagicha aniqlanadi:

$$U_{12} = -E_3 + R_3 I_3, \quad U_{23} = -E_6 + R_6 I_6,$$

$$U_{13} = -E_1 + R_1 I_1, \quad U_{34} = R_5 I_5,$$

$$U_{14} = -E_2 + R_2 I_2, \quad U_{42} = E_2 + R_4 I_4.$$



1.48 – rasm

Nazorat savollari

1. "Nazariy elektrotexnika" fanining maxsus fanlarni o'zlashtirishdagi o'rni haqida so'zlab bering!
2. Elektrotexnika rivojlanishiga chet el olimlarining qo'shgan hissasi nimalardan iborat?
3. O'zbekistonda elektrotexnika rivojlanish bosqichlari haqida gapirib bering!
4. Elektrotexnika rivojlanishiga o'zbekistonlik olimlar qo'shgan hissalar haqida so'zlab bering!
5. Elektr zanjirlarini tavsiflovchi asosiy kattaliklarga nimalar kiradi?
6. Elektr zanjirining asosiy elementlari haqida ma'lumot bering!
7. EYK va tok manbalari nima?
8. Om qonuni mohiyatini tushuntirib bering!
9. Katta toklarda Om qonunining buzilishini izohlang!
10. Potensial diagramma nima va u qanday quriladi?
11. Elektr zanjirlarida quvvatlar balansi nimadan iborat?
12. Kirxgof qonunlarini ta'riflang va mohiyatini tushuntiring!
13. Kirxgof tenglamalari yordamida murakkab zanjirlarni hisoblash ketma-ketligini ayting!
14. Elektr zanjiri sxemalarini ekvivalent o'zgartirishlar deganda nimani tushunasiz?
15. Qarshiliklar uchburchagini qarshiliklar yulduziga ekvivalent o'zgartirish qanday amalga oshiriladi?
16. Qarshiliklar yulduzini qarshiliklar uchburchagiga ekvivalent o'zgartirish qanday amalga oshiriladi?
17. EYK va tok manbaiga ega bo'lgan parallel shoxobchalarni ekvivalent o'zgartirishning o'ziga xos xususiyatlarini aytib bering!
18. Proporsional kattaliklar usulining mohiyati nimadan iborat?
19. Elektr zanjirlarni kontur toklar usuli yordamida hisoblash tartibini ayting!
20. Tugun potentsiallar usulining mohiyati nimadan iborat va u qanday zanjirlarni hisoblashda qulay usul hisoblanadi?
21. Ikki tugun usulining afzalliklarini ayting!
22. Ustma-ustlash prinsipi nima va u qanday zanjirlarni hisoblashda qo'llaniladi?
23. O'zarolik prinsipi mohiyati nima?
24. Aktiv va passiv ikkiqutbliklar xossalarini ayting!
25. Elektr zanjirining kirish va shoxobchalararo o'tkazuvchanligi nima?
26. Ekvivalent generator usuli yordamida zanjirlarni hisoblash tartibini aytib bering!
27. Chiziqli elektr zanjirlarini hisoblash usullarini qiyosiy taqqoslang!

2- BOB. BIR FAZALI SINUSOIDAL TOK CHIZIQLI ELEKTR ZANJIRLARI

2.1. Umumiy ma'lumotlar

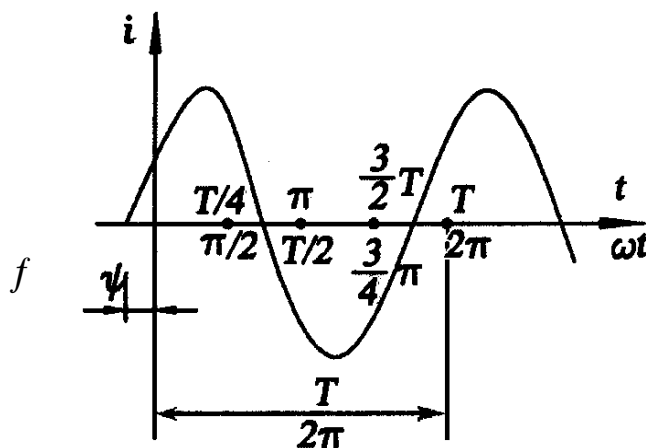
Amaliy elektrotexnikada asosiy rolni o'zgaruvchan tok o'ynaydi. Hozirgi vaqtga kelib deyarli barcha elektr energiyasi o'zgaruvchan tok elektr energiyasi ko'rinishida ishlab chiqariladi. O'zgaruvchan tokni o'zgarmas tokka nisbatan asosiy avzalligi - uni uzatishda kuchlanishni oson va kam isrof bilan o'zgartirish imkoniyatidir. Bundan tashqari, o'zgaruvchan tok generatorlari va motorlari o'zgarmas tok mashinalariga nisbatan tuzilishi sodda, ishlashda ishonchli va narxi arzon.

2.2. Sinusoidal tok va kuchlanishlarning amplitudasi, chastotasi va fazasi

Yo'nalishi va kattaligi davriy ravishda o'zgarib turuvchi EYK, tok va kuchlanish o'zgaruvchan EYK, tok va kuchlanish deyiladi. Vaqt bo'yicha sinusoidal qonun bo'yicha o'zgaruvchan EYK, tok va kuchlanish sinusoidal EYK, tok va kuchlanish deb ataladi. Sinusoidal tok quyidagicha ifodalanadi:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

bunda i - tok oniy qiymati, [A], I_m - tok maksimal (amplituda) qiymati, [A], ω - burchak chastota, [rad/s], ψ_i - boshlang'ich faza – faza ($\omega t + \psi_i$) ning $t = 0$ vaqtdagi qiymati, [grad], 2.1- rasmda sinusoidal tok to'liq diagrammasi keltirilgan.



2.1 - rasm

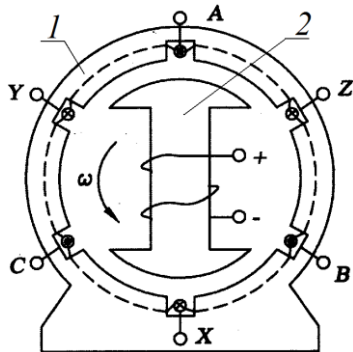
Davr T - bu muayyan vaqt oralig'i bo'lib, tok o'zgarishi takrorlanadi, ya'ni to'liq bitta to'liq o'zgarishi kuzatiladi. Bir sekunddagi davrlar soni chastota deb ataladi: $f = 1/T$, [Hz]. $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ - o'zgaruvchan tok burchak chastotasi.

Sinus argumenti, ya'ni ($\omega t + \psi_i$) kattalik faza deb ataladi. Faza tebranishning oniy t vaqtdagi holatini ifodalaydi. Elektrotexnik qurilmalar uchun kuchlanish chastotasi standartlashtirilgan.

Yevropada va mustaqil davlatlar hamdo'stligi hududlarida 50 Hz, AQSh va Yaponiyada esa 60 Hz qilib olingan. Sanoatda maxsus maqsadlar uchun turli xil chastotali o'zgaruvchan toklardan keng foydalaniladi. Masalan, tezyurar yuritmalarda chastotasi 200 - 400 Hz, elektron qurilmalarda - 500 Hz - 50 MHz va h.k. Radiotexnika, televideniya $3 \cdot 10^{10}$ Hz gacha va sanoat elektronikasining ko'pgina qurilmalarida nisbatan kichik miqdordagi energiyani elektromagnit to'liqlar vositasida simsiz uzatish uchun yuqori chastotali o'zgaruvchan toklar zarur. *Har qanday sinusoidal o'zgaruvchan funksiya uchta kattalik bilan aniqlanadi: amplituda qiymati, burchak chastotasi va boshlang'ich fazasi.* Past chastotali sinusoidal EYK va toklar sinxron generatorlar yordamida hosil qilinadi. Yuqori chastotali sinusoidal EYK va toklar esa yarim o'tkazgichli generatorlar yordamida hosil qilinadi.

2.3. Sinusoidal EYK ni hosil qilish

O'zgaruvchan tokning eng ko'p tarqalgan manbalaridan biri mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantirib beruvchi sinxron generatordir. Sinxron generatorda sinusoidal EYK olish uchun doimiy magnit maydonida ramka ko'rinishidagi chulg'am o'zgaras burchak tezligida aylantiriladi. O'zgaruvchan tok generatorlari ikkita asosiy qismdan iborat (2.2- rasm). Qo'zg'almas qism - stator 1 va aylanuvchi qism - rotor 2 dir. Ularning birida (ko'pincha rotorda) doimiy elektromagnit joylashtiriladi va uning chulg'amlari o'zgaras tok manbaidan ta'minlanadi.



2.2- rasm

Silindrsimon stator ichki yuzasidagi pazlarida joylashgan chulg'amlarda rotor aylanishi natijasida $e = Blv$ EYK paydo bo'ladi, bu yerda B - o'tkazgich simga ta'sir etuvchi magnit maydonining induksiyasi, l - o'tkazgich simning uzunligi, v - aylanuvchi magnit maydonining chiziqli tezligi. Agar l va v kattaliklarni o'zgaras, deb olsak, u holda chulg'amlardagi EYK $e(t)$ ning o'zgarish qonuni magnit induksiyasi B ning vaqt

bo'yicha o'zgarish qonuni bilan aniqlanadi.

EYK egri chizig'ining shakli sinusoidaga yaqin bo'lishi uchun generator rotorida joylashtirilgan qutb boshmog'i chetidagi havo oralig'i uning markaziga nisbatan 1,5 ... 2 marta kattalashtiriladi. Shu sababdan, magnit induksiyaning o'zgarish qonuni stator bilan rotor oralig'ida sinusoidal bo'ladi, qutb boshmoqlari o'rtasida magnit induksiyasi maksimal bo'lib, ular chetiga qarab kamayib boradi. Agar juft magnit

qutblari soni p va rotorning bir minutdagi aylanishlar soni n bo'lsa, u holda o'zgaruvchan EYK chastotasi:

$$f = \frac{pn}{60}.$$

Elektrotexnikada o'zgaruvchan tok keng qo'llanishi elektr energiyasini markazlashgan holda ishlab chiqarish va uni uzoq masofalarga uzatish masalasi hal etilganidan keyin boshlandi.

Energiyani uzatish va taqsimlash iqtisodiy tarafdin hamda xavfsizlik nuqtai nazaridan uzatish uchun yuqori kuchlanishni va taqsimlash uchun esa nisbatan past kuchlanishni talab etadi. O'zgaruvchan tok kuchlanishini o'zgartirish nihoyatda sodda statik apparat - transformator yordamida amalga oshiriladi.

Agar bir xil chastotali bir necha sinusoidal funksiyalar (masalan, EYK va tok) sinusoidalarining boshlanishlari mos kelmasa, u holda bu sinusoidalar faza jihatidan bir biriga nisbatan siljigan deyiladi. Faza siljishi tok va EYK boshlang'ich fazalarining ayirmasi bilan o'lchanadi, ya'ni $\varphi = \psi_i - \psi_e$.

Agar bir xil chastotali sinusoidal funksiyalar boshlang'ich fazalari bir xil bo'lsa, u holda sinusoidalar faza jihatidan mos tushadi. Agar fazalar ayirmasi $\pm \pi/2$ ga teng bo'lsa, u holda sinusoidalar bir biriga nisbatan kvadraturada deyiladi.

2.4. Sinusoidal tok, EYK va kuchlanish ta'sir etuvchi (effektiv) va o'rtacha qiymatlari

Sinusoidal o'zgaruvchan kattalikning juda keng ishlatiladigan qiymati bu uning ta'sir etuvchi qiymatidir. U effektiv yoki o'rtacha kvadratik qiymati deb ham ataladi. Tok ta'sir etuvchi qiymati quyidagicha aniqlanadi:

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2(\omega t + \psi_i) dt} = \sqrt{\frac{I_m^2}{2 \cdot T} \int_0^T [1 - \cos(2\omega t + 2\psi_i)] dt} = \\ &= \sqrt{\frac{I_m^2}{2T} (T - 0)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m. \end{aligned}$$

Demak, sinusoidal tok ta'sir etuvchi qiymati davr mobaynidagi o'rta kvadratik qiymatiga teng va u tok maksimal qiymatining 70,7 foizini tashkil etadi.

EYK va kuchlanishning ta'sir etuvchi qiymatlari mos ravishda $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$, $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ ga teng.

Rezistordan bir xil vaqtda o'tgan sinusoidal va o'zgarmas toklar energiyasining issiqlik energiyasiga aylanish natijasini taqqoslab ko'ramiz. Rezistordan sinusoidal tok o'tganda bir davr ichida ajralayotgan issiqlik miqdori:

$$Q = \int_0^T ri^2 dt = rI_m^2 \frac{T}{2}.$$

Shu vaqt ichida o'zgarmas tok ta'sirida ajralib chiqqan issiqlik miqdori:

$$Q = rI^2 T.$$

Ularni o'zaro tenglab, quyidagini hosil qilamiz:

$$rI_m^2 (T/2) = rI^2 T \text{ yoki } I = I_m / \sqrt{2}.$$

Shunday qilib, sinusoidal tok ta'sir etuvchi qiymati miqdor jihatdan o'zgarmas tokning shunday qiymatiga tengki, unda sinusoidal va o'zgarmas toklar teng vaqt mobaynida rezistordan o'tganda undan ajralib chiqqan issiqlik miqdorlari o'zaro teng bo'ladi. Ko'pchilik (elektromagnit, ferrodinamik, elektrodinamik, issiqlik va h.k. sistemali) o'lchash asboblari sinusoidal kattalik ta'sir etuvchi (effektiv) qiymatini o'lchaydi.

Sinusoidal kattalik amplituda qiymatini ossillograflarda o'lchash yoki ta'sir etuvchi qiymati orqali hisoblab topish mumkin.

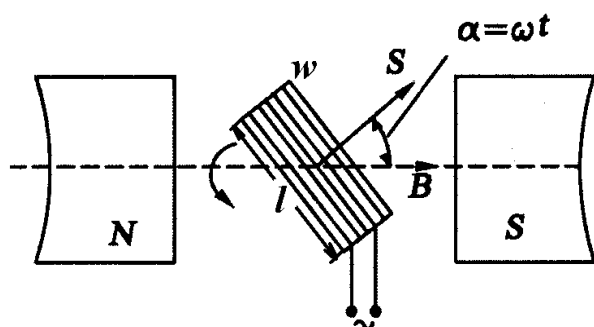
Sinusoidal o'zgaruvchan kattaliklar o'rtacha qiymati deb, uning yarim davr ichidagi o'rtacha qiymati tushuniladi.

Demak, sinusoidal tokning o'rtacha qiymati:

$$I_{o'rt} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_m, \text{ ya'ni sinusoidal tok o'rtacha qiymati}$$

amplituda qiymatining $2/\pi = 0,63$ qismini tashkil qiladi. Sinusoidal EYK va kuchlanishlar uchun ham xuddi shunday tengliklar o'rinli:

$$E_{o'rt} = \frac{2}{\pi} E_m, \quad U_{o'rt} = \frac{2}{\pi} U_m.$$



2.3- rasm

aylanmoqda (2.3- rasm).

Sinusoidal tok o'rtacha qiymatini magnitoelektrik asboba ketma-ket yarim o'tkazgichli diod ulab o'lchash mumkin.

1- masala. Magnit induksiyasi $B = 0,8 \text{ Tl}$ bo'lgan bir jinsli magnit maydonida uzunligi $l = 0,25 \text{ m}$, eni $d = 0,2 \text{ m}$ mis simdan yasalgan ramka $\omega = 314 \text{ 1/s}$ burchak tezlik bilan

Ramkadagi mis simli o‘ramlar soni $w=25$. Ramkada induksiyaning EYK ni ramkaning burchak tezligiga bog‘liqligini aniqlang!

Yechish. Ko‘rilayotgan ramka bir xil sharoitda turgan 25 ta kvadratsimon konturlardan iborat. Binobarin, bitta konturda induksiyanayotgan EYKni aniqlab, keyin uni w ga ko‘paytirish kifoya. Ramka konturida induksiyanadigan EYK ni elektromagnit induksiya qonuniga ko‘ra $e_k = -d\Phi/dt$ formula asosida aniqlaymiz. Buning uchun magnit oqimining vaqt bo‘yicha o‘zgarishini bilish lozim. Ramkaning boshlang‘ich holatida (2.3- rasm) konturni maksimal magnit oqim Φ kesib o‘tadi, ixtiyoriy boshqa holatda esa $\Phi = \Phi_m \cos \alpha = \Phi_m \cos \omega t$.

Binobarin, bir o‘ramdagi EYK:

$$e_k = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d(\Phi_m \cos \omega t)}{dt} = - \Phi_m \omega (-\sin \omega t) = \Phi_m \omega \sin \omega t.$$

Ramkadagi w o‘ramlar uchun esa:

$$e = w e_k = -w \frac{d\Phi}{dt} = w \Phi_m \omega \sin \alpha.$$

Bu tenglamaga berilgan qiymatlarni qo‘yib, $e = f(\omega)$ ni topamiz:

$$e = w \omega B_m l d \sin \omega t = 314 \cdot 25 \cdot 0,8 \cdot 0,25 \cdot 0,2 = 310,8 \sin \omega t \text{ V.}$$

Sinusoidal tok zanjirlari tahlilida amplituda va shakl ko‘effitsiyentlaridan keng foydalaniladi.

Amplituda ko‘effitsiyenti davriy o‘zgaruvchi funksiya amplitudasini uning ta'sir etuvchi qiymatiga nisbati bilan aniqlanadi. Sinusoidal tok uchun:

$$k_\alpha = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2}.$$

Shakl ko‘effitsiyenti davriy o‘zgaruvchan funksiya ta'sir etuvchi qiymatini uning o‘rtacha qiymatiga nisbati bilan aniqlanadi. Sinusoidal tok uchun:

$$k_{III} = \frac{I}{I_{o'rt}} = \frac{I_m / \sqrt{2}}{(2/\pi) I_m} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11.$$

Shunday qilib, agar so‘z davriy o‘zgaruvchan kuchlanish va toklar to‘g‘risida ketsa, u holda odatda ularning ta'sir etuvchi qiymatlari tushuniladi.

Elektrotexnika qurilmalarida juda kichik va katta tok va kuchlanishlar uchraydi. Radiopriyomnik kirishidagi kuchlanish bir necha mikrovolt atrofida bo‘ladi. Elektr uzatish liniyasi simlari orasidagi kuchlanish 500, 750 va 1150 kV larga yetadi. Tranzistorlardagi toklar 1 mA dan ancha

kichik, metallurgiya elektr pechlarida esa tok bir necha yuz kA larga yetadi.

2- masala. $i = 310\sin(314t + \psi_i)$ A tokning $t = 0$ dagi oniy qiymati $i(0) = 269$ A ga teng, ψ_i qiymatini toping! Agar shu tok elektromagnit ampermetr bilan o'lchansa, u holda asbob nechani ko'rsatadi?

Yechish. $t = 0$ da tok ifodasi $i(0) = 310\sin\psi_i = 269,0$ A. Bundan:
$$\psi_i = \arcsin \frac{269}{310} = 60^\circ.$$

Elektromagnit sistemali ampermetr tok ta'sir etuvchi qiymatini ko'rsatadi, ya'ni: $I = I_m / \sqrt{2} = 310 / \sqrt{2} = 220$ A.

3-masala. Ikki juft qutbga ega generator $n = 1500$ ayl/min tezlik bilan aylanmoqda. O'zgaruvchan tok chastotasini aniqlang!

Yechish. $f = \frac{pn}{60} = \frac{2 \cdot 1500}{60} = 50$ Gs.

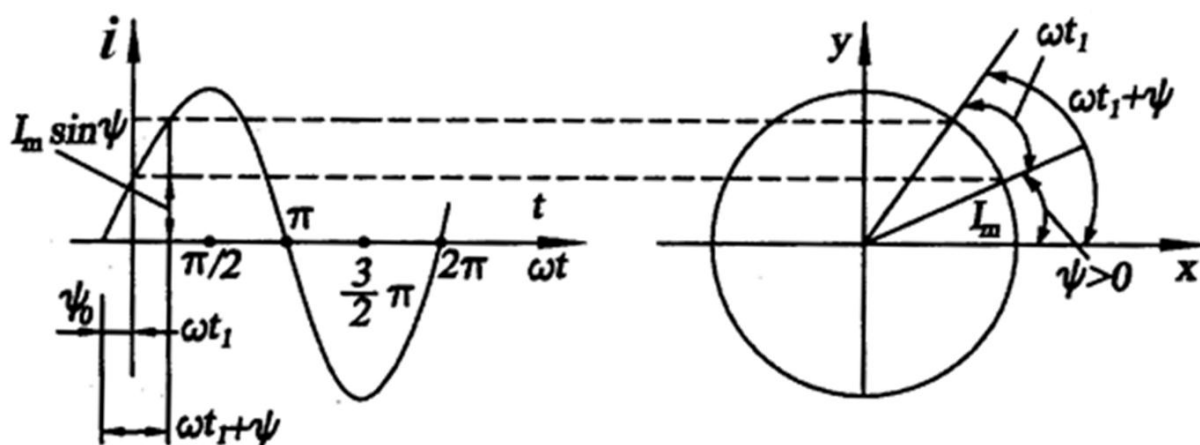
4-masala. Chorvoq GES turbogeneratorlari 250 ayl/min tezlik bilan aylanadi. Chastota $f = 50$ Gs bo'lganda generatorlar juft qutblari sonini aniqlang!

Yechish. $p = 60f / n = 60 \cdot 50 / 250 = 12$.

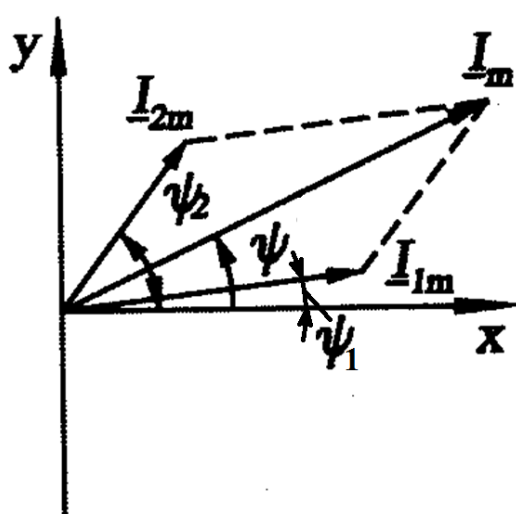
2.5. Sinusoidal kattaliklarni vektorlar bilan tasvirlash

Matematika kursidan ma'lumki, ωt argumentli sinusoidal funksiya soat mili harakatiga qarama-qarshi yo'nalishda ωt radianga buriluvchi birlik radiusni ordinata o'qidagi proyeksiyasi bilan aniqlanadi. Sinusoidal tok i ga soat mili harakatiga teskari yo'nalishda $\omega = \text{const}$ burchak tezlik bilan uzluksiz aylanuvchi I_m radiusli vektor mos keladi. Sinusoidani dekart koordinatalar sistemasida aylanuvchi vektor bilan tasvirlash mumkin (2.4-rasm). $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$ tokni aylanuvchi vektor ko'rinishda tasvirlash uchun uzunligi I_m ga proporsional bo'lgan vektorni absissa o'qiga nisbatan ψ burchak (ψ burchak musbat qiymatga ega bo'lsa, absissa o'qidan soat mili harakatiga teskari yo'nalishda olinadi, manfiy qiymatga ega bo'lsa - aksincha) ostida qo'yiladi va u koordinata boshiga nisbatan soat mili harakatiga qarama-qarshi yo'nalishda ω burchak tezlik bilan aylanib turadi. I_m vektorning istalgan $t = t_1$ vaqtdagi ordinata o'qiga proyeksiyasi sinusoidal tokning shu vaqtdagi oniy qiymatiga teng bo'ladi, ya'ni $i(t_1) = I_m \sin(\omega t_1 + \psi)$.

Sinusoidal funksiyaning aylanuvchi vektor ko'rinishida tasvirlash uchun



2.4- rasm



2.5- rasm

uni xy Dekart koordinatalar tekisligida t Vaqtning istalgan oni uchun, masalan $t = 0$ vaqt uchun tasvirlash kifoya (2.4- rasm).

Sinusoidal kattaliklarni qo'shish yoki ayirishda ularning vektor tasvirlaridan foydalanilsa, amallarni bajarish ancha osonlashadi.

Masalan, $i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$ va $i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \psi_2)$ toklarni qo'shib ko'ramiz. 2.5- rasmda i_1 va i_2 toklar I_1 va I_2 vektorlar ko'rinishida

tasvirlangan. Natijaviy tok $i_1 + i_2 = I_m \sin(\omega t + \psi)$. Amalda, ko'pincha, oniy tokni emas, balki uning ta'sir etuvchi qiymatini bilish zarur bo'ladi. Shuning uchun ham amplituda vektorlari emas, balki ta'sir etuvchi tok vektorlari ustida matematik amallar bajariladi.

2.6. Sinusoidal tok zanjirlarida rezistor, induktiv g'altak va kondensator

O'zgarmas tok zanjirlaridan farqli o'laroq, sinusoidal tok zanjirlarida rezistordan tashqari induktiv g'altak va kondensator kabi elementlardan keng foydalaniladi. Sinusoidal tok zanjirlarida energiyani issiqlik energiyasiga aylantiruvchi elementlar *aktiv qarshiliklar* deb ataladi. Elektr zanjirlarining energiya davriy ravishda elektr yoki magnit maydoni energiyalari ko'rinishida to'planib turuvchi elementlari *reaktiv elementlar*, ularni o'zgaruvchan tokka ko'rsatadigan qarshiliklari esa *reaktiv*

qarshiliklar deb ataladi. Induktiv g'altak va kondensator zanjir reaktiv elementlari hisoblanadi. Ushbu elementlardan tashkil topgan sinusoidal tok zanjirlarini hisoblashdan oldin bu elementlarda tok va kuchlanishlar o'rtasidagi munosabatlarni o'rganib chiqamiz.

2.6.1. Rezistiv elementli sinusoidal tok zanjiri

Rezistiv elementdan tarkib topgan oddiy elektr zanjiri sxemasi 2.6-rasm, a da keltirilgan. Sxemada r - rezistor. Sinusoidal kuchlanish $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ ta'sirida rezistor r dan o'tuvchi tok i Om qonuniga binoan:

$$i = \frac{u}{r} = (U_m / r) \sin(\omega t + \psi_i) = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$$
 ifoda bilan aniqlanadi, bu yerda $I_m = U_m / r$; $\psi_u = \psi_i$.

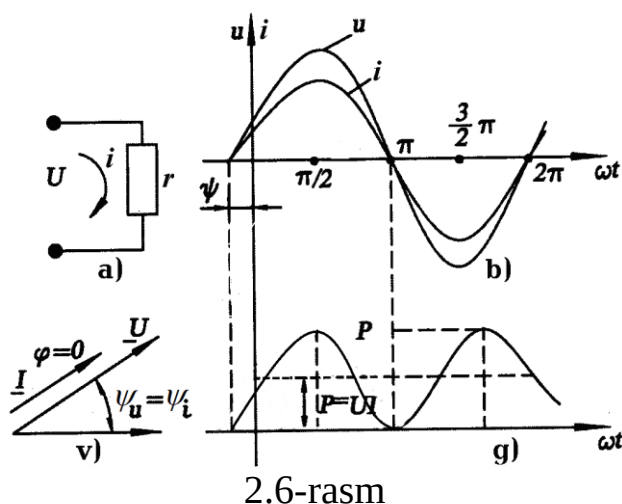
2.6- rasm, b da kuchlanish va tok oniy qiymatlarining to'liq diagrammasi keltirilgan. Demak, rezistiv elementli elektr zanjiridagi tok shakli sinusoidal bo'lib, uning chastotasi va boshlang'ich fazasi manba kuchlanishi chastotasi va boshlang'ich fazasi bilan bir xil bo'ladi. Kuchlanish va tok orasidagi faza siljish burchagi $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$ ga teng

(2.6 - rasm, v).

Rezistiv elementli zanjir uchun Om qonuni kuchlanish va tok ta'sir etuvchi qiymatlari orqali quyidagicha yoziladi:

$$I = U / r.$$

Ushbu zanjir uchun oniy quvvat quyidagi formula yordamida hisoblanadi:



2.6-rasm

$$p = ui = U_m I_m \sin^2(\omega t + \psi_u) = U_m I_m \left[\frac{1 - \cos 2(\omega t + \psi_u)}{2} \right] = UI - UI \cos 2(\omega t + \psi_u).$$

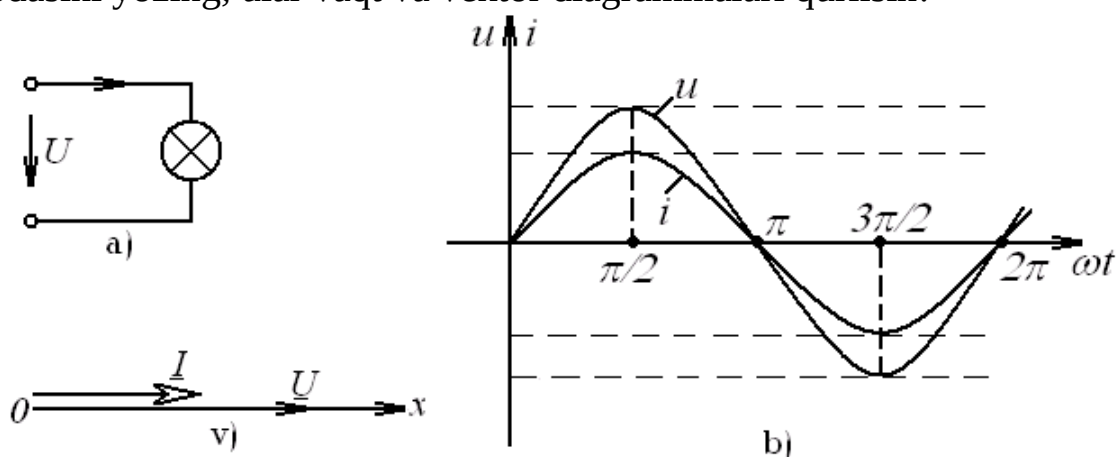
Quvvatning T davrdagi o'rtacha qiymati:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = \frac{1}{T} UI \int_0^T dt - \frac{1}{T} UI \int_0^T \cos 2(\omega t + \psi_u) dt = UI = rI^2 = U^2 / r.$$

Oniy quvvatning o'zgarish grafigi 2.6- rasm, *g* da keltirilgan. Rezistorda oniy quvvat chastotasi kuchlanish va tok chastotasidan ikki marta kattaligi rasmdan ko'rinib turibdi. Rezistiv elementli zanjirda manba quvvati rezistorda issiqlikka aylanib, to'la isrof bo'ladi.

Ma'lumki, o'tkazgich qarshiligi o'zgaruvchan tokda o'zgarmas tokka nisbatan kattaroq bo'ladi. Bunga sirt effekti, uyurmaviy toklar va o'tkazgich atrofiga sochilgan elektromagnit maydon energiyasi sabab bo'ladi.

Masala. Quvvati $P = 100 \text{ Vt}$ bo'lgan cho'g'lanma lampa kuchlanishi $U = 220 \text{ V}$ va chastotasi $f = 50 \text{ Hz}$ bo'lgan manbaga ulangan (2.7- rasm, *a*). Zanjirdan o'tuvchi tok topilsin! Kuchlanish va tok oniy qiymatlari ifodasini yozing, ular vaqt va vektor diagrammalari qurilsin!



2.7- rasm

Yechish. Cho'g'lanma lampa aktiv qarshilik bo'lganligi uchun $P = UI$ ifodadan $I = P/U = 100/220 = 0,45 \text{ A}$.

Kuchlanish va tok oniy qiymatlari quyidagicha yoziladi:

$$u = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \psi_u) = U_m \sin \omega t = \sqrt{2} \cdot 220 \sin \omega t = 310,2 \sin \omega t,$$

$$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \psi_i) = I_m \sin \omega t = \sqrt{2} \cdot 0,45 \sin \omega t = 0,63 \sin \omega t,$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 0 - 0 = 0, U_m = \sqrt{2} \cdot 220 = 310,2 \text{ V}, I_m = \sqrt{2} \cdot 0,45 = 0,63 \text{ A}.$$

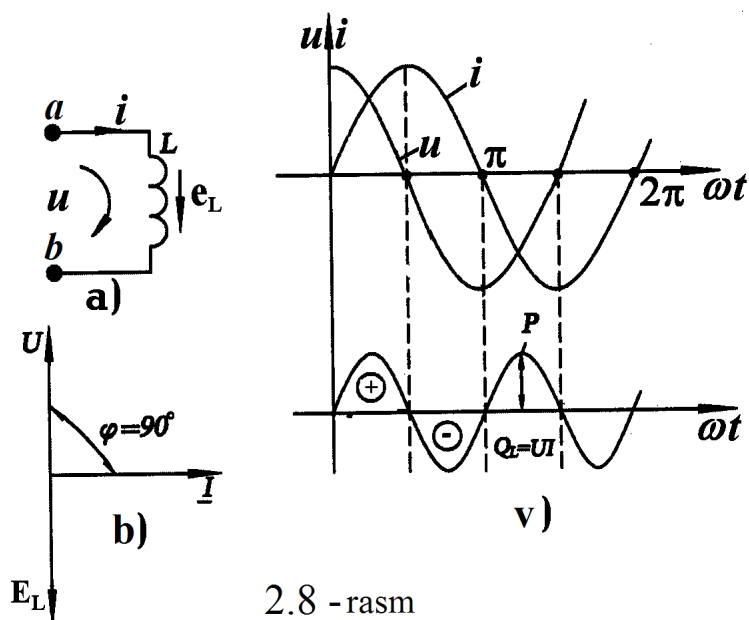
$$\text{Burchak chastotasi } \omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \frac{1}{\text{s}}, \quad \text{Davri } T = 1/f = 1/50 = 0,02 \text{ s}.$$

Sinusoidal kuchlanish va tok grafiklarini qurish uchun masshtab tanlaymiz: $m_u = 100 \text{ V/sm}$ $m_i = 0,3 \text{ A/sm}$ $m_{\omega t} = 60 \text{ grad/sm}$.

$u(\omega t)$, $i(\omega t)$ funksiyalar grafiklarini hamda U va I vektor diagrammasini quramiz (2.7- rasm, *b*, *v*).

2.6.2. Induktiv elementli elektr zanjirda sinusoidal tok. Induktiv qarshilik

Amalda har qanday induktiv g'altak aktiv qarshilik r va induktivlik L ga ega. Induktiv g'altak sxemada ko'pincha ketma-ket ulangan rezistor (aktiv qarshilik) va induktiv element bilan tavsiflanadi. Bu paragrafda,



2.8 - rasm

sxemada faqat induktiv element L ni ajratib olamiz va $r=0$, deb hisoblab, ideal induktiv g'altakdagi jarayonni tahlil qilamiz.

Agar induktiv elementdan $i = I_m \sin \omega t$ tok o'tsa, unda o'zinduksiya hodisasiga asosan EYK hosil bo'ladi (2.8- rasm):

$$e_L = -L(di/dt) = -\omega L I_m \cos \omega t = -\omega L I_m \sin(\omega t - 90^\circ) = -E_m \sin(\omega t - 90^\circ).$$

2.8- rasm, a da EYK e_L ning musbat yo'nalishi strelka bilan ko'rsatilgan; uning yo'nalishi i tok musbat yo'nalishi bilan bir xildir. a va b nuqtalar potentsiallari farqini aniqlaymiz. b nuqtadan a nuqta tomon siljiganimizda o'zinduksiya EYKi e_L ning yo'nalishiga qarama-qarshi harakat qilamiz. Shuning uchun $\varphi_a = \varphi_b - e_L$, bundan $u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = -e_L = L(di/dt)$.

U_{ab} kuchlanish yo'nalishi tokning musbat yo'nalishi bilan bir xil. Induktivlikdagi kuchlanish:

$$u_{ab} = u_L = -e_L = \omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = U_m \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Bu ifodadan $U_m = \omega L I_m$.

ωL ko'paytma x_L deb belgilanadi va induktiv qarshilik deb ataladi, ya'ni: $x_L = \omega L$, uning o'lchov birligi $[x_L] = [\omega] \cdot [L] = [(1/s) \cdot \Omega \cdot s] = [\Omega]$.

Shunday qilib, induktivlik o'zgaruvchan tokka $x_L = \omega L$ ga teng bo'lgan qarshilik ko'rsatadi. U chastotaga to'g'ri proporsional, ya'ni chastota ω oshsa, x_L ko'payadi va aksincha.

Induktiv g'altakda kuchlanish vektori tok vektoriga nisbatan faza jihatidan 90° oldinda yuradi (2.8- rasm, b). O'zinduksiya EYK vektori kuchlanishga nisbatan teskari yo'nalgan.

2.8-rasm, v da i , u , p lar oniy qiymatlarining to'liq diagrammalari keltirilgan. Oniy quvvat:

$$p = ui = U_m \cos \omega t \cdot I_m \sin \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t.$$

Uning grafigi noldan o'tadi, chunki kuchlanish yoki tok noldan o'tganda $p=0$. Davrning birinchi choragida u va i lar musbat bo'lganda p ham musbatdir.

Absissa o'qi va oniy quvvat p egri chizig'i bilan chegaralangan yuza vaqt birligidagi energiya - quvvatdir. Bunda manbadan qabul qilingan energiya magnit maydonini hosil qiladi, ya'ni magnit maydoni energiyasiga aylanadi. Davrning ikkinchi choragida esa, tok zanjirda maksimumdan nolgacha kamayadi, bu holatda magnit maydonining energiyasi manbaga qaytariladi, oniy quvvat esa, manfiy. Davrning uchinchi choragida manbadan yana energiya qabul qilinadi va magnit maydoni hosil bo'ladi, keyingi chorakda esa, manbaga qaytariladi va hokazo, ya'ni energiya davriy ravishda induktiv elementda magnit maydonini hosil qiladi yoki induktiv element energiyani orqaga - manbaga qaytaradi. *Iste'molchi bilan manba o'rtasida bir turdan ikkinchi turga o'tib sarf bo'lmaydigan va manbaga qaytariladigan energiya reaktiv energiya deb ataladi.* Uning quvvati esa, ko'rib chiqilayotgan zanjir uchun induktiv xarakterdagi reaktiv quvvat deyiladi:

$$Q_L = UI = I^2 x_L [\text{var}].$$

Reaktiv quvvat aktiv quvvatdan farqli ravishda Var - volt amper reaktivlarda o'lchanadi.

2.6.3. Rezistor va induktiv g'altakdan iborat zanjir

O'zgaruvchan tok ta'siridagi real induktiv g'altak aktiv va induktiv qarshiliklardan iborat. Induktiv g'altak ekvivalent sxemasi 2.9- rasm, a da keltirilgan.

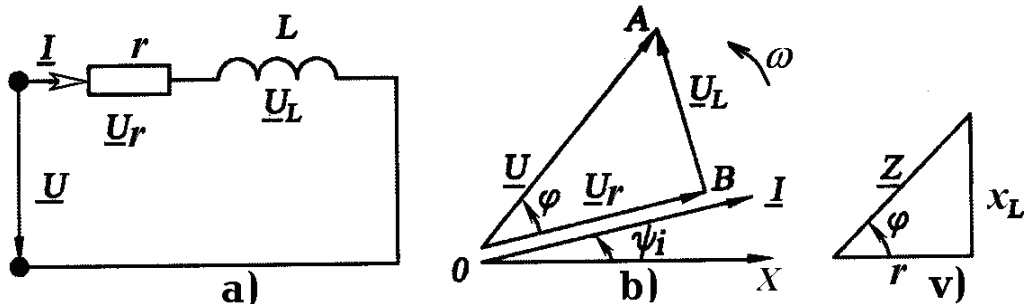
G'altakdan $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ tok o'tmoqda deb, faraz qilaylik. Kirxgofning ikkinchi qonuniga binoan oniy qiymatlar uchun:

$$u = u_r + u_L = ir + L di / dt, \quad (2.1)$$

bunda $u_r = ir = I_m r \sin \omega t$ - induktiv g'altak aktiv qarshiligidagi kuchlanish

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d[I_m \sin(\omega t + \psi_i)]}{dt} = \omega L I_m \cos(\omega t + \psi_i) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ).$$

induktiv qarshilikdagi kuchlanish pasayishi.



2.9 - rasm

Kuchlanishlar ta'sir etuvchi qiymatlari uchun (2.1) ni quyidagicha yozish mumkin: $\underline{U} = \underline{U}_r + \underline{U}_L$.

Tok va kuchlanishlar vektor diagrammasini (2.9- rasm, b) quyidagi ketma-ketlikda quramiz. (x, y) koordinata tekisligida I tok vektorini tasvirlaymiz. Undan keyin aktiv qarshilikdagi kuchlanish $\underline{U}_r$ vektorini quramiz. Bu vektor tok bilan bir xil fazada bo'ladi. $\underline{U}_L$ kuchlanish vektorini tok vektoridan 90° ga ilgarilaydi. Shu vektorlar yig'indisi manba kuchlanishi vektorini beradi va bu vektor tok vektoriga nisbatan φ burchakka ilgarilaydi. Diagrammaga ko'ra:

$$U^2 = U_r^2 + U_L^2 = I^2 r^2 + I^2 x_L^2, \text{ bundan } I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}} = \frac{U}{z},$$

bunda $z = \sqrt{r^2 + x_L^2}$ - zanjir to'la qarshiligi.

2.9- rasm, b da keltirilgan vektor diagrammadagi OAB uchburchak *kuchlanishlar uchburchagi* deb ataladi.

Tok fazasi bilan bir xil bo'lgan kuchlanish tashkil etuvchisi uning *aktiv tashkil etuvchisi* deyiladi: $U_a = U_r = U \cos \varphi = Ir$.

Tok vektoriga perpendikulyar bo'lgan kuchlanish tashkil etuvchisi kuchlanishning *reaktiv tashkil etuvchisi* deyiladi: $U_r = U_L = U \sin \varphi = Ix_L$.

Agar kuchlanishlar uchburchagi tomonlarini tok ta'sir etuvchi qiymatiga bo'linsa, u holda qarshiliklar uchburchagi hosil bo'ladi (2.9- rasm, v). Qarshiliklar uchburchagidagi fazalar siljishi va zanjir parametrlari orasidagi munosabatlarni hosil qilamiz:

$$r = z \cos \varphi, \quad x_L = z \sin \varphi, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{x_L}{r}, \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{x_L}{r}.$$

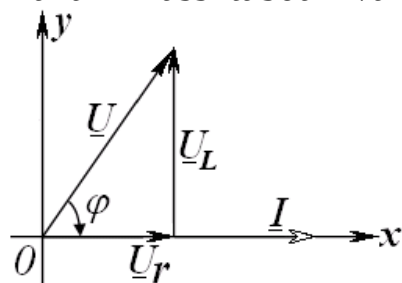
Masala. Kuchlanishi 220 V bo'lgan sanoat chastotali elektr tarmog'iga aktiv qarshiligi 6 Ω va induktivligi 50 mH bo'lgan induktiv g'altak ulangan (2.9- rasm, a). G'altakdan o'tuvchi tok oniy qiymati ifodasini yozing! Induktiv g'altak uchun qarshiliklar uchburchagini, tok va kuchlanishlar vektor diagrammasini quring!

Yechish. G'altak induktiv qarshiligi ($f=50$ Hz):

$$x_L = \omega L = 314 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 15,7 \Omega.$$

G'altakning to'la qarshiligi:

$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{6^2 + 15,1^2} = 16,1 \Omega$. Qarshiliklar uchburchagining katetlari ma'lum masshtabda r va x_L , gipotenuzasi esa z ga teng (2.9- rasm, v).



2.10- rasm

Zanjirdagi tok:

$$I = U/Z = 220/16,1 = 13,1 \text{ A}.$$

G'altak aktiv qarshiligidagi kuchlanish pasayishi: $U_r = Ir = 13,1 \cdot 6 = 78,6 \text{ V}$, induktiv qarshiligidagi kuchlanish pasayishi esa: $U_L = Ix_L = 13,1 \cdot 15,7 = 205 \text{ V}$.

Vektor diagrammani qurish uchun absissa o'qining musbat yo'nalishi bo'yicha ma'lum masshtabda ($m_u = 55 \text{ V/sm}$; $m_i = 3 \text{ A/sm}$) uzunligi 4,33 sm ga teng tok vektorini quramiz (2.10- rasm). Shu vektor boshlanish nuqtasidan unga parallel ravishda belgilangan masshtabda $\underline{U}_r$ kuchlanish vektorini quramiz. $\underline{U}_L$ kuchlanish vektori $\underline{U}_r$ vektori oxiridan tok vektoriga nisbatan 90° ilgarilagan ravishda quriladi. $\underline{U}_r$ vektor boshi bilan $\underline{U}_L$ vektor oxirini birlashtirib $\underline{U}$, kuchlanish vektorini hosil qilamiz. $\underline{I}$ tok va $\underline{U}$ kuchlanish vektorlari orasidagi burchakni o'lchab, $\varphi = -69^\circ$ ni topamiz.

$$\text{Shunday qilib, } i = 13,1 \sqrt{2} \sin(314 - 69^\circ) \text{ A}.$$

2.6.4. Sig'im elementli elektr zanjirdagi sinusoidal tok. Sig'im qarshiligi

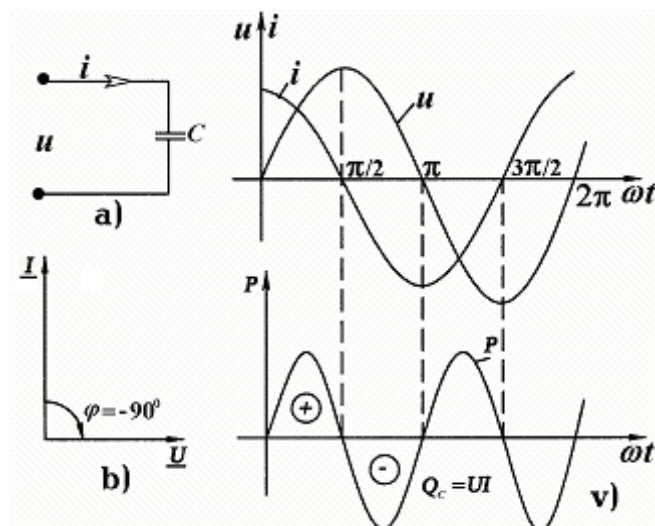
Agar kondensatorga berilgan kuchlanish vaqt bo'yicha o'zgarmasa, unda kondensator qoplamalaridan birida yig'ilgan elektr zaryadi $q = CU$, ikkinchisidagi esa $q = -CU$ bo'ladi, bu yerda C - kondensator sig'imi.

Zaryadlar miqdori o'zgaras bo'lgani uchun kondensatordan tok o'tmaydi, chunki $i = dq/dt = 0$.

Agar kondensatorga (2.11- rasm, a) berilgan kuchlanish vaqt bo'yicha sinusoidal qonuniyat bilan o'zgarsa, ya'ni $u = U_m \sin \omega t$ bo'lsa, u holda undagi zaryad q ham sinusoidal qonun bo'yicha o'zgaradi: $q = Cu = CU_m \sin \omega t$ va kondensator davriy ravishda zaryadlanadi va zaryadsizlanadi. Kondensatorning davriy zaryadlanishi esa zanjirdan mos ravishda davriy tok o'tishiga sabab bo'ladi:

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(CU_m \sin \omega t) = \omega C U_m \cos \omega t = \frac{U_m}{1/\omega C} = I_m \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Bu ifodadan ko'rinib turibdiki kondensatordan o'tayotgan tok faza jihatdan kuchlanishga nisbatan 90° oldinda bo'ladi (2.11- rasm, b). Tok amplituda qiymati kuchlanish amplitudasining sig'im qarshiligiga nisbati bilan aniqlanadi:



2.11-rasm

$$I_m = \frac{U_m}{x_C} = \frac{U_m}{1/\omega C} = U_m \omega C,$$

bu yerda:

$$x_C = \frac{1}{\omega C} \left[\frac{1}{(1/s) \text{ Kl/V}} \right] = \left[\frac{\text{V}}{\text{A}} \right] = [\Omega]$$

- sig'im qarshiligi.

Sig'im qarshiligi chastotaga teskari proporsionaldir, ya'ni chastota oshsa, sig'im qarshiligi kamayadi va aksincha. i , u , p lar oniy qiymatlari grafigi 2.11- rasm, v

da keltirilgan.

Zanjirdagi oniy quvvat:

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \cos \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t.$$

Davrning birinchi choragida kondensator manbadan energiyani qabul qilib o'zida elektr maydoni hosil qiladi. Davrning ikkinchi choragida kuchlanish kondensatorda maksimumdan nolgacha kamayadi va yig'ilgan elektr maydoni energiyasi orqaga - manbaga qaytariladi. Oniy quvvat bu vaqtda manfiy. Davrning uchinchi choragida energiya yana elektr maydoni energiyasi ko'rinishida kondensatorda yig'iladi va keyingi choragida esa, orqaga - manbaga qaytadi va hokazo.

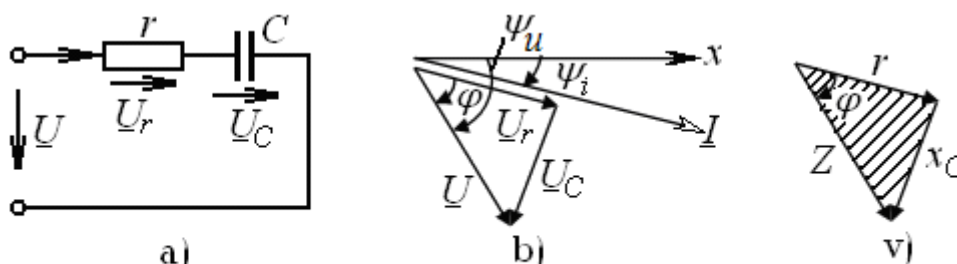
Agar $i = C \frac{du_c}{dt}$ tenglamani integrallasak, u holda quyidagini hosil qilamiz: $u_c = \frac{1}{C} \int i dt$.

Bu tenglama yordamida kondensator kuchlanishini undan o'tayotgan tok orqali aniqlashda foydalaniladi.

2.6.5. Rezistor va kondensatordan iborat zanjir

R va C elementlari ketma-ket ulangan zanjirda (2.12- rasm, a) kirish kuchlanishining ta'sir etuvchi qiymati Kirxgof ikkinchi qonuniga ko'ra $\underline{U} = \underline{U}_r + \underline{U}_C$ ga teng.

Zanjirdan o'tadigan tok $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ va $\psi_i < 0$, deb hisoblab vektor diagrammani quramiz. Tok vektorini absissa o'qiga nisbatan ψ_i burchak ostida manfiy, ya'ni soat strelkasi harakati yo'nalishida quramiz (2.12- rasm, b). Rezistordagi $\underline{U}_r$ kuchlanish vektori $\underline{I}$ tok



2.12 - rasm

vektori bilan faza bo'yicha mos tushadi, kondensatordagi kuchlanish vektori $\underline{U}_C$ $\underline{I}$ vektoridan 90° ga orqada qoladi. Ikkita vektor yig'indisi manba kuchlanishi $\underline{U}$ vektorini hosil qiladi. Bu vektor diagrammadan:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_C^2}} = \frac{U}{Z}, \quad \text{bu yerda } Z = \sqrt{r^2 + x_C^2} - \text{zanjir to'la qarshiligi.}$$

Qarshiliklar uchburchagi 2.12- rasm, v da keltirilgan.

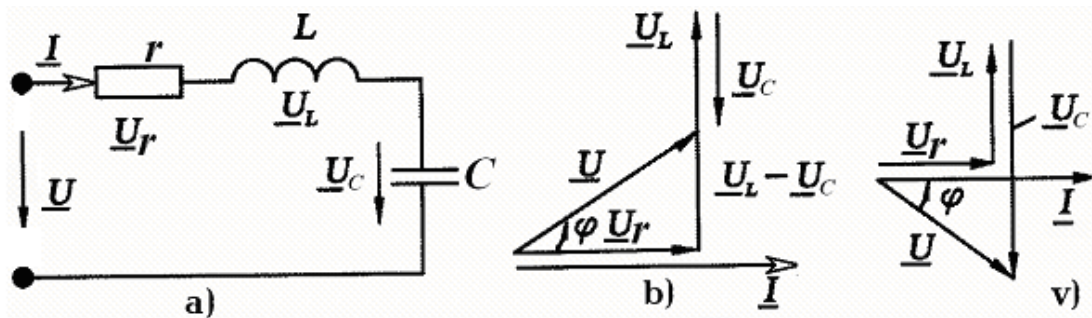
Zanjir elementlaridagi kuchlanishlar oniy qiymatlari:

$$\begin{aligned} u_r &= I_m r \sin(\omega t + \psi_i) = U_{mr} \sin(\omega t + \psi_i), \\ u_C &= I_m x_C \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ) = U_{mC} \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ), \\ u &= I_m Z \sin(\omega t + \psi_i + \varphi) = U_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi). \end{aligned}$$

2.6.6. Rezistor, induktiv g'altak va kondensator ketma-ket ulangan sinusoidal tok zanjiri

r , L va C elementlari ketma-ket ulangan zanjir (2.13- rasm, a) dan $i = I_m \sin \omega t$ sinusoidal tok o'tganda uning elementlarida pasaygan sinusoidal kuchlanishlar algebraik yig'indisiga teng bo'lgan kuchlanish hosil bo'ladi. Kirxgof 2- qonuniga ko'ra:

$$u = u_r + u_L + u_C \text{ yoki vektor shaklida } \underline{U} = \underline{U}_r + \underline{U}_L + \underline{U}_C.$$



2.13 - rasm

r qarshilikdagi kuchlanish faza jihatdan tok bilan mos, L induktivlikdagi kuchlanish tokdan 90° oldinda, C sig'imdagi kuchlanish esa tokdan 90° orqada bo'ladi (2.13-rasm, b). Om qonunidan foydalanib quyidagini yozishimiz mumkin:

$$\begin{aligned} u &= ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = rI_m \sin \omega t + \omega L I_m \cos \omega t - \frac{I_m}{\omega C} \cos \omega t = \\ &= rI_m \sin \omega t + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) I_m \cos \omega t = rI_m \sin \omega t + x I_m \cos \omega t. \end{aligned}$$

Bu tenglama kuchlanishlar oniy qiymatlari uchun Kirxgof 2- qonunining *trigonometrik shakli* deb ataladi. Undagi $x = x_L - x_C = \omega L - 1/\omega C$ kattalik zanjir *reaktiv qarshiligi* deb ataladi. $x_L > x_C$ bo'lganda, $x > 0$ va $\varphi > 0$ bo'lib (2.13- rasm, b), zanjir induktiv xarakterga, $x_L < x_C$ bo'lganda esa, $x < 0$ va $\varphi < 0$ bo'lib (2.13- rasm, v), zanjir *sig'im xarakterga*, $x_L = x_C$ bo'lganda $x = 0$ va $\varphi = 0$ bo'lib, zanjir *aktiv xarakterga* ega bo'ladi.

Yuqoridagi tenglamadan U_m va φ larni topish uchun quyidagi trigonometrik munosabatdan foydalanamiz:

$$m \sin \alpha \pm n \cos \alpha = \sqrt{m^2 + n^2} \sin(\alpha \pm \varphi), \quad \varphi = \arctg \frac{n}{m}.$$

Bu munosabatlarni va qarshiliklar uchburchagini hisobga olib:

$$U_m = \sqrt{r^2 + x^2} I_m, \quad \operatorname{tg} \varphi = x/r = (x_L - x_C)/r.$$

Tok va kuchlanishlar ta'sir etuvchi qiymatlari uchun:
 $U = \sqrt{r^2 + x^2} I = zI$, bundan $I = U / \sqrt{r^2 + x^2}$ bu yerda
 $z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$ - zanjirning to'la qarshiligi.

Ko'rilayotgan zanjir uchun tok va kuchlanishlar vektor diagrammasini quramiz (2.13- rasm, b). Uni tok vektori $\underline{I}$ ni qurishdan boshlaymiz. r elementdagi kuchlanish vektori $\underline{U}_r$ tok $\underline{I}$ bilan faza jihatdan mos, L elementdagi kuchlanish vektori $\underline{U}_L$ tok $\underline{I}$ dan 90° ga oldinda, C elementdagi kuchlanish vektori $\underline{U}_C$ tok $\underline{I}$ vektoridan 90° ga orqada bo'ladi. $\underline{U}$ kuchlanish vektori Kirxgof 2- qonuniga ko'ra $\underline{U}_r$, $\underline{U}_L$ va $\underline{U}_C$ vektorlar yig'indisi ko'rinishi quriladi. Tok bilan zanjir qismalaridagi kuchlanish vektorlari orasidagi faza siljish burchagi $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{x}{r}$ ga teng bo'ladi.

2.6.7. Rezistor, induktiv g'altak va kondensator parallel ulangan sinusoidal tok zanjiri

r , L va C elementlari parallel ulangan zanjir (2.14- rasm, a) $u = U_m \sin \omega t$ sinusoidal kuchlanish manbaiga ulansa, undan o'tadigan sinusoidal tok Kirxgof 1- qonuniga ko'ra zanjir har bir elementidan o'tayotgan toklar oniy qiymatlarining algebraik yig'indisiga teng:

$$i = i_r + i_L + i_C.$$

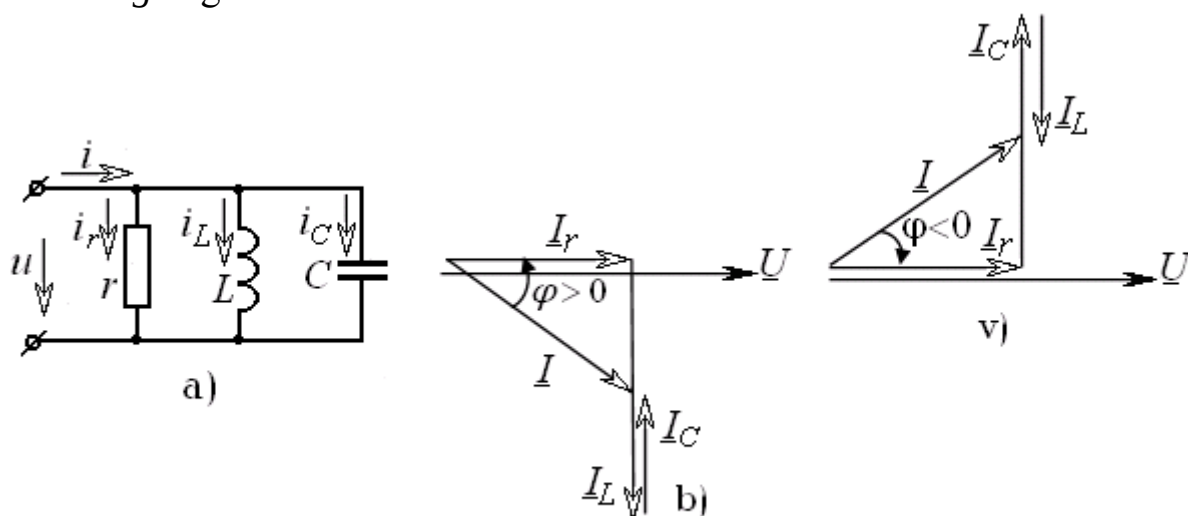
r qarshilikdagi tok i_r kuchlanish bilan faza jihatdan mos, induktivlikdagi tok i_L 90° ga orqada, sig'imdagi tok i_C 90° ga oldinda bo'ladi. Zanjirdagi umumiy tok:

$$\begin{aligned} I_m \sin(\omega t - \varphi) &= \frac{1}{r} U_m \sin \omega t - \frac{1}{\omega L} U_m \cos \omega t + \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}} \cos \omega t = \\ &= U_m \left[\frac{1}{r} \sin \omega t - \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \cos \omega t \right] = U_m [g \sin \omega t - b \cos \omega t] \end{aligned}$$

Oxirgi tenglama toklar oniy qiymatlari uchun Kirxgof 1- qonunining *trigonometrik shakli hisoblanadi*.

$b = b_L - b_C = (1/\omega L) - \omega C$ - zanjir *reaktiv o'tkazuvchanligi deb* ataladi. $b_L > b_C$ bo'lganda, $b > 0$ va $\varphi > 0$ bo'lib (2.14- rasm, b), zanjir *induktiv*

xarakterga, $b_L < b_C$ bo'lganda, $b < 0$ va $\varphi < 0$ bo'lib (2.14- rasm, v), zanjir sig'im xarakterga, $b_L = b_C$ bo'lganda esa $b = 0$ va $\varphi = 0$ bo'lib, zanjir aktiv xarakterga ega bo'ladi.



2.14 - rasm

I_m va φ quyidagi munosabatlar yordamida aniqlanadi:

$$I_m = U_m \sqrt{g^2 + b^2} = U_m y, \quad \operatorname{tg} \varphi = b / g,$$

bu yerda $y = \sqrt{g^2 + b^2}$ - zanjir to'la o'tkazuvchanligi.

Toklar va kuchlanish orasidagi faza siljish burchagi quyidagi formula yordamida topiladi:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{(1/\omega L - \omega C)}{g} = \operatorname{arctg} \frac{b}{g}.$$

Ko'rilayotgan zanjir uchun toklar va kuchlanish vektor diagrammasini quramiz (2.14- rasm, b). Uni kuchlanish vektori $\underline{U}$ ni qurishdan boshlaymiz. r elementdagi tok vektori $\underline{I}_r$ kuchlanish vektori bilan mos, L elementdagi tok vektori undan 90° ga orqada, C elementdagi tok vektori esa $\underline{U}$ dan 90° ga oldinda bo'ladi. Umumiy tok vektori $\underline{I}$ uchala elementlardagi tok vektorlarining geometrik yig'indisiga teng bo'ladi.

2.7. Sinusoidal tok zanjirida quvvat

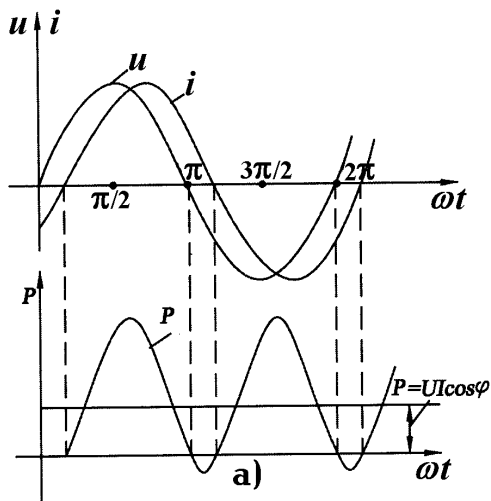
Sinusoidal tok zanjirining r , L va C kabi ayrim elementlaridagi energetik munosabatlar avvalgi paragraflarda ko'rib chiqilgan edi. Endi umumiy holat, ya'ni zanjirdagi kuchlanish $u = U_m \sin \omega t$ va tok

$i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ ga teng bo'lgan holat uchun energetik munosabatlarni ko'rib chiqamiz.

Zanjirdagi oniy quvvatni aniqlaymiz:

$$p = ui = U_m I_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = UI [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)]$$

Oniy quvvat ikkita: doimiy ($UI \cos \varphi$) va ikkilangan chastota bilan o'zgaruvchi kosinusoidal ($UI \cos(2\omega t - \varphi)$) tashkil etuvchilardan iborat. Induktiv xarakterli, ya'ni $\varphi > 0$ zanjirdagi tok, kuchlanish va quvvat oniy



2.15- rasm

qiymatlarining grafiklari 2.15-rasm, a da keltirilgan.

Davrning kuchlanish va tok ishoralari bir xil bo'lgan qismlarida oniy quvvat musbat manbadan energiya iste'mol qilinadi: bir qismi rezistorda iste'mol qilinadi, qolgan qismi esa g'altak magnit maydoni va kondensator elektr maydonida to'planadi.

Davrning kuchlanish va tok ishoralari

har xil bo'lgan qismlarida oniy quvvat manfiy va bunda g'altak magnit maydoni va kondensator elektr maydonida to'plangan energiya manbaga qaytariladi.

Rezistorda iste'mol qilinayotgan aktiv quvvat oniy quvvatning bir davr mobaynidagi o'rtacha qiymatiga teng:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi. \quad (2.2)$$

$\cos \varphi$ ko'paytma quvvat koeffitsiyenti deb ataladi, bunda $\varphi = \psi_u - \psi_i$, ya'ni kuchlanish va tok boshlang'ich fazalarining ayirmasi. (2.2) ifodadan ko'rinib turibdiki, zanjir aktiv quvvati kuchlanish, tok ta'sir etuvchi qiymatlari va quvvat koeffitsiyentlarining o'zaro ko'paytmasiga teng.

Zanjirdagi tok va kuchlanishlar orasidagi faza siljish burchagi φ qancha nolga yaqin bo'lsa, $\cos \varphi$ shuncha birga yaqin bo'ladi. Bunda U va I lar berilgan qiymatlarida $\cos \varphi$ qancha katta bo'lsa, shuncha ko'p aktiv quvvat manbadan iste'molchiga uzatiladi.

Aktiv quvvatni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$P = zI^2 \cos \varphi = rI^2, \quad P = yU^2 \cos \varphi = gU^2.$$

Kuchlanish va tok berilgan qiymatlarida aktiv quvvatning maksimal qiymati zanjir to'la quvvati deb ataladi: $S = UI$ [V · A]. Aktiv quvvat (2.2) ifodasidan: $\cos \varphi = P / S$.

Elektr zanjirini hisoblashda va amaliyotda reaktiv quvvat tushunchasidan foydalaniladi:

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 x = U^2 b \text{ [VAr]}.$$

Reaktiv quvvat manba bilan iste'molchi o'rtasidagi energiya almanishuvi tezligini tavsiflaydi va reaktiv tok iste'molini o'lchovi hisoblanadi. Zanjir induktiv xarakterga ega ($\varphi > 0$) bo'lganda reaktiv quvvat musbat, sig'im xarakterga ega ($\varphi < 0$) bo'lganda esa manfiy bo'ladi. Aktiv, reaktiv va to'la quvvatlar 2.15- rasm, b dagi quvvatlar uchburchagiga ko'ra o'zaro quyidagicha bog'langan:

$$S^2 = P^2 + Q^2, \quad \sin \varphi = \frac{Q}{S}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}.$$

2.8. Sinusoidal tok zanjirlarini kompleks usulida hisoblash

Sinusoidal tok zanjirlarini kompleks usulda hisoblashni amerikalik olim I. Shteynmets 1894 yilda ishlab chiqqan. Bu usul yordamida hisoblash asosida sinusoidal tok zanjiri uchun tuzilgan differensial tenglamalarni algebraik tenglamalar bilan almashlash yotadi. Bunda tok va kuchlanishlar oniy qiymatlari ularning kompleks tasvirlari bilan almashtiriladi, ya'ni vaqt funksiyasidagi integro-differensial tenglamalardan kompleks shaklda yozilgan va vaqt kattaligi istisno qilingan algebraik tenglamalar hosil qilinadi. Bu esa, tabiiyki zanjirlarni hisoblashni ancha soddalashtiradi.

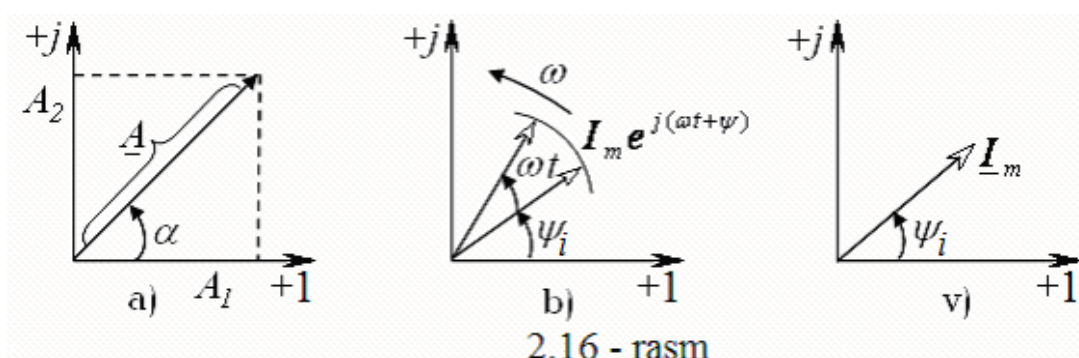
2.8.1. Sinusoidal kattaliklarni kompleks tekislikda vektorlar bilan tasvirlash

Ma'lumki har qanday kompleks son haqiqiy va mavhum qismlardan iborat. 2.16- rasmda kompleks tekislik keltirilgan. Absissa o'qi *haqiqiy sonlar o'qi*, ordinata o'qi esa *mavhum sonlar o'qi* hisoblanadi. Kompleks tekislikda haqiqiy sonlar o'qi $+1$ belgi bilan, mavhum sonlar o'qi esa $+j$ ($j = \sqrt{-1}$) bilan belgilanadi. Agar kompleks tekislikda absissa o'qiga kompleks sonning haqiqiy qismini, ordinata o'qiga esa uning mavhum qismini joylashtirsak, u holda kompleks son tekislikda bir nuqtani ifodalaydi. Eyler formulasiga binoan $e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$ kompleks son

$e^{j\alpha}$ kompleks tekislikda vektor ko‘rinishda tasvirlanadi, uning amplitudasi 1 ga teng va α burchak musbat yo‘nalishi haqiqiy sonlar o‘qi (+1) ga nisbatan soat miliga teskari yo‘nalishda hisoblanadi. $e^{j\alpha}$ funksiyaning moduli birga teng:

$$|e^{j\alpha}| = \sqrt{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} = 1.$$

$e^{j\alpha}$ funksiya vektorining haqiqiy o‘qqa proyeksiyasi $\cos \varphi$ ga teng, mavhum o‘qqa proyeksiyasi esa $\sin \varphi$ ga teng. Agar funksiya o‘rniga $I_m e^{j\alpha}$ funksiyasini olsak, u holda $I e^{j\alpha} = I \cos \alpha + jI \sin \alpha$ (2.3) ifoda hosil bo‘ladi.



2.16 - rasm

Kompleks tekislikda bu funksiyaning (+1) o‘qiga nisbatan burchagi α ga teng, faqat vektor uzunligi I_m marta kattadir. (2.3) formuladagi α burchak qiymati har xil bo‘lishi mumkin. Masalan, $\alpha = \omega t + \psi_i$ (2.16-rasm, b)), ya’ni α burchak t vaqtga proporsional o‘zgarsa, u holda

$$\underline{I}_m = I_m e^{j(\omega t + \psi_i)} = I_m \cos(\omega t + \psi_i) + jI_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

$I_m \cos(\omega t + \psi_i)$ tashkil etuvchi $I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}$ ifodaning haqiqiy Re qismi bo‘lib, u quyidagicha ifodalanadi: $\text{Re}[I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}] = I_m \cos(\omega t + \psi_i)$.

$I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ tashkil etuvchi $I_m e^{j\alpha}$ ifodaning mavhum Im qismi bo‘lib, u quyidagicha ifodalanadi: $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = \text{Im}[I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}]$.

Shunday qilib, sinusoidal tokni $i = I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}$ ko‘rinishda yozish mumkin. Bu aylanuvchi vektor $\underline{I}_m = I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}$ ni $+j$ o‘qiga proyeksiyasidir. Kompleks tekislikda sinusoidal kattaliklar vektor tasvirlarini $\omega t = 0$ dagi holatini tasvirlash qabul qilingan. Bu holda $\underline{I}_m = I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}$ vektor $\omega t = 0$ bo‘lganda quyidagicha ifodalanadi:

$$I_m e^{j\psi_i} = \underline{I}_m.$$

$\underline{I}_m$ - kompleks tok, uning moduli I_m ga, argumenti esa vektorni haqiqiy sonlar o'qiga nisbatan hosil qilgan burchagi (boshlang'ich faza ψ_i) ga teng bo'ladi (2.16- rasm, v).

Tok ta'sir etuvchi qiymati kompleksi esa $\underline{I} = \frac{\underline{I}_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi} = I e^{j\psi}$

2.8.2. Om va Kirxgof qonunlarining kompleks shakli

Om va Kirxgof qonunlari kompleks shaklini hosil qilish uchun r , L va C elementlari ketma-ket ulangan zanjirni ko'rib chiqamiz (2.13- rasm, a).

Bu zanjir uchun:

$$u_r + u_L + u_C = u \quad \text{yoki} \quad ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = u,$$

bu yerda:

$$\begin{aligned} i &= I_m \sin(\omega t + \psi_i), \\ u_r &= r I_m \sin(\omega t + \psi_i), \\ u_L &= \omega L I_m \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ), \\ u_C &= \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ). \end{aligned}$$

Yuqoridagi tenglamalarni kompleks shaklda yozamiz.

$$\begin{aligned} \underline{I}_m &= I_m e^{j\psi_i}, \\ \underline{U}_{rm} &= r I_m e^{j\psi_i} = r \underline{I}_m, \\ \underline{U}_{Lm} &= \omega L I_m e^{j(\psi_i + 90^\circ)} = \omega L I_m e^{j\psi_i} e^{j90^\circ} = \\ &= \omega L I_m e^{j\psi_i} (\cos 90^\circ + j \sin 90^\circ) = j \omega L I_m e^{j\psi_i} = j \omega L \underline{I}_m, \\ \underline{U}_{Cm} &= \frac{1}{\omega C} I_m e^{j(\psi_i - 90^\circ)} = \frac{1}{\omega C} I_m e^{j\psi_i} e^{-j90^\circ} = -j \frac{1}{\omega C} \underline{I}_m. \end{aligned}$$

Ushbu hosil qilingan tenglamalardan ko'rinib turibdiki, sinusoidal kattaliklarni kompleks sonlar bilan almashtirishda *differensiallash amali $j\omega$ bilan, integrallash amali esa $1/j\omega$ bilan almashtiriladi.*

Ko'rilayotgan zanjir uchun Kirxgof qonunining kompleks shakli quyidagicha yoziladi:

$$\underline{U}_{rm} + \underline{U}_{Lm} + \underline{U}_{Cm} = \underline{U}_m \quad \text{yoki} \quad r \underline{I}_m + j \omega L \underline{I}_m - j \frac{1}{\omega C} \underline{I}_m = \underline{U}_m$$

bundan

$$\underline{I}_m = \frac{\underline{U}_m}{r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{\underline{U}_m}{\underline{Z}} \text{ yoki ta'sir etuvchi qiymatlar uchun}$$

$$\underline{I} = \underline{U} / \underline{Z}.$$

Oxirgi tenglik Om qonunining kompleks shakli deb ataladi. Demak, sinusoidal tok zanjiridagi kompleks tok unga berilgan kompleks kuchlanishga to'g'ri proporsional, zanjirning to'la kompleks qarshiligiga esa teskari proporsionaldir.

$$\underline{Z} = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = r + jx = z \cos \varphi + jz \sin \varphi = \sqrt{r^2 + x^2} \cdot e^{j\varphi} = ze^{j\varphi} -$$

zanjir kompleks qarshiligi deb ataladi. Bunda kompleks qarshilik haqiqiy qismi aktiv qarshilikka, mavhum qismi esa reaktiv qarshilikka teng bo'ladi.

To'la kompleks qarshilikka teskari bo'lgan kattalik to'la kompleks o'tkazuvchanlik deb ataladi:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{ze^{\pm j\varphi}} = ye^{\mp j\varphi} = y \cos \varphi \mp jy \sin \varphi = g \mp jb,$$

bunda $y = \sqrt{g^2 + b^2}$, $\varphi = \arctg \frac{b}{g}$ - mos ravishda to'la kompleks o'tkazuvchanlik moduli va argumenti.

Sinusoidal tok zanjirlari uchun Kirxgof qonunlari kompleks tok va kuchlanishlar orqali quyidagicha ifodalanadi:

Zanjirning istalgan tugunidagi kompleks toklarning algebraik yig'indisi nolga teng (Kirxgof 1- qonuni):

$$\sum_{\kappa=1}^n \underline{I}_{\kappa} = 0.$$

Zanjirning istalgan berk konturida kompleks EYK larining algebraik yig'indisi shu kontur kompleks qarshiliklaridagi kompleks kuchlanishlar pasayishlarining algebraik yig'indisiga teng (Kirxgof 2- qonuni):

$$\sum_{\kappa=1}^n \underline{E}_{\kappa} = \sum_{q=1}^m \underline{I}_q \underline{Z}_q.$$

2.8.3. Kompleks quvvat

To'la quvvatni kompleks ko'rinishda yozish uchun kompleks kuchlanishni qo'shma kompleks tokka ko'paytiramiz:

$$\underline{\tilde{S}} = \underline{U} \underline{I}^* = UIe^{\pm j\varphi} = UI \cos \varphi \pm jUI \sin \varphi = P \pm jQ.$$

bunda $\underline{I}^*$ - qo'shma kompleks tok. Masalan, agar $\underline{I} = I_m e^{+j\varphi}$ bo'lsa, u holda bu tok qo'shmasi $\underline{I}^* = I_m e^{-j\varphi}$ ga teng bo'ladi. $\tilde{S}$ - kompleks to'la quvvat deb ataladi. Uning haqiqiy qismi aktiv quvvatga, mavhum qismi esa reaktiv quvvatga teng, ya'ni:

$$P = \operatorname{Re} \left| \underline{U} \underline{I}^* \right| = \operatorname{Re} \left| \tilde{S} \right|; \quad Q = \operatorname{Im} \left| \underline{U} \underline{I}^* \right| = \operatorname{Im} \left| \tilde{S} \right|.$$

Masala. Agar tok va kuchlanishni oniy qiymatlari ifodalari mos ravishda $i = 141 \sin(314t + 60^\circ) \text{ A}$, $u = 7,07 \sin(314t + 30^\circ) \text{ V}$ ko'rinishida berilgan bo'lsa, u holda aktiv, reaktiv va to'la quvvatlar aniqlansin!

Yechish. Tok va kuchlanish kompleks ta'sir etuvchi qiymatlarini yozib olamiz:

$$\underline{U} = \frac{141}{\sqrt{2}} e^{j60^\circ} = 100 e^{j60^\circ} \text{ V}; \quad \underline{I} = \frac{7,07}{\sqrt{2}} e^{j30^\circ} = 5 e^{j30^\circ} \text{ A}.$$

Kompleks to'la quvvat:

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= \underline{U} \underline{I}^* = 100 e^{j60^\circ} \cdot 5 e^{-j30^\circ} = 500 e^{j30^\circ} = 500 \cos 30^\circ + j 500 \sin 30^\circ = \\ &= 433 + j 250 \text{ V} \cdot \text{A}. \end{aligned}$$

Shunday qilib, $S = 500 \text{ V} \cdot \text{A}$, $P = 433 \text{ Vt}$, $Q = 250 \text{ VAr}$.

2.8.4. Sinusoidal tok zanjirlarida quvvatlar balansi

Energiya saqlanish qonunidan ma'lumki, har qanday zanjirda aktiv quvvatlar balansi saqlanadi: manbalar uzatayotgan aktiv quvvatlar yig'indisi iste'molchilar qabul qilayotgan aktiv quvvatlar yig'indisiga teng:

$$\sum_{k=1}^m P_{km} = \sum_{k=1}^n I_k^2 r_k, \text{ bu yerda } m - \text{manbalar soni, } n - \text{iste'molchilar soni.}$$

Zanjirdagi manbalar uzatayotgan reaktiv quvvatlar yig'indisi sxemadagi induktiv g'altak va kondensatorlar iste'mol qilayotgan reaktiv quvvatlar algebraik yig'indisiga teng:

$$\sum_{k=1}^m Q_{km} = \sum_{k=1}^n I_k^2 x_k.$$

Kompleks quvvatlar balansi:

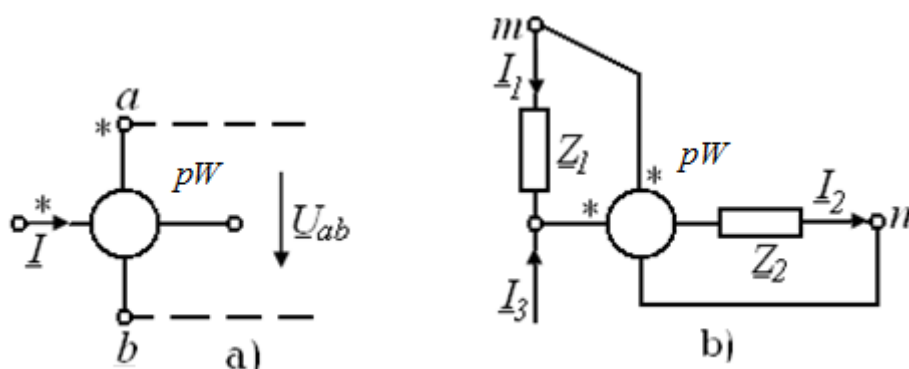
$$\sum_{k=1}^m \tilde{S}_{km} = \sum_{k=1}^n \tilde{S}_k.$$

Zanjir elementlarining kompleks qarshiliklari yig'indisi teng bo'lsa-da, ular modullarining yig'indisi umumiy holda teng bo'lmasligi mumkin. Shuning uchun to'la quvvatlar balansi har doim ham saqlanmasligi mumkin, ya'ni:

$$\sum_{k=1}^m \underline{S}_{km} \neq \sum_{k=1}^n \underline{S}_k.$$

Bir fazali sinusoidal tok zanjirlarida aktiv quvvatni o'lchash uchun elektrodinamik yoki ferrodinamik vattmetrlar qo'llaniladi (2.17- rasm, a). Bunda vattmetrning belgilangan I^* tok va U^* kuchlanish qismalari (generator qismalari) manba qismalariga ulanadi.

Sinusoidal tok zanjirida reaktiv quvvatni o'lchash uchun tok va kuchlanish vektorlari orasidagi faza siljish burchagi 90° ga farq qilishi kerak.



2.17 – rasm

Bunda vattmetr strelkasi burchagi:

$$\alpha = S_p UI \cos(\pi/2 - \varphi) = S_p UI \sin \varphi \quad \text{bunda } S_p - \text{vattmetr sezgirligi.}$$

$\varphi = 90^\circ$ li burchak asbob parallel chulg'amiga qo'shimcha rezistor va g'altakdan iborat zanjirni ulash bilan hosil qilinadi. To'la quvvatni hisoblash uchun tok I va kuchlanish U ni ampermetr va voltmeter yordamida o'lchangan qiymatlari ko'paytiriladi: $S = UI$.

Masala. 2.17- rasm, b da keltirilgan vattmetr ko'rsatishini aniqlang! Quyidagilar berilgan:

$$\underline{I}_1 = 10e^{j37^\circ} \text{ A}, \quad \underline{I}_3 = 8e^{-j15^\circ} \text{ A}, \quad \underline{Z}_1 = 2 \text{ Om}, \quad \underline{Z}_2 = 1,8e^{-j44^\circ} \text{ Om}.$$

Yechish. Vattmetr orqali o'tadigan tok quyidagiga teng:

$$\begin{aligned} \underline{I}_2 &= \underline{I}_1 + \underline{I}_3 = 8e^{-j15^\circ} + 10e^{j37^\circ} = 8 \cos 15^\circ - j8 \sin 15^\circ + \\ &+ 10 \cos 37^\circ + j10 \sin 37^\circ = 16,2e^{j14^\circ} \text{ A}. \end{aligned}$$

Vattmetr parallel g'altagidagi kuchlanish:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{mn} &= \underline{I}_1 \underline{Z}_1 + \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = 10e^{j37^\circ} \cdot 2 + 16,2e^{j14^\circ} \cdot 1,8e^{-j44^\circ} = \\ &= 41 - j2,5 = 41,03e^{-j3,5^\circ} \text{ V.}\end{aligned}$$

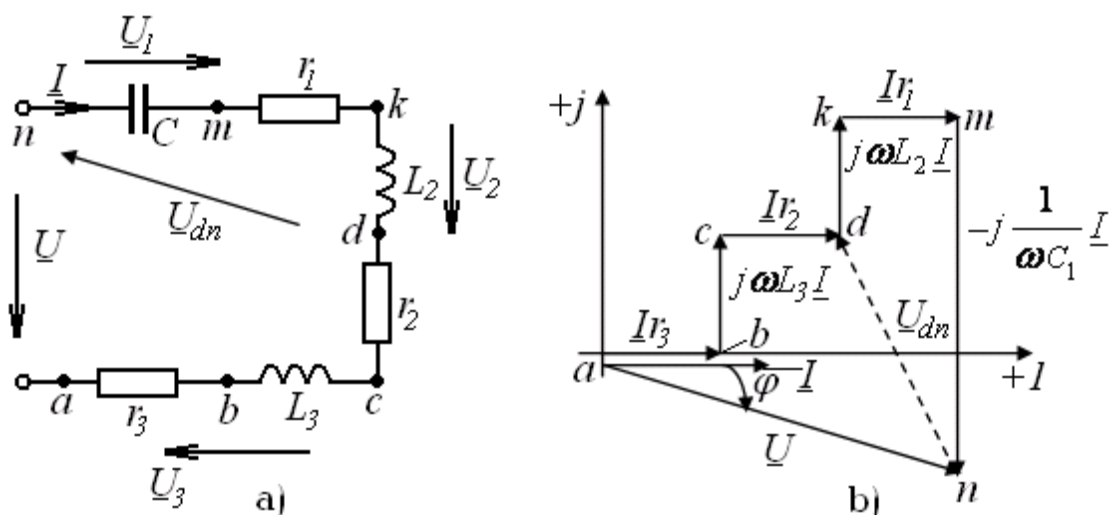
Vattmetr ko'rsatkichi:

$$\begin{aligned}P &= \operatorname{Re} \left| \underline{U}_{mn} \underline{I}_{-2}^* \right| = \operatorname{Re} \left| 41,03e^{-j3,5^\circ} \cdot 16,2e^{-j14^\circ} \right| = \operatorname{Re} \left| 665e^{-j17,5^\circ} \right| = \\ &= 665 \cos 17,5^\circ = 634 \text{ Vt.}\end{aligned}$$

2.8.5. Sinusoidal tok zanjirlarini kompleks usulida hisoblash

Sinusoidal tok zanjirlarini hisoblashda o'zgarmas tok zanjirlarini hisoblashda qo'llanilgan barcha usullardan foydalaniladi. Bunda tuzilgan tenglamalardagi tok, kuchlanish, EYK va qarshiliklar kompleks shaklda yoziladi. Sinusoidal tok zanjirini hisoblashdagi o'ziga xos xususiyatlarni aniqroq tasavvur qilish uchun ayrim zanjirlarni kompleks usulda hisoblashni ko'rib chiqamiz.

1. *Shoxobchalanmagan zanjirni hisoblash. Kuchlanishlarning topografik vektor diagrammasi.* 2.18- rasm, a da keltirilgan zanjirni ko'rib chiqamiz. Manba kuchlanishi va iste'molchilar parametrlari berilgan.



2.18-rasm

Zanjir to'la qarshiligi:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 = r_1 - jx_{C1} + r_2 + jx_{L2} + r_3 + jx_{L3} = r + jx = ze^{j\varphi},$$

bu yerda: $r = r_1 + r_2 + r_3$, $x = -x_{C1} + x_{L2} + x_{L3}$, $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{x}{r}$.

Om qonuni asosida zanjirdagi tok va uning elementlaridagi kuchlanishlar pasayishini topamiz:

$$\underline{I} = \underline{U} / \underline{Z}, \quad \underline{U}_1 = \underline{I} \underline{Z}_1 = \underline{I}(r_1 - jx_{C_1}), \quad \underline{U}_2 = \underline{I} \underline{Z}_2 = \underline{I}(r_2 + jx_{L_2}),$$

$$\underline{U}_3 = \underline{I} \underline{Z}_3 = \underline{I}(r_3 + jx_{L_3}).$$

Zanjir to'la, aktiv va reaktiv quvvatlari:

$$\tilde{S} = \underline{U} \underline{I}^* = P + jQ = \tilde{S}_1 + \tilde{S}_2 + \tilde{S}_3 = \underline{U}_1 \underline{I}^* + \underline{U}_2 \underline{I}^* + \underline{U}_3 \underline{I}^*,$$

$$P = \operatorname{Re}[\tilde{S}] = \sum_{k=1}^n I^2 r_k = \sum_{k=1}^n P_k = P_1 + P_2 + P_3,$$

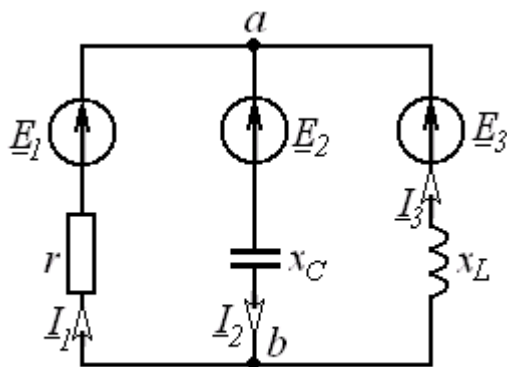
$$Q = I_m |\tilde{S}| = \sum_{k=1}^n I^2 x_k = \sum_{k=1}^n Q_k = -Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

Zanjirdagi jarayonlarni grafik tasvirlash uchun kuchlanishlar vektor diagrammasi qurilgan (2.18- rasm, b).

Bu diagrammada istalgan vektor parallel ravishda ko'chirilishi mumkin. Kirxgof 2- qonuni asosida vektor diagramma qurilganda vektorlar ixtiyoriy ketma-ketlikda qurilishi mumkin.

Kuchlanishlar topografik vektor diagrammasi deb shunday vektor diagrammaga aytiladiki, unda kuchlanishlar vektorlari zanjir elementlarining o'zaro ulanish ketma-ketligi bo'yicha quriladi. Bunda kuchlanishlar vektor diagrammalari topologiyasi zanjir topologiyasi bilan bir xil bo'ladi, ya'ni vektorlar o'zaro ulangan nuqtasiga zanjirning shu vektorlar xarakterlayotgan elementlari ulangan nuqtasi mos keladi.

Topografik diagramma zanjir istalgan nuqtalari orasidagi kuchlanishni osongina aniqlash imkonini beradi. Masalan, 2.18- rasm, b dagi vektor diagrammada $\underline{U}_{dn}$ kuchlanish n nuqtadan d nuqtaga yo'nalgan vektor ko'rinishda ko'rsatilgan.



2.19 - rasm

Masala. Agar elektr zanjirida (2.19- rasm) $\underline{E}_1 = 120V$; $\underline{E}_2 = 120e^{-j120^\circ} V$;

$\underline{E}_3 = 120e^{-j240^\circ} V$; $r = x_L = x_C = 10 \Omega$ bo'lsa, shoxobchalardagi toklar aniqlansin!

Yechish. Ushbu zanjirni ikki tugun usuli yordamida hisoblash osonroq. Buning uchun shoxobchalar kompleks o'tkazuvchanliklarini aniqlaymiz:

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{r} = 0,1 \text{ S};$$

$$\underline{Y}_2 = \frac{1}{-jx_C} = j0,1 \text{ S};$$

$$\underline{Y}_3 = \frac{1}{jx_L} = -j0,1 \text{ S}.$$

Ikki tugun orasidagi kompleks kuchlanishni topamiz:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{ab} &= \frac{\underline{E}_1 \underline{Y}_1 + \underline{E}_2 \underline{Y}_2 + \underline{E}_3 \underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3} = \\ &= \frac{120 \cdot 0,1 + 120e^{-j120^\circ} \cdot j0,1 + 120e^{-j240^\circ}(-j0,1)}{0,1 + j0,1 - j0,1} = 328 \text{ V}.\end{aligned}$$

Om qonuni bo'yicha shoxobchalardagi toklar:

$$\begin{aligned}\underline{I}_1 &= (\underline{E}_1 - \underline{U}_{ab}) \underline{Y}_1 = (120 - 328) \cdot 0,1 = -20,8 \text{ A}, \\ \underline{I}_2 &= (-\underline{E}_2 + \underline{U}_{ab}) \underline{Y}_2 = (-120e^{-j120^\circ} + 328) \cdot j0,1 = -40e^{j105^\circ} \text{ A}, \\ \underline{I}_3 &= (\underline{E}_3 - \underline{U}_{ab}) \underline{Y}_3 = (120e^{-j240^\circ} - 328) \cdot (-j0,1) = -40e^{j75^\circ} \text{ A}.\end{aligned}$$

2.9. Elektr zanjirlarida rezonans

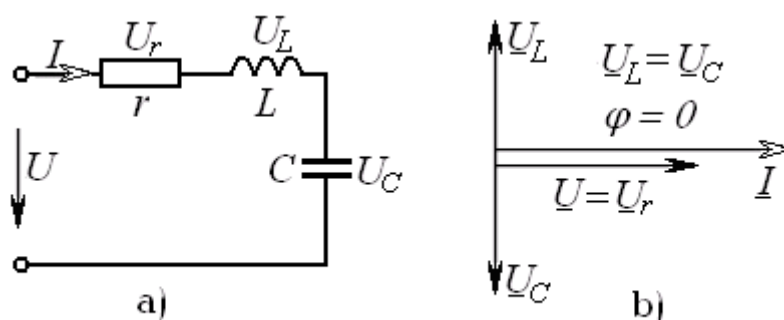
Elektr zanjirlarida reaktiv qarshiliklar musbat, manfiy va nolga teng bo'lishi mumkin. Zanjirda induktiv va sig'im elementlar bo'lganda zanjir kirish reaktiv qarshiligi nolga teng bo'lishi mumkin. Bunda zanjir aktiv xarakterga ega bo'lib, tok bilan kuchlanish orasidagi faza siljish burchagi nolga teng bo'ladi. *Elektr zanjirlaridagi bu hodisa **rezonans** deb ataladi.*

r , L va C elementlari ketma-ket (parallel) ulangan sinusoidal tok zanjiri xususiy chastotasi $\omega = 1/\sqrt{LC}$ manba kuchlanishi chastotasi $\omega = 2\pi f$ ga teng bo'lganda $x_L = x_C$, ($b_L = b_C$) va $|U_L| = |U_C|$, ($|I_L| = |I_C|$) bo'lib, reaktiv elementlardagi kuchlanish(tok)lar modul jihatdan bir-biriga teng hamda manba kuchlanishi(toki)dan bir necha marta ortib ketishi mumkin. *Elektr zanjirlaridagi bu rejim kuchlanishlar(toklar) rezonansi deb ataladi.* Bu rejimda zanjir reaktiv quvvati nolga teng bo'ladi. *Rezonans yuzaga keladigan chastota rezonans chastotasi deb ataladi.*

Elektr zanjirlarida rezonans rejimlaridan elektrotexnika, radiotexnika va elektr o'zgartgichlarda keng foydalaniladi. Ayrim hollarda esa, zanjirda rezonans hodisasi yuzaga kelishi noqulayliklarni tug'diradi (masalan, uzatish liniyalarida va transformatorlarda kuchlanish va toklarni keskin ortib ketishi o'lchash asboblarni hamda izolyatsiyani ishdan chiqishiga olib keladi).

2.9.1. Kuchlanishlar rezonansi

r , L va C elementlari ketma-ket ulangan zanjirni ko'rib chiqamiz (2.20-rasm, a).



2.20 - rasm

Zanjir kompleks qarshiligi: $\underline{Z} = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$.

Zanjir induktiv qarshiligi sig'im qarshilikka teng bo'lsa, induktivlik va sig'imdagi kuchlanishlar modul jihatdan bir-biriga teng va o'zaro qarama qarshi yo'nalgan bo'ladi. Shu sababli zanjirda kuchlanishlar rezonansi paydo boladi.

Kuchlanishlar rezonansi shartiga ko'ra: $X = \omega L - 1/\omega C = 0$ yoki $\omega L = 1/\omega C$, bunda $\omega_r = 1/\sqrt{LC}$ - rezonans chastotasi.

Kuchlanishlar rezonansi rejimi uchun tok va kuchlanishlar vektor diagrammasi 2.20- rasm, b da keltirilgan. Unda reaktiv elementlardagi kuchlanishlar modul qiymatlari teng, yo'nalishlari esa qarama-qarshi. Rezonans shartidan ko'rinib turibdiki, zanjirda bu rejimni hosil qilish uchun manba chastotasini yoki zanjir xususiy chastotasini L yoki C ni o'zgartirish (rostlash) hisobiga rostlab hosil qilish mumkin.

Rezonans rejimida zanjir to'la qarshiligi minimal bo'lib, u aktiv qarshilikka teng bo'ladi: $Z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = r$.

Zanjirdagi tok bu paytda maksimal qiymatga erishadi: $I = U/z = U/r$.

r qarshilikdagi kuchlanish pasayishi manba kuchlanishiga teng bo'ladi:

$$U_p = Ir = U.$$

Rezonans rejimidagi induktiv yoki sig'im qarshilik rezonans zanjir(kontur)ining to'liq qarshiligi deb ataladi: $\rho = \omega_p L = \frac{1}{\omega_p C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$.

Agar zanjirda $\rho \gg r$ shart bajarilsa, u holda reaktiv elementlardagi kuchlanishlar manba kuchlanishidan ko'p marta ortiq bo'ladi.

U_{Lp} yoki U_{Cp} ni U dan necha marta katta bo'lishi kontur aslliligi bilan tavsiflanadi:

$$Q = \frac{U_{Lp}}{U} = \frac{U_{Cp}}{U} = \frac{I_p \omega_p L}{I_p r} = \frac{\omega_p L}{r} = \frac{\rho}{r}.$$

$d = 1/Q = r/\rho$ - zanjir (kontur) so'nishi.

Rezonans rejimida zanjirdagi energetik munosabatlar ham o'ziga xos ayrim xususiyatlarga ega.

Zanjirdagi tok $i = I_m \sin \omega_p t$ bo'lsa, kondensatordagi kuchlanish $U_C = \frac{1}{C} \int i dt = U_{Cm} \cos \omega_p t$ bo'ladi.

Zanjir elektr va magnit maydonlaridagi energiya:

$$\begin{aligned} W &= \frac{Li^2}{2} + \frac{Cu_c^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2} \sin^2 \omega_p t + \frac{CU_{Cm}^2}{2} \cos^2 \omega_p t = \\ &= \frac{LI_m^2}{2} + \frac{CU_{Cm}^2}{2} = \text{const}. \end{aligned}$$

$$U_{cm} = \frac{1}{\omega_p C} I_m = \sqrt{\frac{L}{C}} I_m \text{ bo'lganligi uchun } \frac{CU_{Cm}^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}.$$

Oxirgi ifodadan ko'rinadiki, zanjirdagi elektr va magnit maydonlari energiyalarining yig'indisi rezonans rejimida vaqt bo'yicha o'zgarmaydi.

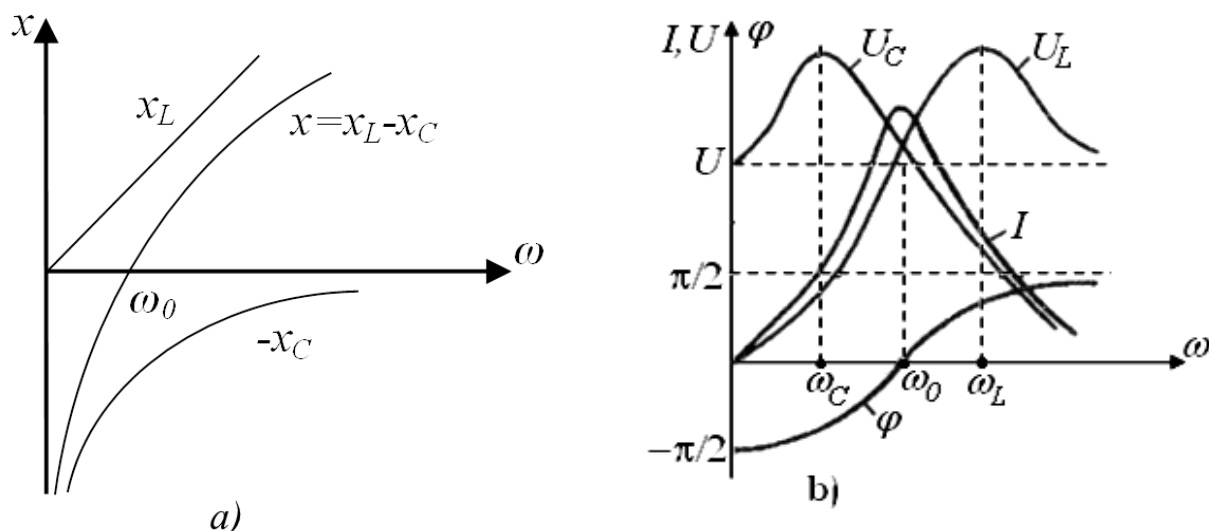
Energiya induktiv g'altak bilan kondensatorda navbatma navbat to'planib turadi. Aktiv qarshilikda sarf bo'layotgan energiya esa manbadan kelayotgan energiya bilan qoplanib turadi. Zanjir bu rejimda aktiv qarshilikka ekvivalent bo'ladi.

r , L va C elementlar ketma-ket ulangan zanjir(kontur) chastota tavsiflarini o'rganib chiqamiz. Manba kuchlanishi chastotasining o'zgarishi zanjir quyidagi parametrlarini o'zgarishiga olib keladi:

$$x_L = \omega L, \quad x_C = 1/\omega C, \quad x = x_L(\omega) - x_C(\omega),$$

$$Z = \sqrt{r^2 + [x_L(\omega) - x_C(\omega)]^2}, \quad \varphi = \arctg[x(\omega)/r]$$

2.21- rasm, a da X_L , X_C , X larni chastota ω ga bog'liklik grafiklari keltirilgan. Bular zanjir chastotaviy xarakteristiklari deb ataladi. 2.21- rasm, b da $I(\omega)$, $U_L(\omega)$, $U_C(\omega)$, $\varphi(\omega)$ grafiklari keltirilgan. Ular rezonans egri chiziqlari deyiladi. $\omega=0$ bo'lganda $I(0)=0$, chunki kondensator o'zgaras tokni o'tkazmaydi.



2.21- rasm

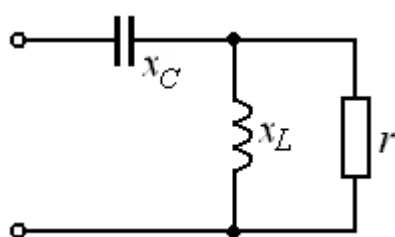
Barcha kuchlanish kondensatorda pasayadi. Chastota $0 < \omega < \omega_p$ diapazonda o'zgarganda x_L qarshilik oshadi, x_C esa kamayadi, Z qarshilik ham kamayadi. Bu diapazonda reaktiv qarshilik sig'im xarakterga ega bo'ladi. Shuning uchun ham faza siljish burchagi $-90^\circ < \varphi < 0$ oraliqda o'zgaradi.

Chastota $\omega_p < \omega < \infty$ diapazonda o'zgarganda $Z(\omega)$ va $x(\omega)$ lar 0 dan ∞ gacha ortib boradi. Zanjir induktiv xarakterga ega bo'ladi. Tok esa maksimal qiymatdan 0 gacha kamayadi. $U_L(\omega)$ kuchlanish manba kuchlanishi U gacha, $U_C(\omega)$ esa 0 gacha kamayadi.

Chastota $\omega = \omega_p$ bo'lganda grafiklarda aks ettirilgandek $Z(\omega_p) = Z_{\min} = r$, $x_r = x_L - x_C = 0$, $\varphi = 0$, $I(\omega_p) = I_{\max} = U/r$ ga teng bo'ladi. $U_L(\omega_p)$ va $U_C(\omega_p)$ esa maksimal qiymatga yaqin qiymatga erishadi. Zanjir bu paytda aktiv xarakterga ega bo'ladi.

$U_L(\omega_p)$ va $U_C(\omega_p)$ grafiklaridan ko‘rinib turibdiki, reaktiv elementlardagi kuchlanishlar maksimal qiymatlari rezonans chastotasidan farq qilgan chastotalarga to‘g‘ri keladi. $U_L(\omega)$ kuchlanish $\omega_L > \omega_p$ da, $U_C(\omega)$ kuchlanish esa $\omega_L < \omega_p$ da maksimumga erishadi. Funktsiyalarni ekstremumlarini topish sharti $dU_L/d\omega=0$ va $dU_C/d\omega=0$ dan g‘altakdagi va sig‘imdagi kuchlanishlar maksimumga ega bo‘lgan chastotalarni topish mumkin:

$$\omega_L = \omega_p \sqrt{\frac{2}{2-d^2}}, \quad \omega_C = \omega_p \sqrt{\frac{2-d^2}{2}}.$$



2.22-rasm

Masala. Agar kuchlanishlar rezonansi rejimida ishlayotgan ikki qutblik kirish to‘la qarshiligi $z_{kir}=20 \, \Omega$ va sig‘im qarshiligi $x_C=40 \, \Omega$ bo‘lsa, u holda uning induktiv x_L va aktiv r qarshiliklari qiymatlarini aniqlang (2.22- rasm)!

Yechish. Ikki qutblik kirish kompleks qarshiligi quyidagiga teng:

$$\underline{Z}_{kir} = -jx_C + \frac{jx_L r}{r + jx_L} = \frac{x_L^2 r}{r^2 + x_L^2} + j \left(-x_C + \frac{x_L r^2}{r^2 + x_L^2} \right).$$

Kuchlanish rezonansi shartiga ko‘ra, zanjir reaktiv qarshiligi nolga teng. Bu shartdan foydalanib quyidagi tenglamalar sistemasini tuzishimiz mumkin:

$$\left. \begin{aligned} Z_{kir} &= \frac{x_L^2 r}{r^2 + x_L^2} = 20 \\ x &= -x_C + \frac{x_L r^2}{r^2 + x_L^2} = 0 \end{aligned} \right\}.$$

Bu sistemani x_L va r ga nisbatan yechib, quyidagilarni topamiz: $x_L=50 \, \Omega$, $r=100 \, \Omega$.

2.9.2. Toklar rezonansi

Reaktiv elementlar o‘zaro parallel ulangan zanjir(2.23- rasm, a)da ma'lum shartlar bajarilganda toklar rezonansi yuz beradi.

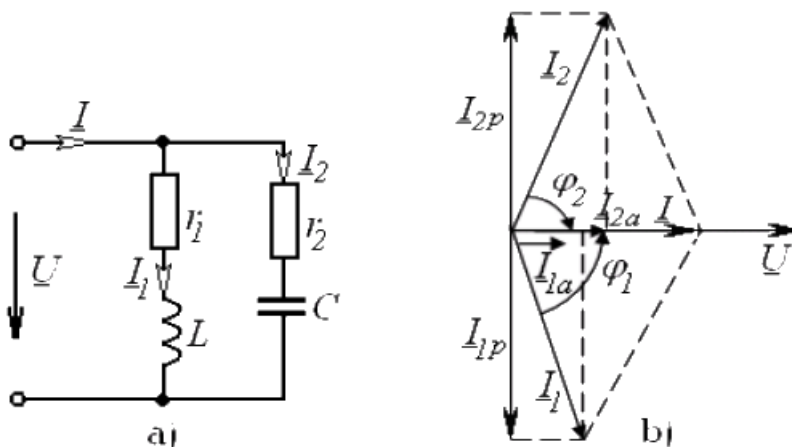
Rezonans rejimida manba toki va kuchlanishi orasidagi faza siljish burchagi nolga teng, reaktiv o'tkazuvchanlik esa $b = b_L - b_C = 0$ yoki $b_L = b_C$ bo'ladi.

Rezonans rejimi uchun qurilgan vektor diagramma (2.23- rasm, b) dan ko'rinib turibdiki, reaktiv elementlardagi toklar modul qiymatlari jihatidan o'zaro teng, yo'nalishlari jihatidan esa qarama-qarshi. Bunda $|I_L| = |I_C|$ toklar manba tokidan bir necha marotaba ortib ketishi mumkin. *Shuning uchun ham bu zanjirdagi rezonans toklar rezonansi deb ataladi.*

Zanjir reaktiv o'tkazuvchanligining nolga tenglik shartidan quyidagi kelib chiqadi:

$$\frac{\omega_r L}{r_1^2 + (\omega_r L)^2} = \frac{1/\omega_r C}{r_2^2 + (1/\omega_r C)^2}, \quad \text{bundan}$$

$$\omega_r = \sqrt{1/LC} \sqrt{\frac{(L/C) - r_1^2}{(L/C) - r_2^2}}.$$



2.23 - rasm

Ko'rilayotgan zanjirda rezonans rejimi hosil bo'lish uchun oxirgi tenglamaning ildiz osti ifodasi doim musbat bo'lishi lozim. $r_1 = r_2$ bo'lgan holat uchun $\omega_p = 1/\sqrt{LC}$ bo'ladi. $r_1 = r_2 = \sqrt{L/C}$ holat uchun esa $\omega_p = 0/0$ bo'ladi. Bu holatda zanjirda ixtiyoriy chastotada rezonans yuz beradi. Ko'rsatish mumkinki, bu holatda zanjir kirish qarshiligi $Z = Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2) = r$ ga teng va chastotaga bog'liq bo'lmaydi.

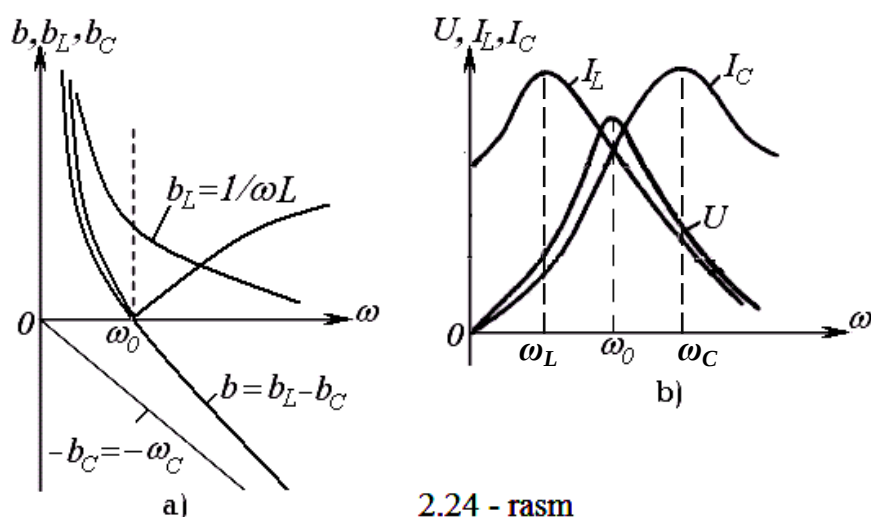
Ideallashtirilgan $r_1 = r_2 = 0$ holat uchun zanjir kirish qarshiligi cheksiz katta qiymatga teng bo'lib, umumiy tok nolga teng bo'ladi. Energiya manbadan zanjirga uzatilmaydi va kondensator va induktiv g'altak maydonlarida davriy ravishda almashinib to'planib turadi.

$\omega_p C = 1/\omega_p L = \sqrt{C/L} = \gamma$ - zanjir to'liq o'tkazuvchanligi deb ataladi.

Induktiv g'altak yoki kondensatordagi tok manba tokidan necha marta katta ekanligini ko'rsatuvchi kattalik zanjir(kontur)ning aslligi deb ataladi:

$$Q = \frac{I_{Cp}}{I} = \frac{I_{Lp}}{I} = \frac{\omega_p CU}{gU} = \frac{1}{g} \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{\gamma}{g} \quad \text{bunda } I_{Cp} \text{ va } I_{Lp} - \text{mos ravishda}$$

rezonans rejimida kondensator va induktivlikdan o'tadigan toklar. Toklar rezonansida ham kuchlanishlar rezonansidagiga o'xshash energetik jarayonlar yuz beradi. $g \neq 0$ bo'lgan zanjirda quvvatlar $p_L = -p_C$ bo'lib, energiya g'altak bilan kondensator maydonlarida davriy ravishda almashinib turadi. Qarshilikda sarf bo'layotgan energiya manbadan kelayotgan energiya bilan qoplanib turadi. 2.24- rasm, a da $b_L(\omega)$, $b_C(\omega)$, $b(\omega)$, 2.24- rasm, b da esa $I_L(\omega)$, $I_C(\omega)$, $U(\omega)$ lar grafiklari keltirilgan. Bu kattaliklar va zanjir parametrlarining chastota $0 \leq \omega \leq \omega_p$ va $\omega_p < \omega < \infty$ diapazonlaridagi o'zgarishlari xuddi kuchlanishlar rezonansidagi o'zgarishlariga o'xshash bo'ladi.



2.24 - rasm

Masala. Induktivligi $L_F = 2,5 \cdot 10^{-3}$ H va aktiv qarshiligi $R_F = 1000 \Omega$ bo'lgan induktiv g'altak hamda sig'imi $C = 120 \text{ pF} = 120 \cdot 10^{-12}$ F bo'lgan kondensator paralel rezonansli konturni tashkil qiladi va $R = 210 \text{ k}\Omega$ rezistor orqali qiymati $U = 66 \text{ V}$ bo'lgan sinusoidal kuchlanish manbaiga ulangan.

Toklar rezonansi rejimini ta'minlaydigan manba chastotasini va bu rejimdagi kontur to'la qarshiligini hamda shoxobchalardagi toklarni hisoblang!

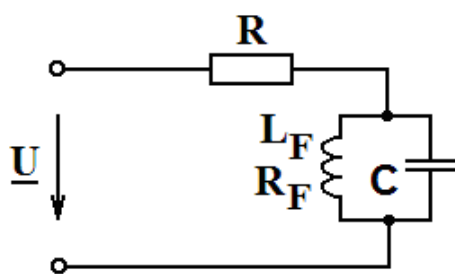
Yechish. Toklar rezonansi sharti ($b_L = b_C$) ni ta'minlaydigan manba chastotasini $R_F = R_1$ va $R_2 = 0$ larni e'tiborga olib quyidagicha hisoblaymiz:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{(L/C) - R_1^2}{(L/C) - R_2^2}} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \sqrt{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 120 \cdot 10^{-12}}} \sqrt{\frac{(2,5 \cdot 10^{-3} / 120 \cdot 10^{-12}) - (1000)^2}{2,5 \cdot 10^{-3} / 120 \cdot 10^{-12}}} =$$

$$= 290,4 \cdot 10^3 \cdot 0,976 = 284 \cdot 10^3 \text{ Gs.}$$

Rezonans konturini tashkil qiluvchi shoxobchalar o'tkazuvchanliklari:
 $b_L = b_C = \omega_p C = 2\pi f_p \cdot C = 2 \cdot 3,14 \cdot 284 \cdot 10^3 \cdot 120 \cdot 10^{-12} = 2,14 \cdot 10^{-4} \text{ S}.$



2.25- rasm

Kontur to'la reaktiv o'tkazuvchanligi esa $b = b_L - b_C = 2,14 \cdot 10^{-4} - 2,14 \cdot 10^{-4} = 0$ ga teng bo'ladi.

Kontur g aktiv o'tkazuvchanligi uning induktiv g'altagidan iborat shoxobchasining aktiv o'tkazuvchanligiga teng, ya'ni:

$$g = g_1 = \frac{R_F}{R_F^2 + 6(\omega \cdot L)^2} = \frac{1000}{1000^2 + (178 \cdot 10^4 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3})^2} = 0,48 \cdot 10^{-4} \text{ S}.$$

Kontur to'la o'tkazuvchanligi: $y = \sqrt{g^2 + b^2} = g = 0,48 \cdot 10^{-4} \text{ S}.$

Rezonans konturining to'la qarshiligini quyidagicha hisoblaymiz:

$$Z_k = 1/y = 1/0,48 \cdot 10^{-4} = 20,8 \cdot 10^3 \Omega.$$

Konturning hisoblangan to'la qarshiligi zanjir uchun dastlab berilgan qarshilik R dan 10 marta kichik. Shu sababli konturdagi kuchlanish quyidagiga teng:

$$U_k = \frac{U}{R + Z_k} Z_k = 66 \frac{21}{210 + 21} = 6 \text{ V}.$$

Induktiv g'altakdagi tok aktiv va reaktiv tashkil etuvchilari:

$$I_{1a} = Ug_1 = 6,0 \cdot 0,48 \cdot 10^{-4} = 0,284 \cdot 10^{-3} \text{ A},$$

$$I_{1p} = Ub_1 = 6,0 \cdot 2,14 \cdot 10^{-4} = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ A}.$$

Shu shoxobchadagi umumiy tok:

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} = \sqrt{(0,284 \cdot 10^{-3})^2 + (1,26 \cdot 10^{-3})^2} = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ A}.$$

Ikkinchi shoxobchadagi tok aktiv va reaktiv tashkil etuvchilari:
 $I_{2a} = U g_2 = U \cdot 0 = 0$, $I_{2p} = U b_2 = U b_1 = I_{1p} = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ A}$ va shuning uchun
 ham $I_2 = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ A}$.

Zanjirning umumiy toki:

$$I = \sqrt{(I_{1a} + I_{2a})^2 + (I_{1p} - I_{2p})^2} = \sqrt{(0,284 \cdot 10^{-3})^2 + 0} = 0,284 \cdot 10^{-3} \text{ A}.$$

2.10. Elektrotexnik qurilmalarning quvvat koeffitsiyenti va uning mohiyati. Quvvat koeffitsiyentini oshirish usullari va hisoblash asoslari

Elektr energiyasi iste'molchilari amalda asosan aktiv-induktiv xarakterli bo'ladi va yuklama toki fazasi manba kuchlanishi fazasidan orqada qoladi.

Yuklama quvvat koeffitsiyentining kamayishi yuklamadan o'tuvchi tokni oshiradi, chunki: $I = P/(U \cos \varphi)$.

Sinusoidal tok generatorlari ma'lum bir $S_{nom} = U_{nom} I_{nom}$ quvvatga mo'ljallangan bo'ladi, ya'ni U_{nom} nominal kuchlanishda ular faqat belgilangan nominal I_{nom} tokdan oshmagan yuklamaga ulanishi mumkin.

Shu sababli yuklama quvvat koeffitsiyenti past bo'lganda generator toki belgilangan nominal qiymatdan oshmasligi uchun uning aktiv quvvatini kamaytirish kerak bo'ladi. Bunday holatlarda generator tok bo'yicha to'la yuklangan bo'lsa-da aktiv quvvat bo'yicha to'la yuklanmagan bo'ladi.

Generator va birlamchi motordan iborat elektr manbaining umumiy foydali ish koeffitsiyenti har bir uskunaning foydali ish koeffitsiyentiga bog'liq bo'lib, birlamchi motor ishi asosan generator aktiv quvvatiga bog'liq. Shu sababli generatorni aktiv quvvat bilan to'la yuklanmasligi birlamchi motor va umuman energetik qurilma foydalanish koeffitsiyenti pasayishiga olib keladi. Bundan tashqari uzatish liniyasidagi quvvat isrofi:

$\Delta P = r_l I^2 = \frac{r_l P^2}{U^2 \cos^2 \varphi}$ katta bo'ladi, bu yerda r_l - uzatish liniyasi aktiv qarshiligi.

Ifodadan ko'rinib turibdiki, yuklama quvvat koeffitsiyenti qancha kam bo'lsa, quvvat isrofi shuncha ko'p bo'ladi, ya'ni elektr energiyasini uzatish arzonga tushadi. Binobarin, yuklama quvvat koeffitsiyenti qancha kam bo'lsa, uzatish liniyasidagi quvvat isrofi shuncha ko'p bo'ladi. Quvvat koeffitsiyenti manba quvvati qanday foydalanilayotganligini bildiradi.

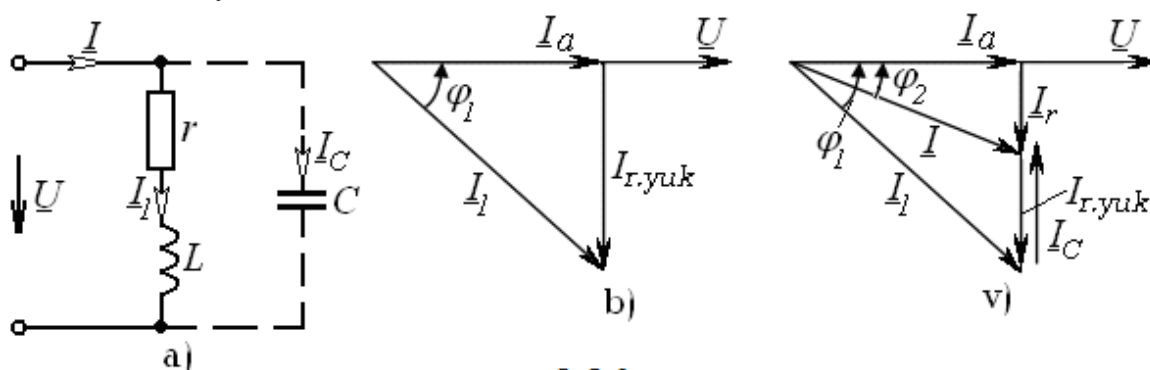
Elektr uskuna quvvat ko'effitsiyentini oshirishning uchta usuli mavjud:

1. Induktiv xarakterli yuklamaga kondensatorlar batareyasini parallel ulash.

2. Induktiv xarakterli yuklamaga kondensatorlar batareyasini ketma-ket ulash.

3. Elektr tarmog'iga sinxron motor ulash.

Quyida birinchi usulga binoan qo'llaniladigan kondensatorlar batareyasi sig'imini hisoblash uslubini ko'rib chiqamiz. 2.26- rasmdagi vektor diagrammadan I tok bilan U kuchlanish orasidagi kerakli burchak siljishini hosil qilish uchun sig'imi shoxobchadagi I_C tok yuklamani kompensatsiya qilinishidan avvalgi reaktiv tashkil etuvchi $I_{r,yuk}$ tokidan kompensatsiya qilingandan keyingi I_r toklar ayirmasi teng bo'lishi kerak, ya'ni: $I_C = I_{r,yuk} - I_r$.



2.26 - rasm

Bu ifodadagi toklarni yuklama tokining aktiv tashkil etuvchisi I_a orqali quyidagicha ifodalash mumkin:

$$I_{r,yuk} = I_a \operatorname{tg} \varphi_{yuk} \text{ va } I_r = I_a \operatorname{tg} \varphi.$$

Natijada quyidagilarni yozish mumkin:

$$I_C = I_a (\operatorname{tg} \varphi_{yuk} - \operatorname{tg} \varphi).$$

Bu ifodada kondensator uchun $I_C = U\omega C$ ekanligi va I_a tokni quvvat va kuchlanish orqali ifodalab, ifodani quyidagicha yozishimiz mumkin:

$$U\omega C = (P/U) (\operatorname{tg} \varphi_{yuk} - \operatorname{tg} \varphi).$$

Oxirgi ifodadan kondensator batareyasi sig'imini topamiz:

$$C = \frac{P(\operatorname{tg} \varphi_{yuk} - \operatorname{tg} \varphi)}{\omega U^2}.$$

Odatda kondensatorlar batareyalari yordamida quvvat ko'effitsiyenti (0,92–0,96) gacha oshiriladi. Quvvat ko'effitsiyentini bundan katta bo'lishi qo'shimcha kondensatorlar ulashni taqoza etadi, bu esa texnik iqtisodiy ko'rsatgichlarga ko'ra maqsadga muvofiq emas.

Masala. Elektr motori kuchlanishi $U_{nom} = 220\text{ V}$ va chastotasi $f = 50\text{ Hz}$ bo'lgan manbaga ulangan.

Motor quvvati $P_{nom} = 20\text{ kVt}$ va quvvat koeffitsiyenti $\cos\varphi_1 = 0,6$.
Uskuna $\cos\varphi_2 = 0,9$ quvvat koeffitsiyenti bilan ishlashi uchun motorga qanday sig'imli kondensator ulash kerak bo'ladi?

Yechish. Quvvat koeffitsiyenti $\cos\varphi = 0,6$ da motor toki:

$$I = P / (U \cos \varphi_1) = 20 \cdot 10^3 / (220 \cdot 0,6) = 152\text{ A},$$

Elektr motoriga kondensator ulanishidan avval va keyin kuchlanish va tok orasidagi burchak mos ravishda: $\varphi_1 = \arccos 0,6 = 53^\circ 10'$ va $\varphi_2 = \arccos 0,9 = 26^\circ 50'$.

Motorga ulanadigan kondensator sig'imi:

$$C = \frac{P(tg \varphi_1 - tg \varphi_2)}{\omega U^2} = \frac{20 \cdot 10^3 (tg 53^\circ 10' - tg 26^\circ 50')}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 220^2} = 1130\text{ mkF}$$

Kondensator ulanagandan keyingi umumiy tok qiymati:

$$I_c = \frac{P}{(U \cos \varphi_2)} = \frac{20 \cdot 10^3}{220 \cdot 0.9} = 77.6\text{ A}.$$

Nazorat savollari

1. Sinusoidal tokni o'zgaras tokka nisbatan afzalliklarini aytib bering. 2. Sinusoidal kattalik(EYK, tok, kuchlanish)larni tavsiflovchi asosiy ko'rsatkichlarga nimalar kiradi? 3. Sinusoidal EYK qanday hosil qilinadi? 4. Sinusoidal EYK, tok va kuchlanishlarning ta'sir etuvchi(effektiv) va o'rtacha qiymatlari qanday aniqlanadi? 5. Sinusoidal kattaliklarning amplituda va shakl koeffitsiyentlari qanday hisoblanadi? 6. Sinusoidal kattaliklarni aylanuvchi vektorlar bilan tasvirlashning mohiyatini tushuntirib bering. 7. Sinusoidal kuchlanish va tok vektorlari orasidagi faza siljish burchagi deganda nima tushuniladi? 8. Aktiv, induktiv, sig'im, reaktiv va to'la qarshiliklar ifodalarini yozing va ma'nolarini tushuntirib bering. 9. Qarshiliklar, toklar va kuchlanishlar uchburchaklari nima? 10. Aktiv, reaktiv va to'la quvvatlar elektr zanjirninig qanday xususiyatlarini tavsiflaydi? Quvvatlar uchburchagi nima? 11. Sinusoidal kattaliklarni kompleks tekislikda vektorlar bilan tasvirlash qanday amalga oshiriladi va u qanday qulayliklar tug'diradi? 12. Zanjirning kompleks to'la qarshiligi va o'tkazuvchanligi nima? 13. Om, Kirxgof qonunlarining kompleks shakllarini yozib bering. 14. Kompleks quvvat va kompleks quvvatlar balansi nima? 15. Sinusoidal tok zanjirlarini kompleks usulda hisoblash ketma-ketligini aytib bering. 16. Elektr zanjirida tebranish konturi nima? 17. Elektr zanjirlarida rezonans hodisasi nima va uni mexanikadagi rezonans bilan taqqoslang? 18. Rezonans shartlari nima? 19. Kuchlanishlar rezonansi nima va uni hosil qilish usullarini so'zlab bering? 20. Toklar rezonansi nima va uni hosil qilish usullarini ayting? 21. Tebranish konturining to'lqin qarshiligi va asllik koeffitsiyenti nima? 22. Rezonans hodisasining amaliy ahamiyatini ayting. 23. Quvvat koeffitsiyenti va uning amaliy ahamiyati haqida nimalarni bilasiz?

3- BOB. INDUKTIV BOG‘LANGAN ZANJIRLAR

3.1. Umumiy ma'lumotlar

Agar elektr zanjirning bir g‘altagidagi tok o‘zgarishi zanjirning boshqa g‘altagida EYK paydo bo‘lishiga sabab bo‘lsa, u holda bu g‘altaklar *o‘zaro induktiv bog‘langan*, paydo bo‘ladigan EYK esa *o‘zaro induksiya EYKi deyiladi*. Zanjirni hisoblashda unda mavjud bo‘lgan o‘zaro induktiv bog‘lanishni inobatga olmaslik katta xatoliklarga olib keladi.

Ikki g‘altakning induktiv bog‘lanish darajasi bog‘lanish koeffitsiyenti yordamida tavsiflanadi:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}},$$

bu ifodada M - zanjir elementlarining o‘zaro induktivligi, L_1 va L_2 -zanjir g‘altaklarining xususiy induktivliklari.

Induktiv bog‘lanish koeffitsiyenti har doim birdan kichik bo‘lishligini ko‘rib chiqamiz.

Nisbatan katta o‘lchamli ikkita induktiv g‘altak berilgan bo‘lsin (3.1-rasm). G‘altaklar har bir o‘rami bir xil magnit oqimi bilan ilashgan bo‘lsin. 3.1- rasm, a da birinchi g‘altakdan i_1 tok o‘tgan holat uchun magnit maydonining tasviri ko‘rsatilgan. Birinchi g‘altak o‘ramlari o‘zinduksiya magnit oqimi Φ_{11} , ikkinchi g‘altak o‘ramlari esa o‘zaro induksiya magnit oqimi Φ_{12} , bilan ilashgan. *O‘zinduksiya* – bu konturdan o‘tayotgan elektr toki magnit maydonining o‘zgarishi natijasida shu konturda yuzaga keladigan elektromagnit induksiya(elektr yurituvchi kuch hosil bo‘lishi)dir. *O‘zaro induksiya* – bu bir konturda u bilan induktiv bog‘langan boshqa konturlardagi elektr toklari magnit maydonlarining o‘zgarishi natijasida yuzaga keladigan elektromagnit induksiya(elektr yurituvchi kuch hosil bo‘lishi)dir.

Birinchi va ikkinchi g‘altaklar o‘zinduksiya va o‘zaro induksiya ilashish magnit oqimlari quyidagicha aniqlanadi:

$$\psi_{11} = w_1 \Phi_{11}, \quad \psi_{21} = w_2 \Phi_{21},$$

bunda w_1 va w_2 - g‘altaklardagi o‘ramlar soni.

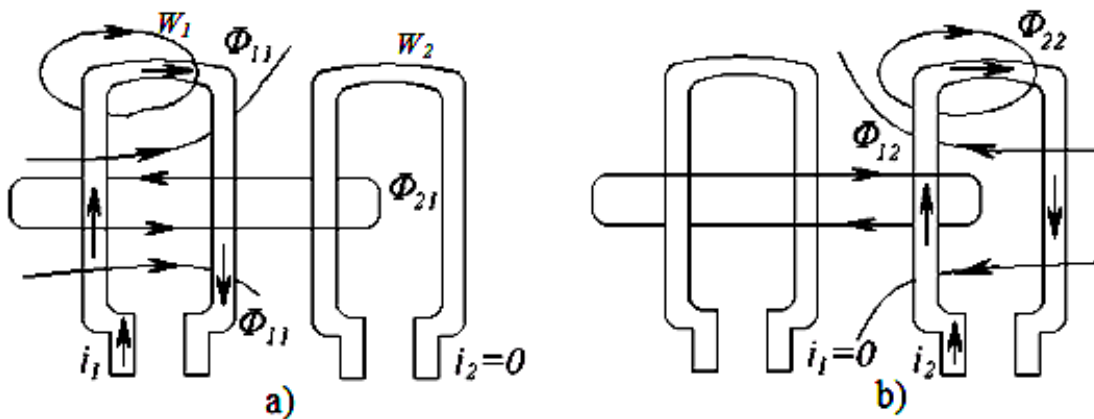
O‘zaro induksiya oqimlari (Φ_{21} va Φ_{12}) va ilashish oqimlari (ψ_{21} va ψ_{12}) indeksidagi birinchi raqam oqimning qaysi kontur bilan ilashayotganligini, ikkinchisi esa shu oqimni hosil qilgan tok qaysi konturga tegishliligini bildiradi.

Ta’rif bo‘yicha birinchi g‘altak induktivligi va g‘altaklar o‘zaro induktivligi quyidagilarga teng:

$$L_1 = \frac{\psi_{11}}{i_1} = \frac{w_1 \Phi_{11}}{i_1},$$

$$M = M_{21} = \left| \frac{\psi_{21}}{i_1} \right| = \left| \frac{w_2 \Phi_{21}}{i_1} \right|.$$

Gʻaltakdan oʻtadigan tok va oʻzinduksiya magnit oqimining musbat yoʻnalishlarini oʻng parma qoidasiga koʻra aniqlaymiz, shuning uchun $i_1 > 0$ boʻladi va ψ_{11}/i_1 nisbat har doim musbat qiymatga ega. Oʻzaro induksiya oqimining musbat yoʻnalishi esa ixtiyoriy va shuning uchun ψ_{21}/i_1 nisbat (musbat yoki manfiy) ishorali boʻlishi mumkin.



3.1- rasm

3.1- rasm, *b* da faqat ikkinchi gʻaltakdan i_2 tok oʻtayotgan holat uchun magnit maydonining tasviri berilgan. Taʼrif boʻyicha:

$$L_2 = \frac{\psi_{22}}{i_2} = \frac{w_2 \Phi_{22}}{i_2}, \quad M = M_{12} = \left| \frac{\psi_{12}}{i_2} \right| = \left| \frac{w_1 \Phi_{12}}{i_2} \right|.$$

Amalda ikki gʻaltak oʻramlari bir xil boʻlmagan (bir-biridan farq qiladigan) magnit oqimlari bilan ilashadi, shuning uchun har doim $k < 1$ boʻladi.

Oʻzaro induktiv bogʻlanish koeffitsiyenti qiymatini gʻaltaklarni bir-biriga nisbatan siljitish bilan oʻzgartirish mumkin. Amaliyotda oʻzaro induktiv bogʻlanishni oʻzgartirish uchun gʻaltaklari bir-biriga nisbatan siljishi mumkin boʻlgan asbob—*variometr* dan foydalaniladi.

3.2. Oʻzaro induksiya EYK

Induktiv bogʻlangan gʻaltaklar biridagi tok oʻzgarsa, boshqa gʻaltakda oʻzaro induksiya EYKi paydo boʻladi. Oʻzaro induksiya (elektromagnit

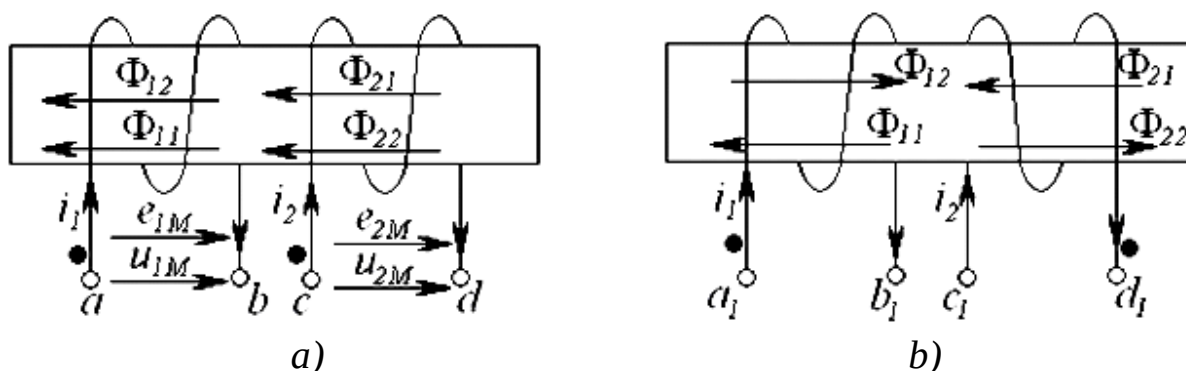
induksiya qonuni) tufayli g'altaklarda paydo bo'ladigan EYK va kuchlanish absolyut qiymati mos ravishda quyidagilarga teng:

$$|u_{1M}| = |e_{1M}| = \left| \frac{d\psi_{12}}{dt} \right| = \left| M \frac{di_2}{dt} \right|, \quad |u_{2M}| = |e_{2M}| = \left| \frac{d\psi_{21}}{dt} \right| = \left| M \frac{di_1}{dt} \right|.$$

Bu kattaliklar ishoralarini aniqlash uchun o'zaro bog'langan zanjir elementlarining bir xil nomlangan bosh yoki oxirgi qismlarini topish kerak. Bunda quyidagi qoida o'rinalidir:

"Agar qismalarga nisbatan bir xil yo'nalishda o'tadigan tokdan har bir elementda hosil bo'ladigan o'zinduksiya va o'zaro induksiya magnit oqimlari qo'shilsa, u holda bu qismalar induktiv bog'langan ikkita elementning bir xil nomlangan qismlari deyiladi".

Bu qoida asosida 3.2- rasm, a da keltirilgan g'altaklar qismlari belgilangan. i_1 tok a qismadan b qismaga yo'nalgan bo'lsa va i_2 tok c qismadan d qismaga yo'nalgan bo'lsa, o'zinduksiya magnit oqimi Φ_{11} (Φ_{22}) va o'zaro induksiya magnit oqimi Φ_{12} (Φ_{21}) bilan qo'shiladi. Shuning uchun a qisma bilan c qisma bir xil nomlangan bo'ladi, xuddi shunday b qisma d qisma bilan bir xil nomlangan bo'ladi.



3.2- rasm

3.2- rasm, b dagi g'altaklar uchun a_1 va d_1 hamda b_1 va c_1 bir xil nomlangan qismalar bo'ladi.

Avvalgi holatdan farqli joyi shundaki, 2- g'altak simining o'ralish yo'nalishi 1- g'altak simining o'ralish yo'nalishiga qarama-qarshidir.

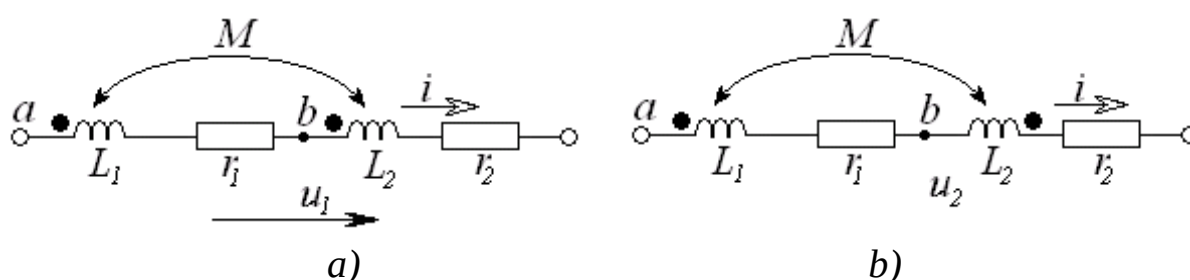
Bir xil nomlangan ikkita juft qismlardan biri maxsus belgilar: nuqta yoki yulduzcha bilan belgilanadi.

3.3. Ketma-ket va parallel ulangan o'zaro induktiv bog'langan zanjirlar

1. Induktiv bog'langan g'altaklarni o'zaro ketma-ket ulanishi. Bunday ulanish ikki xil bo'lishi mumkin: mos yoki qarama-qarshi ulanish.

Mos ulangan g'altaklarda toklar bir xil nomli qismalarga nisbatan bir xil yo'nalgan bo'ladi (3.3- rasm, a). Qarama-qarshi ulangan g'altaklarda toklar yo'nalishi bir xil nomlangan qismalarga nisbatan qarama-qarshi yo'nalgan bo'ladi (3.3-rasm, b).

Kirxgof ikkinchi qonuniga asosan ikkita induktiv g'altaklari o'zaro mos ulangan zanjir uchun elektr muvozanat tenglamasini tuzamiz. Tok musbat yo'nalishi va konturni aylanib chiqish yo'nalishi bir xil, deb faraz qilaylik. Induktiv bog'langan elementlari bo'lgan elektr zanjirlarini bevosita hisoblash uchun zanjirlarni hisoblashning avval ko'rib o'tilgan usullardan foydalanish mumkin, faqat tugun potentsiallar usulini qo'llash uchun ba'zi bir qo'shimcha qoidalardan foydalanishga to'g'ri keladi.



3.3-rasm

O'zaro bog'langan ikkita induktiv g'altak ketma-ket va induktiv jihatdan mos ulanganda zanjir differensial tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$u = r_1 i + L_1 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} + r_2 i + L_2 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt}.$$

Kompleks shaklda esa:

$$\underline{U} = r_1 \underline{I} + j\omega L_1 \underline{I} + j\omega M \underline{I} + j\omega L_2 \underline{I} + r_2 \underline{I} + j\omega M \underline{I} = \underline{Z}_{mos} \underline{I},$$

bunda $\underline{Z}_{mos} = r_1 + r_2 + j(\omega L_1 + \omega L_2 + 2\omega M) = r_1 + r_2 + j(x_1 + x_2 + 2x_M)$,
 $x_M = \omega M$ -o'zaro induktiv qarshilik.

Mos ulangan zanjir uchun vektorlar diagrammasi 3.4- rasm, a da keltirilgan.

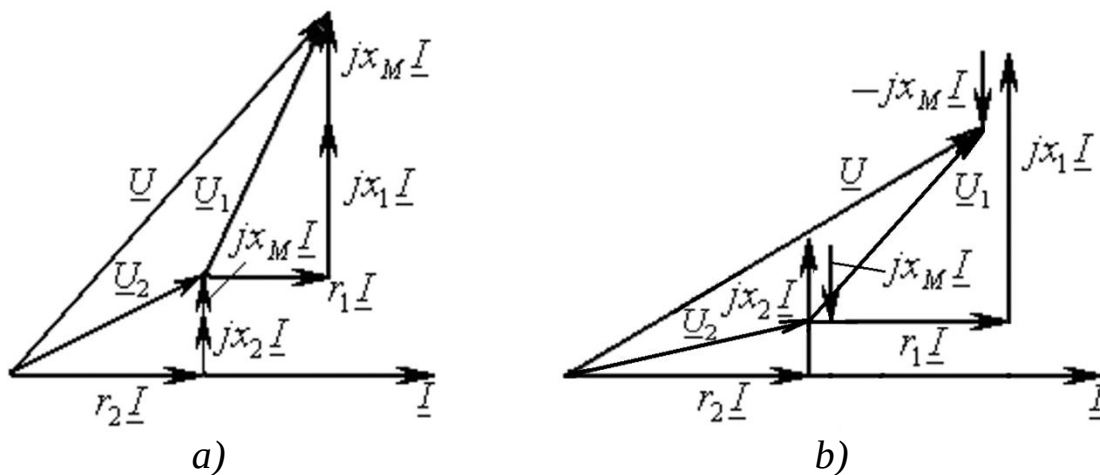
G'altaklar ketma-ket va o'zaro qarama-qarshi ulanganda elektr muvozanat tenglamasi differensial shaklda quyidagicha yoziladi:

$$u = r_1 i + L_1 \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt} + r_2 i + L_2 \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt},$$

kompleks shaklda esa:

$$\underline{U} = r_1 \underline{I} + j\omega L_1 \underline{I} - j\omega M \underline{I} + r_2 \underline{I} + j\omega L_2 \underline{I} - j\omega M \underline{I} = \underline{Z}_{q.q} \underline{I},$$

bunda $\underline{Z}_{q.q} = r_1 + r_2 + j(\omega L_1 + \omega L_2 - 2\omega M) = r_1 + r_2 + j(x_1 + x_2 - 2x_M)$.

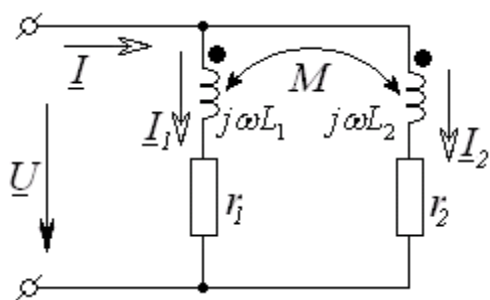


3.4- rasm

Ketma-ket va induktiv jihatdan qarama-qarshi ulangan zanjir uchun vektorlar diagrammasi 3.4- rasm, b da keltirilgan.

Induktiv bogʻlangan gʻaltaklar oʻzaro mos ulangandagi toʻla qarshiligi ular oʻzaro qarama-qarshi ulangandagiga nisbatan katta boʻladi. Bu xususiyatdan oʻzaro induktiv bogʻlangan gʻaltaklar bir xil nomlangan qismalarini, masalan, uch fazali transformatorlar va motorlar choʻlgamlarini aniqlashda foydalaniladi.

2. Induktiv bogʻlangan gʻaltaklarni oʻzaro parallel ulanishi. Ikkita oʻzaro induktiv bogʻlangan gʻaltaklarni parallel ulanishi (3.5- rasm)ni tahlil qilish uchun Kirxgof 1- va 2- qonunlariga, differensial va kompleks shakllarda muvozanat tenglamalarini tuzamiz:



3.5- rasm

$$i = i_1 + i_2,$$

$$u = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt},$$

$$u = r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt},$$

$$I = I_1 + I_2,$$

$$\underline{U} = r_1 \underline{I}_1 + jx_1 \underline{I}_1 \pm jx_M \underline{I}_2,$$

$$\underline{U} = r_2 \underline{I}_2 + jx_2 \underline{I}_2 \pm jx_M \underline{I}_1.$$

yoki

$$\left. \begin{aligned} \underline{U} &= \underline{Z}_1 \underline{I}_1 \pm \underline{Z}_M \underline{I}_2 \\ \underline{U} &= \underline{Z}_2 \underline{I}_2 \pm \underline{Z}_M \underline{I}_1 \end{aligned} \right\},$$

bunda $\underline{Z}_1 = r_1 + jx_1$, $\underline{Z}_2 = r_2 + jx_2$, $\underline{Z}_M = \pm jx_M$.

Agar oʻzinduksiya va oʻzaro induksiya magnit oqimlari yoʻnalishlari mos tushsa, u holda x_M "musbat", aks holda, esa - "manfiy" ishora bilan olinadi. Soʻnggi tenglamalar sistemasini I_1 va I_2 toklarga nisbatan yechib, quyidagi ifodalarni hosil qilamiz:

$$\underline{I}_1 = \underline{U} \frac{\underline{Z}_2 \mp \underline{Z}_M}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}, \quad \underline{I}_2 = \underline{U} \frac{\underline{Z}_1 \mp \underline{Z}_M}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}.$$

Umumiy tok $\underline{I}$ esa:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \underline{U} \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \mp 2\underline{Z}_M}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}.$$

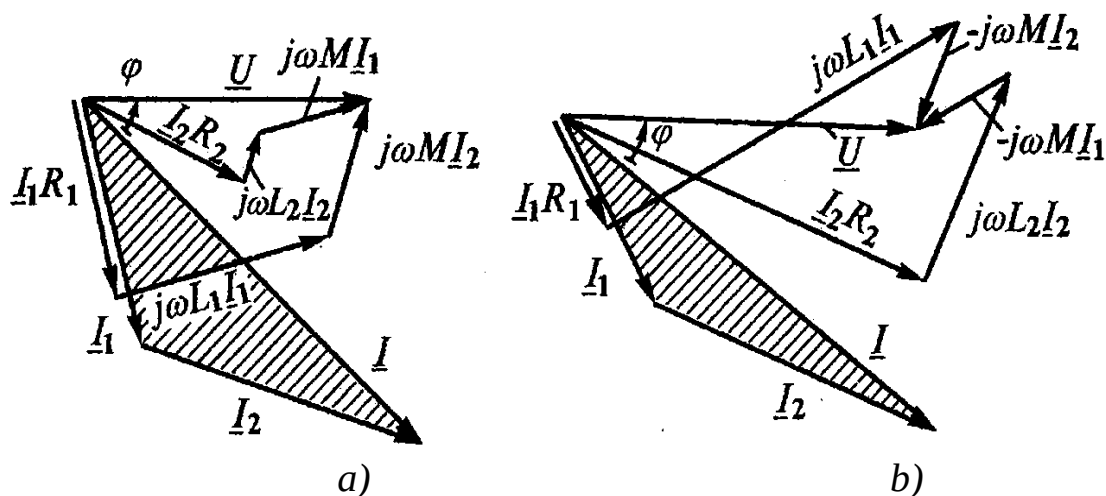
Bundan zanjirning kirish qarshiligi:

$$\underline{Z}_{kir} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \mp 2\underline{Z}_M}.$$

Agar $\underline{Z}_M = 0$ bo'lsa, ya'ni induktiv bog'lanish bo'lmasa, unda $\underline{Z}_{kir} = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$ ga teng bo'ladi.

Agar $r_1 = r_2 = 0$ bo'lsa, u holda:

$$L_{ekv} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_2 \mp M}, \quad L_{ekv} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 \mp M}, \quad L = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \mp 2M}.$$



3.6- rasm

3.6- rasmda o'zaro parallel ulangan va induktiv bog'langan ikkita g'altak vektor diagrammalari qurilgan: a) - mos; b) - qarama-qarshi ulangan zanjirlar uchun. Vektor diagrammalarni qurishda manba kuchlanishi vektori $\underline{U}$ ning boshlang'ich fazasi nolga teng deb olingan.

3.4. O‘zaro induktiv bog‘langan zanjirlarni hisoblash

Tarmoqlangan induktiv bog‘langan zanjirlarni Kirxgof birinchi va ikkinchi qonunlari asosida yoki kontur toklar usulida hisoblash mumkin. Tugun potentsiallar usulini bevosita qo‘llab bo‘lmaydi, chunki bir shoxobchadagi tok nafaqat shu shoxobchadagi EYK va shoxobcha ulangan tugunlar potentsiallariga, balki boshqa induktiv bog‘langan shoxobchalardagi toklar o‘zgarishiga ham bog‘liqdir. Ekvivalent generator usulini esa, faqat ikki qutblikka tegishli bo‘lmagan shoxobcha ikki qutblik tarkibiga kiradigan boshqa shoxobcha bilan induktiv bog‘lanmagan elektr zanjirlarini hisoblashda qo‘llash mumkin.

Hisoblash usullarini chegaralaydigan hollardan ozod bo‘lish uchun ba’zi bir hollarda induktiv bog‘lanishni sxemadan bartaraf etadigan ekvivalent sxemalariga o‘tish zarur bo‘ladi.

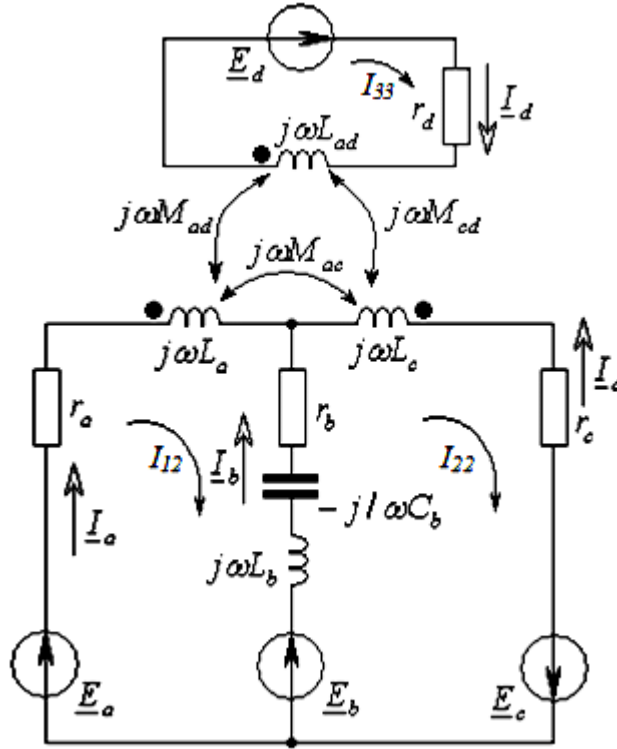
Kirxgof ikkinchi qonuniga ko‘ra tenglama tuzishda o‘zaro induksiya EYKi mos kuchlanish kabi hisobga olinadi. Masalan, k elementdagi kompleks $\pm j\omega M_{ks} \underline{I}_s$ kuchlanish ishorasi k elementini aylanib chiqishda s -elementdagi tokni musbat yo‘nalishini ham nazarda tutib belgilanadi. Agar bir xil nomlangan qismlarga nisbatan aylanib chiqish yo‘nalishi bir xil bo‘lsa, u holda $j\omega M_{ks} \underline{I}_s$ ishorasi "musbat", aks holda esa -"manfiy" o‘linadi.

Misol tariqasida 3.7- rasmda keltirilgan zanjir uchun Kirxgof birinchi va ikkinchi qonunlari asosida tenglamalar tuzamiz. Tenglamalardagi kuchlanishlar ifodalarini konturdagi elementlar joylashish tartibiga ko‘ra yozamiz:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c &= 0, \\ r_a \underline{I}_a + j\omega L_a \underline{I}_a + j\omega M_{ac} \underline{I}_c - j\omega M_{ad} \underline{I}_d - r_b \underline{I}_b + \frac{j\underline{I}_b}{\omega C_b} - j\omega L_b \underline{I}_b &= \underline{E}_a - \underline{E}_b, \\ j\omega L_b \underline{I}_b + \frac{j\underline{I}_b}{\omega C_b} + r_b \underline{I}_b - j\omega L_c \underline{I}_c + j\omega M_{ac} \underline{I}_a - j\omega M_{cd} \underline{I}_d - r_c \underline{I}_c &= \underline{E}_b + \underline{E}_c, \\ r_d \underline{I}_d + j\omega L_d \underline{I}_d - j\omega M_{ad} \underline{I}_a + j\omega M_{cd} \underline{I}_c &= \underline{E}_d. \end{aligned} \right\}$$

Kirxgof 2- qonuniga asosan tuzilgan kontur toklar tenglamalari sistemasini ham keltiramiz:

$$\left[r_a + r_b + j \left(\omega L_a + \omega L_b - \frac{1}{\omega C_b} \right) \right] \underline{I}_{12} - \left[r_b - j \left(\omega L_b - \frac{1}{\omega C_b} \right) \right] \cdot \underline{I}_{22} - j\omega M_{ad} \underline{I}_{33} = \underline{E}_a - \underline{E}_b;$$



3.7- rasm

$$\begin{aligned}
 & - \left[r_b - j \left(\omega L_b - \frac{1}{\omega C_b} \right) \right] I_{11} + \left[r_b + r_c + j \left(\omega L_b + \omega L_c - \frac{1}{\omega C_b} \right) \right] \cdot \\
 & \cdot I_{22} - j\omega M_{cd} I_{33} = E_b + E_c; \\
 & - j\omega M_{ab} I_{11} - j\omega M_{cd} I_{22} + (r_a + \omega L_d) I_{33} = E_d;
 \end{aligned}$$

Bu tenglamalarni quyidagicha ko‘rinishda yozish mumkin:

$$\left. \begin{aligned}
 \underline{Z}_{11} I_{11} + \underline{Z}_{12} I_{22} + \underline{Z}_{13} I_{33} &= \underline{E}_1 \\
 \underline{Z}_{21} I_{11} + \underline{Z}_{22} I_{22} + \underline{Z}_{23} I_{33} &= \underline{E}_2 \\
 \underline{Z}_{31} I_{11} + \underline{Z}_{32} I_{22} + \underline{Z}_{33} I_{33} &= \underline{E}_3
 \end{aligned} \right\}$$

Bunda $\underline{Z}_{11}$, $\underline{Z}_{22}$ va $\underline{Z}_{33}$ - 1- , 2- va 3- konturlar xususiy kompleks qarshiliklari, $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}$; $\underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{32}$ va $\underline{Z}_{31} = \underline{Z}_{13}$ - 1- va 2-, 2- va 3-, 3- va 1- yondosh konturlar o‘zaro kompleks qarshiliklari; E_1 , E_2 , E_3 ,-birinchi, ikkinchi va uchinchi konturlar kompleks EYK lari.

Misol uchun:

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_{11} &= r_a + r_b + j \left(\omega L_a + \omega L_b - \frac{1}{\omega C_b} \right), \underline{Z}_{12} = - \left[r_b - j \left(\omega L_b - \frac{1}{\omega C_b} \right) \right], \\
 \underline{Z}_{13} &= -j\omega M_{ad}; \quad \underline{E}_1 = E_a - E_b.
 \end{aligned}$$

Induktiv bog‘langan zanjirlar uchun ham o‘zarolik xossasi o‘rinlidir. Bu holat o‘zgarmas tok zanjirlari uchun o‘zarolik xossasining qo‘llanishi kabi tushuntiriladi.

1-masala. Induktiv bog‘langan zanjir(masalan, avtotransformator)ning (3.8- rasm) 1-1' qismlari sinusoidal kuchlanish manbaiga ulangan. Yuklama ulanmagan chiqish qismlaridagi kuchlanish topilsin.

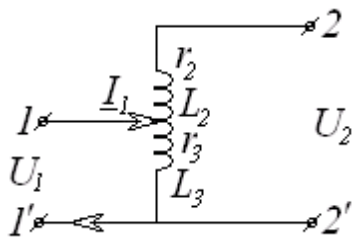
Berilgan: $r_2 = r_3 = 3 \Omega$; $\omega L_2 = \omega L_3 = 4 \Omega$; $\omega M = 2 \Omega$; $U_1 = 10 \text{ V}$.

Yechish. Kirish kuchlanishi $\underline{U}_1 = U_1 = 10 \text{ V}$. Kirish tokini hisoblaymiz:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{(r_3 + j\omega L_3)} = \frac{10}{(3 + j4)} = 1,2 - j1,6 \text{ A}$$

$\underline{U}_2$ chiqish kuchlanishi zanjir 2- qismasidan 2'- qismasigacha bo‘lgan kuchlanishlar yig‘indisidan iborat, ya’ni:

$$\underline{U}_2 = j\omega M \underline{I}_1 + \underline{U}_1 = j2(1,2 - j1,6) + 10 = 13,2 + j2,4 \text{ V}.$$



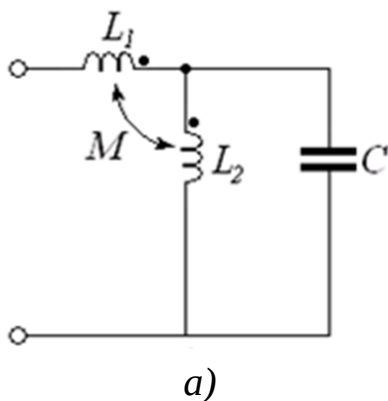
3.8- rasm

Agar L_2 induktivlik pastki qismasi L_3 induktivlik yuqori qismasi bilan bir xil nomlangan bo‘lsa, u holda L_2 va L_3 elementlardan o‘tuvchi toklar bir xil nomlangan qismlarga nisbatan har xil yo‘nalishda bo‘ladi. Shuning uchun $j\omega M \underline{I}_1$ had

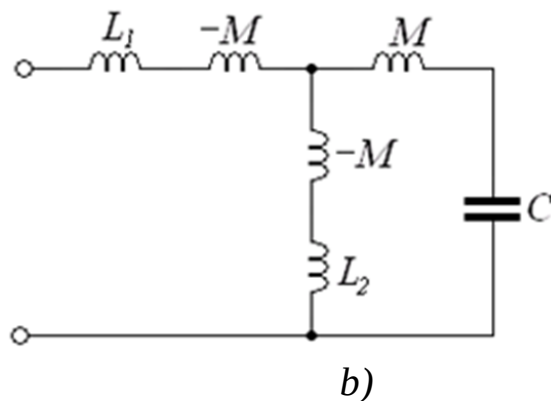
$\underline{U}_2$ kuchlanish ifodasiga minus ishora bilan qo‘shilar edi va bu holatda:

$$\underline{U}_2 = -j\omega M \underline{I}_1 + \underline{U}_1 = -j2(1,2 - j1,6) + 10 = -6,8 - j2,4 \text{ V}.$$

2-masala. Parametrlari $x_{L1} = 10 \Omega$, $x_{L2} = 5 \Omega$, $x_M = 5 \Omega$, $x_C = 10 \Omega$ bo‘lgan zanjir (3.9- rasm, a) kompleks kirish qarshiligini aniqlang.



a)



b)

3.9- rasm

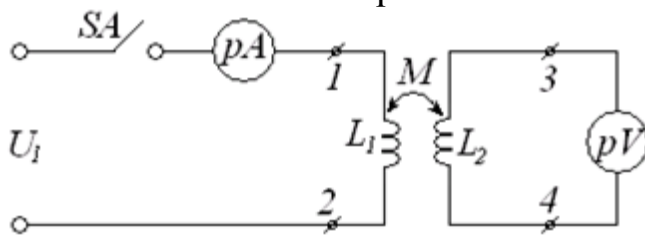
Yechish. Bir xil nomlangan qismlar bitta tugunga ulanganligini hisobga olib, zanjirni induktiv bog‘lanishsiz ko‘rinishga keltiramiz (3.9- rasm, b).

Hosil bo'lgan zanjir kirish qarshiligining kompleks qiymatini aniqlaymiz:

$$\underline{Z}_{kir} = jx_{L1} - jx_M + \frac{(jx_M - jx_C)(jx_{L2} - jx_M)}{jx_M - jx_C + jx_{L2} - jx_M} = j5 = 5e^{j90^\circ} \text{ Om.}$$

3.5. Ikki konturli o'zaro induktiv bog'langan zanjirda bir xil nomlangan qismlarni va o'zaro induktivlikni aniqlash usullari

Induktiv bog'langan g'altaklar bir xil nomlangan qismlarini aniqlash generatorlar, transformatorlar, elektr motorlari va bir qator radiotexnik hamda elektr o'lchash qurilmalarini normal ishlatish uchun zarur bo'ladi.



3.10-rasm

Ikkita o'zaro induktiv bog'langan g'altaklar bir xil nomli qismlarini tajribada aniqlash juda oson. Buning uchun 3.10- rasmdagi sxemaga binoan o'zgarmas tok manbaining "+" belgisi

qismasini birinchi g'altakning 1 belgisi qismasiga, 2 belgisi qismasini esa, manbaining "-" ishorali qismasiga ulanadi. Noli o'rtada joylashgan o'zgarmas tok voltmetri ikkinchi induktiv g'altakka ulanadi. Agar SA kalit ulanganda voltmetr mili (strelkasi) musbat yo'nalishga, ya'ni o'ngga burilsa, u holda ikkinchi induktiv g'altakning bir xil nomli qismasi 3 bo'ladi. Agar voltmetr strelkasi manfiy yo'nalishga, ya'ni chapga burilsa, u holda bir xil nomli qisma 4 bo'ladi.

1) Ikkita g'altak orasidagi o'zaro induktivlikni aniqlashning birinchi usuli. Salt ish rejimida ikkinchi induktiv g'altak qismalarida hosil bo'lgan U_2 kuchlanishni birinchi g'altak chulg'amidan o'tayotgan I_1 tokka nisbatini olib, undan o'zaro induktiv qarshilik x_M ni va o'zaro induktivlik M ni hisoblash mumkin. Ya'ni $x_M = U_2 / I_1$; $x_M = \omega M$ va bundan $M = x_M / \omega$. Yoki birinchi induktiv g'altak cho'lg'amida hosil bo'lgan kuchlanish U_1 ni ikkinchi g'altakdan o'tayotgan I_2 tok qiymatiga bo'lib, o'zaro induktiv qarshilik x_M va o'zaro induktivlik M ni aniqlash mumkin: $x_M = U_1 / I_2$; $x_M = \omega M$; $M = x_M / \omega$.

2) o'zaro induktivlikni aniqlashning ikkinchi usuli. Buning uchun 3.11-rasmda keltirilgan sxemani yig'amiz va U kuchlanish, I tok va P aktiv quvvatlarni o'zaro induktiv bog'langan ikkita g'altak ketma-ket va mos hamda ketma-ket va qarama-qarshi ulangan holatlarida o'lchaymiz. O'lchash natijalari asosida quyidagilarni hisoblaymiz:

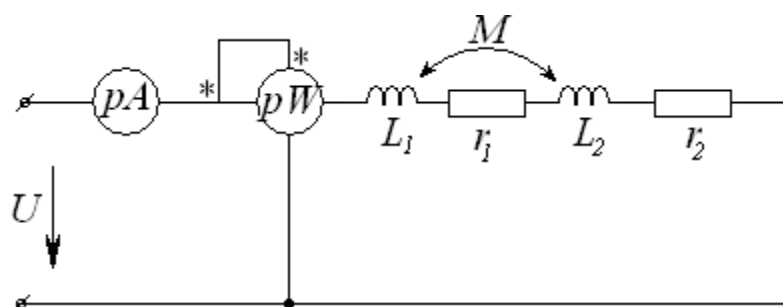
$$\cos \varphi_{mos} = \frac{P_{mos}}{UI_{mos}}; \cos \varphi_{q.q.} = \frac{P_{q.q.}}{UI_{q.q.}},$$

$$Z_{mos} = \frac{U}{I_{mos}} = \sqrt{r_{mos}^2 + x_{mos}^2} = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + \omega^2(L_1 + L_2 + 2M)^2},$$

$$r_{mos} = r_1 + r_2 = Z_{mos} \cos \varphi_{mos}; \quad x_{mos} = \omega(L_1 + L_2 + 2M) = Z_{mos} \sin \varphi_{mos},$$

$$Z_{q.q.} = \frac{U}{I_{q.q.}} = \sqrt{r_{q.q.}^2 + x_{q.q.}^2} = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + \omega^2(L_1 + L_2 - 2M)^2},$$

$$r_{q.q.} = r_1 + r_2 = Z_{q.q.} \cos \varphi_{q.q.}; \quad x_{q.q.} = \omega(L_1 + L_2 - 2M) = Z_{q.q.} \sin \varphi_{q.q.}.$$



3.11- rasm

Bu ifodalarda “mos” indeksi-g‘altaklar o‘zaro induktiv jihatdan mos, “q.q.” - indeksi esa, g‘altaklar o‘zaro induktiv jihatdan qarama-qarshi ulanishga taalluqli. x_{mos} va $x_{q.q.}$ ifodalardan quyidagini yozishimiz mumkin $x_{mos} - x_{q.q.} = 4\omega M$. Bundan o‘zaro induktivlik quyidagicha hisoblanadi: $M = (x_{mos} - x_{q.q.}) / 4\omega$. Bog‘lanish koeffitsiyenti esa $k = M / \sqrt{L_1 L_2}$ ga teng bo‘ladi.

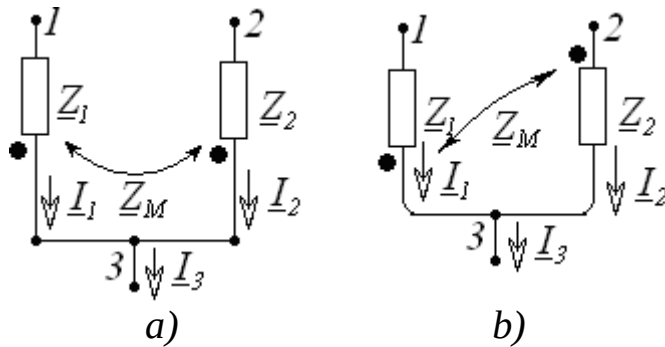
3.6. Induktiv bog‘langan zanjirlarning ekvivalent ajralgan sxemalari

Induktiv bog‘langan zanjirlarni tahlil etish va hisoblash birmuncha qiyinchiliklar tug‘diradi. Hisoblashni soddalashtirish maqsadida induktiv bog‘langan zanjirlarni ekvivalent almashtirish usuli qo‘llaniladi.

3.12- rasm, a da keltirilgan o‘zaro induktiv bog‘langan zanjirni induktiv bog‘lanmagan zanjirga ekvivalent almashtirishni tahlil qilaylik. Bunda bo‘lishi mumkin bo‘lgan quyidagi ikki holatni ko‘rib chiqamiz:

1. Elementlar bir xil nomlangan qismlari umumiy tugunga ulangan sxema (3.12- rasm, a).

2. Elementlar har xil nomlangan qismalari umumiy tugunga ulangan sxema (3.12- rasm, b).



3.12- rasm

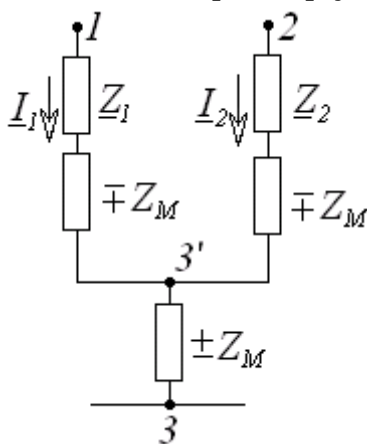
Agar 3- tugunda faqat uchta shoxobcha ulangan bo'lsa, u holda sxemaga qo'shimcha shoxobcha kiritish shart emas.

1 va 3- hamda 2- va 3- qismalar orasidagi kuchlanishlar uchun quyidagi ifodalarni yozish mumkin:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{13} &= \underline{Z}_1 \underline{I}_1 \pm \underline{Z}_M \underline{I}_2, \\ \underline{U}_{23} &= \underline{Z}_2 \underline{I}_2 \pm \underline{Z}_M \underline{I}_1. \end{aligned} \right\}$$

Ushbu tenglamalardagi "+" ishora bir xil nomlangan qismalar ulangan birinchi holatga, "-" ishora esa har xil nomlangan qismalar ulangan ikkinchi holatga mos keladi. Ishoralarning bunday tartibini keyingi ifodalar uchun ham qo'llaymiz.

$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 - \underline{I}_3 = 0$ ifodadan foydalanib, yuqoridagi tenglamalar sistemasi birinchi tenglamasidagi $\underline{I}_2$ tokni, ikkinchi tenglamasidan esa $\underline{I}_1$ tokni istisno qilib, quyidagi tenglamalarni yozish mumkin:



3.13- rasm

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{13} &= (\underline{Z}_1 \mp \underline{Z}_M) \underline{I}_1 \pm \underline{Z}_M \underline{I}_3, \\ \underline{U}_{23} &= (\underline{Z}_2 \mp \underline{Z}_M) \underline{I}_2 \pm \underline{Z}_M \underline{I}_3. \end{aligned} \right\}$$

Bundan tashqari quyidagini hosil qilish mumkin:

$$\underline{U}_{12} = (\underline{Z}_1 \mp \underline{Z}_M) \underline{I}_1 - (\underline{Z}_2 \mp \underline{Z}_M) \underline{I}_2.$$

Yuqorida keltirilgan oxirgi uchta tenglama 3.13- rasmdagi sxema uchun o'rinli va shuning uchun ham bu sxema induktiv bog'lanmagan ekvivalent sxema bo'ladi. Demak, zanjirdagi induktiv bog'lanishni istisno etish uchun $\underline{Z}_1$

va $\underline{Z}_2$ qarshilikli shoxobchalarga $\mp \underline{Z}_M$ qo'shimcha qarshiliklar kiritib, $\underline{3}' - \underline{3}$ tugunlar orasiga esa $\mp \underline{Z}_M$ qarshilikli element kiritish kerak bo'ladi. $\underline{Z}_M$ qarshilik oldidagi "-" ishora bir xil nomlangan qismalar umumiy tugunga ulangan holatga to'g'ri keladi. Induktiv bog'langan elementlar uch qirrali yulduz yoki uchburchak usulida ulangan bo'lsa, yuqorida bayon etilgan ekvivalent almashtirish usulidan foydalanib, induktiv bog'lanishi

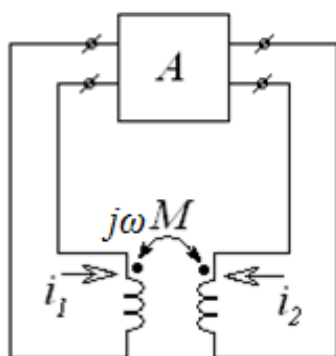
bo'lmagan sxemaga o'tish mumkin. To'rt qirrali yulduz usulida ulangan sxemalarni ekvivalent almashtirish birmuncha murakkab, chunki almashtirish natijasida induktiv bog'langan elementlar umumiy tuguni bo'lmagan shoxobchalarda joylashgan bo'lib qoladi.

3.7. Induktiv bog'langan zanjirlarda energiya uzatish

Ikkita o'zaro induktiv bog'langan elementlarda o'zaro energiya uzatilishini ko'rib chiqamiz. Buning uchun induktiv bog'langan elementlardan tashqari zanjirning qolgan qismini aktiv to'rtqutblik sifatida qaraymiz (3.14-rasm).

Har bir davr mobaynida i_1 va i_2 toklar o'zgarishi natijasida induktiv bog'langan elementlar magnit maydonlari orqali berilayotgan energiya to'rtqutblikka qayta uzatiladi. Agar i_1 va i_2 toklar orasidagi faza siljish burchagi 0 va π oralig'ida bo'lsa, u holda magnit maydonini hosil qilishga sarflanayotgan energiya, maydondan qaytayotgan energiyaga nisbatan ko'proq bo'ladi va aksincha, boshqa elementdan magnit maydoniga berilayotgan energiya maydondan chiqayotgan energiyadan kam bo'ladi. Natijada energiya bir elementdan boshqa elementga uzatilib turadi.

Quyidagi toklar ma'lum bo'lsin: $\underline{I}_1 = I_1 e^{j\psi_1}$ va $\underline{I}_2 = I_2 e^{j\psi_2}$.



3.14- rasm

O'zaro induksiya ta'sirida birinchi va ikkinchi elementlarda ajraladigan kompleks quvvatlar ifodasini quyidagicha yozish mumkin:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{S}_{1M} &= \underline{U}_{1M}^* \underline{I}_1 = j\omega M I_2 I_1 e^{j(\psi_2 - \psi_1)} = \\ &= \omega M I_2 I_1 \cos(\psi_2 - \psi_1) + j\omega M I_2 I_1 \sin(\psi_2 - \psi_1), \\ \tilde{S}_{2M} &= \underline{U}_{2M}^* \underline{I}_2 = -j\omega M \underline{I}_1^* \underline{I}_2 = -\tilde{S}_{1M}^* \end{aligned} \right\}$$

Bundan $P_{1M} = -P_{2M} = \omega M I_2 I_1 \sin(\psi_1 - \psi_2)$.

Sxemada ko'rsatilgan tok va kuchlanishlar musbat yo'nalishida quvvatlar musbat qiymati aktiv to'rtqutblikdan elementlarga berilayotgan energiyaga mos keladi, quvvatlar manfiy qiymati esa, elementdan to'rtqutblikka uzatiladigan energiyaga mos keladi. Lekin o'zaro induksiya ta'sirida paydo bo'ladigan va ikkala elementga berilayotgan aktiv quvvat nolga teng, ya'ni $P_{1M} + P_{2M} = 0$ bo'ladi.

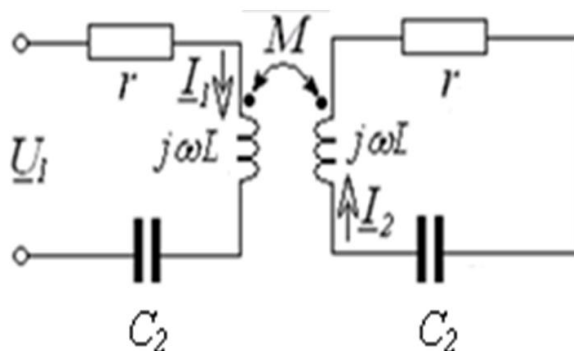
Agar $\pi > \psi_1 - \psi_2 > 0$ bo'lsa, u holda $P_{1M} > 0$, $P_{2M} < 0$, ya'ni fizik nuqtai nazardan, energiya to'rtqutblikdan olinib, birinchi elementdan ikkinchi element orqali yana to'rtqutblikka qayta uzatiladi. Agar

$\pi > \psi_1 - \psi_2 > 0$ bo'lsa, u holda $P_{2M} > 0$ va $P_{1M} < 0$ bo'ladi. Bu holda energiya ikkinchi elementdan birinchi element orqali to'rtqutblikka qayta uzatiladi.

3.8. Induktiv bog'langan konturlarda rezonans

Amaliyotda radiotexnik va elektron qurilmalarda, konturlari o'zaro induktiv yoki sig'im bog'langan zanjirlar keng qo'llaniladi.

Induktiv bog'langan va reaktiv elementlari o'zaro ketma-ket ulangan zanjirdagi rezonans hodisalarini ko'rib chiqamiz (3.15- rasm).



Zanjir rejimi ikkita tenglama bilan aniqlanadi:

$$\begin{cases} (r + jx) \underline{I}_1 - j\omega M \underline{I}_2 = \underline{U}_1 \\ (r + jx) \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_1 = 0, \end{cases}$$

bu yerda $x_1 = \omega L - 1/\omega C$,

Agar konturlar xususiy burchak chastotalari $\omega_1 = \omega_2 = 1/\sqrt{LC} = \omega_0$ va har bir kontur reaktiv qarshiligi $x=0$ bo'lsa, u holda har bir kontur rezonansga sozlangan bo'ladi. Bunday holat *to'la rezonans* deyiladi. Yuqoridagi sistema birinchi tenglamasidan quyidagini keltirib chiqarish mumkin:

$$\underline{I}_{1rez} = \frac{r \underline{U}_1}{(r^2 + \omega_0^2 M^2)}.$$

Zanjir rezonansga sozlanganligi uchun bu tok fazasi $\underline{U}_1$ kuchlanish fazasi bilan bir xil bo'ladi.

Ikkinchi konturdagi tok esa

$$\underline{I}_{2rez} = j\omega_0 \frac{M \underline{I}_{1rez}}{r_2} = j\omega_0 \frac{M}{(r^2 + \omega_0^2 M^2) r_2} \underline{U}_1.$$

Har qanday boshqa chastotada $\underline{I}_2$ tok uchun quyidagini hosil qilish mumkin:

$$I_2 = \frac{j\omega MU_1}{[(r + jx)^2 + (\omega^2 M^2)]}.$$

Nisbiy birliklar:

$$\begin{aligned} \frac{I_2}{I_{2\text{ rez}}} &= \frac{\omega}{\omega_0} \cdot \frac{r^2 + \omega_0^2 M^2}{(r + jx)^2 + \omega^2 M^2} = \omega^* \cdot \frac{1 + \omega_0^2 M^2 / r^2}{(1 + jx_2 / r_2)^2 + \omega^2 M^2 / r^2} = \\ &= \omega^* \cdot \frac{1 + (kQ)^2}{(1 + j\xi)^2 + (kQ)^2}, \end{aligned}$$

chunki $\frac{\omega_0 M}{r} = \frac{\omega_0 L}{r} \cdot \frac{M}{L} = kQ$, $\omega^* = \frac{\omega}{\omega_0}$ - nisbiy chastota, Q - har bir

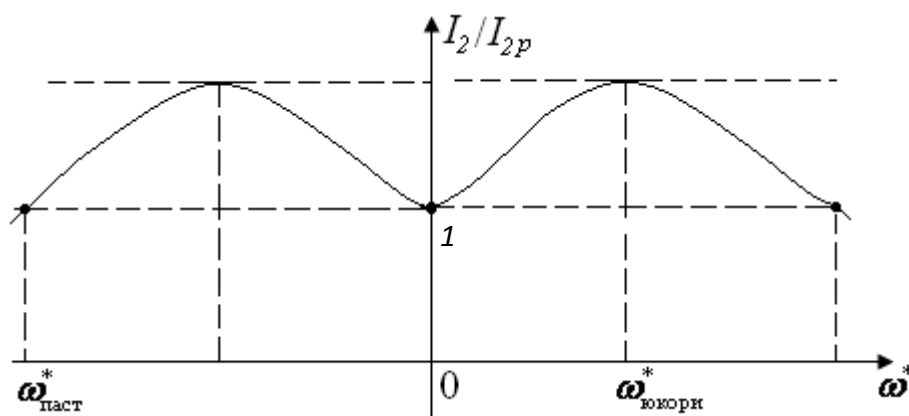
konturning asllik koeffitsiyenti, $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{M}{L}$ - bog'lanish

koeffitsiyenti, $\frac{x}{r} = \frac{\omega L - 1/\omega C}{r} = \frac{\omega^* \omega_0 L - 1/\omega^* \omega_0 C}{r} = Q \left(\omega^* - \frac{1}{\omega^*} \right) = \xi$ -

konturning umumlashgan nosozligi.

Zanjirning rezonans xarakteristikasini qurishda $\omega/\omega_0 = 1$ deb, Q ni hisoblashda esa $\omega L = \omega_0 L$ deb, qabul qilish mumkin.

Konturlar induktiv jihatdan kuchli bog'langan, ya'ni $kQ > 1$ bo'lsa, ikkita maksimumga ega bo'lgan rezonans egri chizig'i hosil bo'ladi (3.16-rasm).



3.16- rasm

Ushbu zanjirning signalni o'tkazish kengligi $(\omega_{\text{yukori}}^* - \omega_{\text{past}}^*)$, oddiy bir konturli L va C elementlar ketma-ket ulangan zanjir o'tkazish qobiliyatidan

3,1 marta katta bo'ladi. $kQ=1$ bo'lganda $\frac{I_2}{I_{2rez}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^4 / 4}}$ va o'tkazish

chegaralarida $\xi = \pm\sqrt{2}$ bo'ladi. Bu holatda ham o'zaro induktiv bog'langan ikki konturli zanjir o'tkazish qobiliyati bir konturli zanjirnikidan katta bo'ladi.

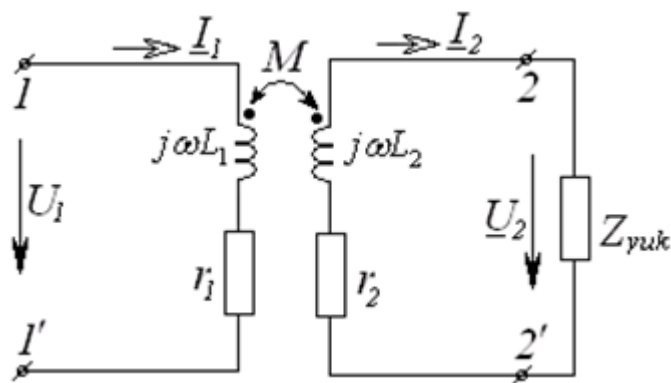
Shunday qilib, I_{2rez} tok qiymati konturlar bog'lanish koeffitsiyentiga bog'liq. Tokning eng katta qiymatini esa oddiy maksimumni topish usuli bo'yicha aniqlash mumkin, ya'ni $\omega_0 M = r$ shart bajarilganda $I_{2r\max} = U_1 / 2r$ ga teng bo'ladi.

Konturlarda xususiy rezonans rejimini o'rnatish uchun har bir kontur parametrlarini - kondensator sig'imini yoki g'altak induktivligini o'zgartirish mumkin.

"Murakkab rezonans" esa, bog'lanish koeffitsiyenti va kontur parametrlarini o'zgartirish bilan amalga oshiriladi.

3.9. O'zaksiz transformatorlar. Transformatorlarni almashlash sxemasi va vektor diagrammasi

O'zaksiz transformatorlar radiotexnikada va o'lchash texnikasida keng qo'llaniladi. Umumiy holda transformator statik elektromagnit qurilma bo'lib, unda elektr energiyas zanjirning bir qismidan ikkinchi qismiga o'zaro induktiv bog'lanish yordamida uzatiladi. Transformatorlar induktiv bog'langan bir nechta chulg'am(g'altak)lardan iborat bo'lib, ularning induktivligini oshirish va sochilgan magnit oqimlarini kamaytirish maqsadida chulg'amlar umumiy ferromagnit o'zakka joylashtiriladi. Transformator chulg'amlaridan biri energiya manbaiga ulanadi, qolgan chulg'amlariga esa, iste'molchilar ulanadi. Energiya manbaiga ulangan chulg'am *birlamchi*, qolganlari esa *ikkilamchi chulg'amlar* deb ataladi. Transformator chulg'amlari bir-biridan elektr izolyatsiyalangan bo'lishi kerak. Magnit materiallarining xossalari magnit maydonining kuchlanganligiga bog'liq bo'lganligi uchun, ular shu magnit maydonni hosil qiluvchi toklarga ham bog'liq bo'ladi. Shuning uchun ham o'zakli transformator umumiy holda nohiziq xarakteristikali qurilmadir. Undagi jarayonlar nohiziq differensial tenglamalar bilan ifodalanadi. Ferromagnit o'zaksiz (havoli) transformatorlarda elektromagnit jarayonlar chiziqli differensial tenglamalar bilan ifodalanadi, shu sababdan bunday transformatorlar *chiziqli transformatorlar* deb ataladi (3.17- rasm).



3.17- rasm

Ikki chulg'amli chiziqli transformatorni o'zaro induktiv bog'langan ikkita g'altak ko'rinishida qarash mumkin. Transformator chulg'amlaridagi energiya isrofi r_1 va r_2 rezistiv qarshiliklar bilan hisobga olinadi. Induktiv bog'langan zanjir tenglamasidan foydalanib, sxemasi 3.17- rasmda keltirilgan ideal zanjir uchun Kirgof ikkinchi qonuni bo'yicha kuchlanishlar muvozanat tenglamasini tuzamiz:

$$\left. \begin{aligned} (r_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega M I_2 &= U_1, \\ [(r_2 + j\omega L_2)]I_2 - j\omega M I_1 &= -U_2. \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

Agar tahlil qilinayotgan ikki chulg'amli chiziqli transformatorida ikkilamchi chulg'am toki $I_2 = 0$ bo'lsa, u holda transformatorning bu holati uning *salt ish rejimi* deyiladi. Bu rejim uchun birlamchi chulg'am toki I_1 ni aniqlaymiz:

$$I_1 = \frac{U_1}{r_1 + j\omega L_1} = I_{10}.$$

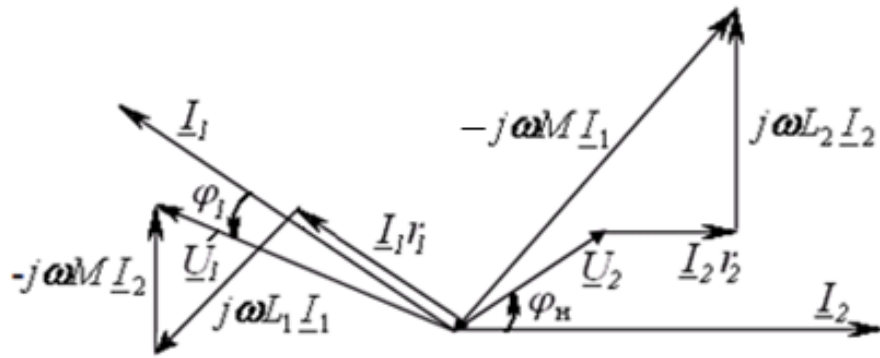
Transformator salt ish rejimida manbadan qabul qilayotgan toki I_{10} *magnitlovchi tok deb ataladi*.

(3.1) tenglamalar sistemasini U_1 kuchlanish va I_1 tokka nisbatan yechamiz:

$$U_1 = \left[\frac{r_1 + j\omega L_1}{j\omega M} Z_{yuk} + \frac{(r_1 + j\omega L_1)(r_2 + j\omega L_2) + \omega^2 M^2}{j\omega M} \right] I_2,$$

$$I_1 = \frac{r_2 + j\omega L_2 + Z_{yuk}}{j\omega M} I_2.$$

Chiziqli transformatorida U_1 kuchlanish va birlamchi chulg'am toki I_1 , ikkilamchi chulg'am U_2 kuchlanishi va toki I_2 ga mos ravishda proporsional bo'lib, proporsionallik koeffitsiyenti ikkala tenglamada ham iste'molchi qarshiligi $Z_{yuk} = U_2 / I_2$ ga bog'liq bo'ladi.



3.18- rasm

Ferromagnit o'zaksiz transformator vektor diagrammasini quramiz (3.18- rasm (diagramma noto'g'ri!)). Bunda iste'molchi $\underline{Z}_{yuk} = Z_{yuk} e^{j\varphi_{yuk}}$ ni induktiv xarakterga ega, deb faraz qilamiz. Tok $\underline{I}_2$ ni +1 absissa yarim o'qi bo'yicha yo'naltiramiz. Iste'molchidagi kuchlanish $\underline{U}_{yuk}$ tok $\underline{I}_2$ ga nisbatan φ_n burchakka oldinda, $r_2 \underline{I}_2$ kuchlanish pasayishi esa faza jihatidan tok $\underline{I}_2$ bilan bir xil bo'ladi. $j\omega L_2 \underline{I}_2$ vektor tok $\underline{I}_2$ ga nisbatan 90° oldinda bo'ladi, (3.1) tenglamaga asosan vektor $j\omega M \underline{I}_2$ ni shunday o'tkazamizki, unda ikkilamchi zanjir kuchlanishlar vektorlarining yig'indisi nolga teng bo'lsin. $\underline{I}_1$ tok vektori $j\omega M \underline{I}_1$ kuchlanish vektoridan 90° orqada qoladi. Vektor $r_1 \underline{I}_1$ faza jihatidan $\underline{I}_1$ tok vektori bilan mos tushadi, vector $j\omega L_1 \underline{I}_1$ esa vektor $\underline{I}_1$ dan 90° oldinda bo'ladi. $j\omega M \underline{I}_2$ vektori $\underline{I}_2$ vektorga nisbatan 90° oldinda bo'ladi. Unda $\underline{U}_1 = r_1 \underline{I}_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 + (-j\omega M \underline{I}_2)$.

Elektr zanjirlar nazariyasida "mukammal" va "ideal" transformator tushunchalari katta ahamiyatga ega.

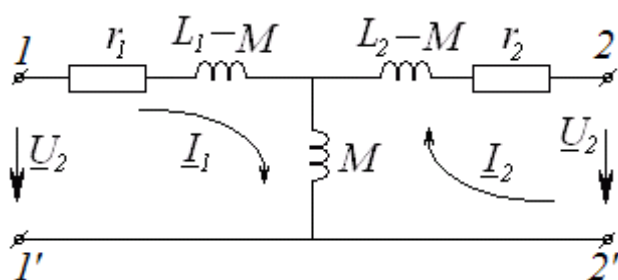
Mukammal transformator deb bog'lanish koeffitsiyenti birga ($k=1$) teng bo'lgan ideal to'rtqutblikka aytiladi. Demak, bunday transformatorlarda sochilgan magnit oqimlari bo'lmaydi.

Agar yuqoridagi ifodalarda $r_1 = r_2 = 0$ va $M = \sqrt{L_1 L_2}$ bo'lsa, u holda birlamchi chulg'amdagi tok va kuchlanish mukammal transformator uchun quyidagicha ifodalanadi:

$$\underline{U}_1 = \left(\sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \right) \underline{U}_2, \quad \underline{I}_1 = \left[\left(\sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \right) + \left(\sqrt{\frac{Z_{yuk}}{j\omega L_1}} \right) \left(\sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \right) \right] \underline{I}_2, \quad n = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = \frac{L_2}{M} = \frac{M}{L_1},$$

bu yerda n - transformatsiya koeffitsiyenti deb ataladi. Transformatsiya koeffitsiyenti o'ramlar soni orqali quyidagicha ifodalanadi: $n = w_1 / w_2$, $U_1 = nU_2$, $I_1 = (I_2 / n + I_{10})$ bo'ladi.

Mukammal transformator magnetlovchi toki $I_{10} = U_1 / j\omega L_1$ ga teng bo'ladi, chunki unda $r_1 = 0$. Birlamchi cho'lg'am kuchlanishini ikkilamchi chulg'am kuchlanishiga nisbati transformatsiya koeffitsiyentiga teng, ya'ni $n = U_1 / U_2$ va u iste'molchi qarshiligiga bog'liq emas. Mukammal transformator kompleks almashlash sxemasi 3.20- rasmda keltirilgan.



3.19- rasm

Agar mukammal transformator magnetlovchi toki nolga teng bo'lsa, u holda bunday transformator *ideal transformator* deb ataladi. $I_{10} = U / \omega L_1$ ifodadan ko'rinib turibdiki, agar mukammal

transformatorida $L_1 = \infty$ bo'lsa, u holda uning magnetlovchi toki nolga teng bo'ladi.

Demak, ideal transformator tenglamalarini quyidagicha yozish mumkin: $U_1 = nU_2$. Oniy qiymatlar uchun esa: $i_1 = i_2 / n$, $u_1 = nu_2$ bo'ladi.

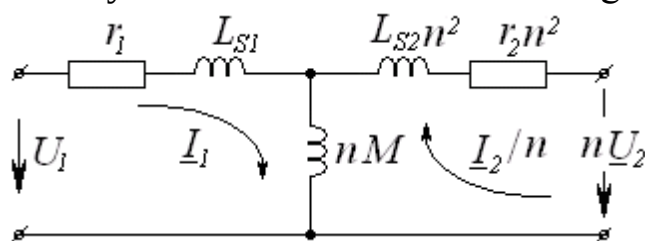
Agar ideal transformator 2-2' qismalariga $Z_{yuk} = U_2 / I_2$ kompleks qarshilikli istemolchi ulangan bo'lsa, u holda transformator 1-1' qismalari tomonidan kirish qarshiligi $Z_{kir.} = U_1 / I_1 = U_2 n^2 / I_2 = n^2 Z_{yuk}$ bo'ladi.

Shunday qilib, iste'molchi qarshiligi qanday xarakterda bo'lsa, transformator kirish qarshiligi shunday xarakterda bo'ladi, ammo uning moduli n^2 marta farq qiladi. Transformatorlarning qarshiliklar "modulini" o'zgartirish xususiyati radiotexnika qurilmalarida keng qo'llaniladi. Manba qarshiligini iste'molchi qarshiligi bilan moslashda real transformatorida ideal transformatorga qaraganda quvvat isrofi yuzaga keladi, ba'zi hollarda esa transformator cho'lg'amlarida sig'im qarshiliklar paydo bo'lib, induktivligi chegara qiymatga ega bo'ladi va sochilgan magnet oqimi nolga teng bo'lmaydi. Bunday holat yuqori chastotada sodir bo'ladi. Demak, bunday holatni real transformatorlarda hisobga olish kerak bo'ladi.

Agar kuchlanishlar muvozanati tenglamalari (3.1) ning birinchisiga $j\omega M I_1$ ni, ikkinchisiga esa $j\omega M I_2$ ni qo'shib va ayirsak, u holda quyidagi tenglamalarni hosil qilamiz:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= [r_1 + j\omega(L_1 - M) + j\omega M] \underline{I}_1 - j\omega M \underline{I}_2 \\ -\underline{U}_2 &= [r_2 + j\omega(L_2 - M) + j\omega M] \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_1 \end{aligned} \right\}.$$

Bu tenglamalar tegishli konturlar tenglamasi bo'lib, 3.20- rasmda keltirilgan sxemaga taalluqli va uni ferromagnit o'zaksiz transformator almashlash sxemasi sifatida qarashimiz mumkin. Sxemaga kiruvchi $(L_1 - M)$ va $(L_2 - M)$ kattaliklar faqat birlamchi va ikkilamchi chulg'amlar o'ramlar soni bir-biriga teng ($w_1 = w_2$) bo'lganda ma'lum fizik ma'noga ega ekanligi rasmdan ko'rinib turibdi. Sochilgan L_{S1} va L_{S2} induktivliklar transformator birlamchi va ikkilamchi chulg'amlariga tegishli bo'ladi. Agar birlamchi va ikkilamchi chulg'amlar o'ramlar soni teng bo'lmasa, u holda transformatorning keltirilgan almashlash sxemasidan foydalaniladi. Bunday sxema 3.21- rasmda ko'rsatilgan.



3.20- rasm

Ikkilamchi chulg'am kuchlanishi U_2 va toki I_2 birlamchi chulg'amga keltiriladi va tegishli kattaliklar bilan almashtiriladi: U_2 kuchlanish n ga ko'paytiriladi, toki esa n ga

bo'linadi. Unda tenglamalar sistemasi quyidagicha yoziladi:

$$\underline{U}_1 = (r_1 + j\omega L_1) \underline{I}_1 - j\omega \frac{nM}{n} \underline{I}_2; \quad -n\underline{U}_2 = n^2(r_2 + j\omega L_2) \underline{I}_2 / n - j\omega nM \underline{I}_1.$$

Bularni quyidagicha o'zgartiramiz:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= [r_1 + j\omega(L_1 - nM)] \underline{I}_1 + j\omega nM \underline{I}_1 - j\omega nM \frac{\underline{I}_2}{n}, \\ -n\underline{U}_2 &= n^2[r_2 + j\omega(L_2 - M/n)] \frac{\underline{I}_2}{n} + j\omega nM \frac{\underline{I}_2}{n} - j\omega nM \underline{I}_1. \end{aligned}$$

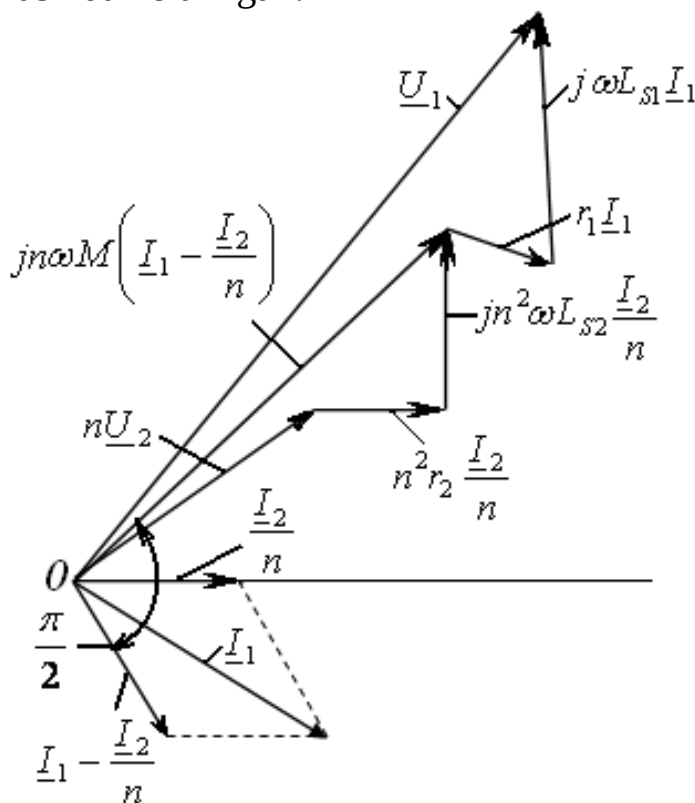
Bu tenglamalar transformator keltirilgan almashlash sxemasining konturlari tenglamasini tashkil etadi (3.21- rasm). Transformator birlamchi chulg'amiga keltirilgan almashlash sxemasi quyidagi qismlardan iborat: birlamchi cho'lg'am aktiv qarshiligi - r_1 va sochilgan induktivligi - L_{S1} ; ko'ndalang shoxobcha induktivligi - $(w_1/w_2)M$ (bu shoxobcha magnitlovchi shoxobcha deb ataladi). Birlamchi chulg'amga keltirilgan r_2 va L_{S2} parametrlar n^2 ga bo'lish bilan aniqlanadi. ωL_{S1} va ωL_{S2} lar transformator birlamchi va ikkilamchi chulg'amlarining sochilgan induktiv qarshiliklari, $n\omega M$ esa magnitlovchi shoxobcha induktiv qarshiligi hisoblanadi.

Magnitlovchi kuch transformator umumiy magnit oqimini aniqlaydi va u birlamchi va ikkilamchi chulgʻamlarda toklar qarama-qarshi yoʻnalgan boʻlganda quyidagicha aniqlanadi:

$$i_1 w_1 - i_2 w_2 = \left(i_1 - \frac{w_2}{w_1} i_2 \right) w_1 = \left(i_1 - \frac{i_2}{n} \right) w_1.$$

$(i_1 - i_2/n)$ toklar va ularga mos $(\underline{I}_1 - \underline{I}_2/n)$ kompleks toklar birlamchi chulgʻamga keltirilgan sxemada magnitlovchi shoxobchadan oʻtadi va transformator *magnitlovchi toki deb ataladi*.

3.21- rasmda keltirilgan sxema uchun vektorlar diagrammasi 3.22- rasmda keltirilgan.



3.21- rasm

Vektor diagrammani qurishda ikkilamchi chulgʻam kuchlanishi va toki birlamchi chulgʻamga keltirilgan parametrlariga mos qilib olinadi. Keltirilgan $n^2 r_2$ aktiv qarshilik va $n^2 \omega L_{s2}$ sochilgan induktiv qarshiliklardagi kuchlanishlar pasayishlari geometrik qoʻshiladi, keltirilgan ikkilamchi kuchlanish nU_2 bilan bu chulgʻamda hosil boʻlgan kuchlanishlarning geometrik yigʻindisi magnitlovchi tokni magnitlash shoxobchasida hosil qilgan

$j\omega nM(\underline{I}_1 - \underline{I}_2/n)$ kuchlanish pasayishiga teng boʻladi; bu holda magnitlovchi tok undan hosil boʻlgan kuchlanish pasayishidan 90° orqada boʻladi. Birlamchi tok ikkilamchi keltirilgan tok bilan magnitlovchi tokning geometrik yigʻindisiga teng, ya'ni: $(\underline{I}_1 - \underline{I}_2/n) + \underline{I}_2/n = \underline{I}_1$.

Birlamchi chulgʻam aktiv qarshiligidagi va sochilgan induktiv qarshiligidagi kuchlanishlar pasayishi geometrik qoʻshiladi va magnitlovchi shoxobcha kuchlanishi bilan birlamchi kuchlanishni hosil qiladi.

Nazorat savollari

1. O'zinduksiya va o'zaroinduksiya hodisalarini tushuntirib bering! 2. O'zaroinduktivlik va induktiv bog'lanish koeffitsiyenti nima? 3. Ketma-ket va parallel ulangan o'zaro induktiv bog'langan zanjirlarda o'zaro induktivlik qanday aniqlanadi? 4. O'zaro induktiv bog'langan zanjirlarni hisoblashning o'ziga hos xususiyatlarini izohlang! 5. O'zaro induktiv bog'langan ikkita kontur bir xil nomli qismalarini va o'zaro induktivlikni tajriba yordamida aniqlash usullarini tushuntirib bering! 6. Induktiv bog'langan zanjirlarni tahlil qilishda ekvivalent sxemalardan foydalanishning afzalliklari nimalardan iborat? 7. Induktiv bog'langan zanjirlarda energiya uzatish jarayoni qanday amalga oshadi? 8. Induktiv bog'langan zanjirlarda rezonans hodisasining o'ziga xos xususiyatlarini tushuntirib bering! 9. O'zaksiz transformator tuzilishi va ishlash prinsipini aytib bering! 10. O'zaksiz transformator ekvivalent almashlash sxemasi qanday elementlardan tashkil topgan? 11. Ideal transformator nima? Mukammal transformator-chi?

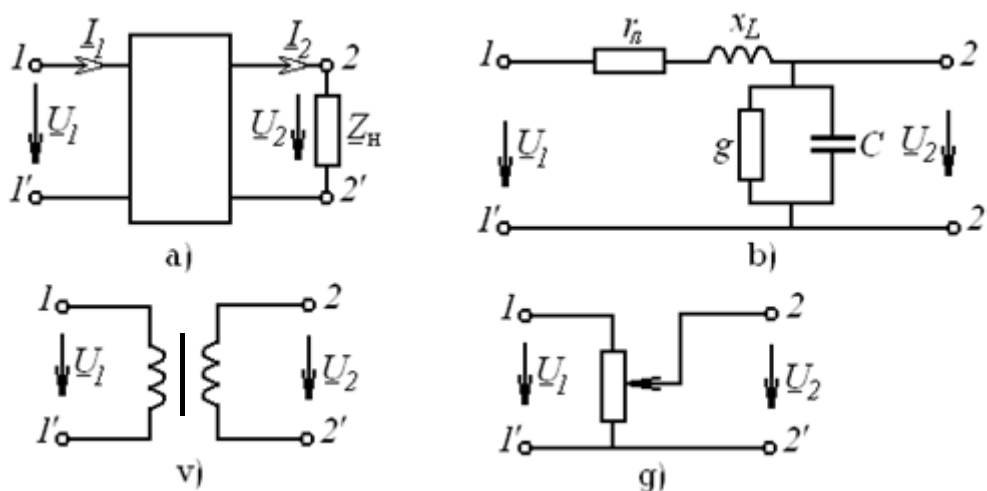
4- BOB. TO'RTQUTBLIKLAR

4.1. Umumiy ma'lumotlar

Ikkita kirish va ikkita chiqish qismlariga ega bo'lgan zanjirning qismi to'rtqutblik deb ataladi. Bunda to'rtqutblikning energiya manbaiga ulanadigan qismlari kirish, yuklama ulanadigan qismlari esa chiqish qismlari hisoblanadi.

Elektr sxemalarda to'rtqutblik 1-1' kirish va 2-2' chiqish qismlari bo'lgan to'g'ri to'rtburchak ko'rinishda belgilanadi (4.1- rasm, a).

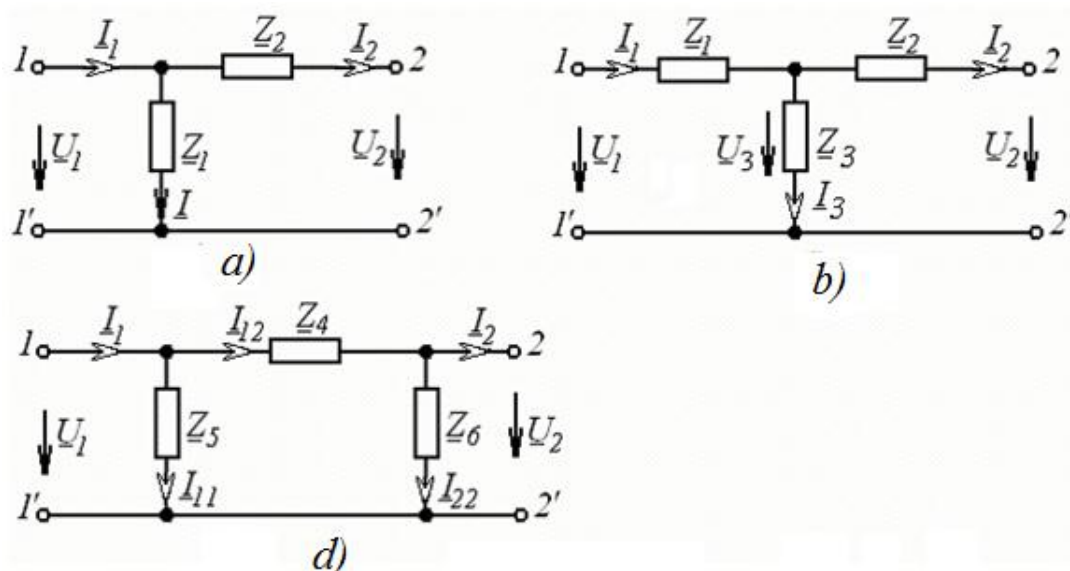
Elektr energiyasini uzatish liniyasi (4.1- rasm, b), transformator (4.2- rasm, v), rostlanuvchi rezistor (4.1- rasm, g), to'g'rilagich qurilmasi, ko'priq sxemalari, elektr filtrlar, kuchaytirgichlar va boshqa ko'pgina qurilmalar to'rtqutblik sifatida qaralishi mumkin. Agar to'rtqutblik ichida elektr energiyasi manbai mavjud bo'lsa, u holda u



4.1- rasm

aktiv, aks holda esa *passiv* deb ataladi hamda to'g'ri to'rtburchak ichiga mos ravishda A va P harfini yozish bilan farqlanadi. Agar to'rtqutblik faqat chiziqli elementlardan tashkil topgan bo'lsa, u holda u *chiziqli to'rtqutblik*, tarkibida hech bo'lmaganda bitta nochiziqli elementi bo'lgan to'rtqutblik esa *nochiziqli to'rtqutblik* deb ataladi. Agar to'rtqutblik qismlari o'zni almashtirilganda, ya'ni kirish qismlari yuklamaga, chiqish qismlari elektr energiyasi manbaiga ulanganda uning kirish va chiqish toklari o'zgarmasa, u holda bunday to'rtqutbliklar *simmetrik*, aks holda esa *nosimmetrik* deb ataladi. To'rtqutblik elementlarining o'zaro ulanish sxemalariga ko'ra Γ -simon (4.2- rasm, a), T-simon (4.2- rasm, b) va Π -simon (4.2- rasm, d) almashlash sxemali to'rtqutbliklarga bo'linadi.

To'rtqutblikni hisoblash deganda uning umumlashgan parametrlaridan foydalanib kirish va chiqish tok va kuchlanishlarini topish tushuniladi. Ixtiyoriy passiv to'rtqutblikda kirish toki $\underline{I}_1$ va kuchlanishi $\underline{U}_1$, uning chiqish



4.2- rasm

toki $\underline{I}_2$ va kuchlanishi $\underline{U}_2$ quyidagi *ikkita asosiy* tenglama bilan ifodalanadi:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}\underline{I}_2, \quad (4.1)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2, \quad (4.2)$$

bu yerda $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$ - to'rtqutblik kompleks koeffitsiyent(doimiy)lari. Bu koeffitsiyentlar to'rtqutblik elementlarining ulanish sxemalariga va elementlarning xarakteriga bog'liq bo'lib, $\underline{AD} - \underline{BC} = 1$ munosabat bilan aniqlanadi.

To'rtqutblikning yuqorida keltirilgan asosiy tenglamalari asosida uning turli xil almashlash sxemalarini hosil qilish mumkin. Bu sxemalar to'rtqutblik umumiy xossalarini tahlil qilishni osonlashtiradi. Amaliyotda ko'pincha T- va Π - simon almashlash sxemalaridan keng foydalaniladi.

4.2. To'rtqutblikning T-simon almashlash sxemasi

T-simon almashlash sxemasi uchun to'rtqutblik koeffitsiyentlarini aniqlaymiz (4.2- rasm, b). Kirxgof qonunlariga ko'ra:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 \underline{Z}_1 + \underline{U}_3 = \underline{I}_1 \underline{Z}_1 + \underline{I}_2 \underline{Z}_2 + \underline{U}_2, \quad (4.3)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{I}_2 + \frac{\underline{U}_3}{\underline{Z}_3} = \underline{I}_2 + \frac{\underline{I}_2 \underline{Z}_2 + \underline{U}_2}{\underline{Z}_3}. \quad (4.4)$$

(4.4) ifodani (4.3) tenglamaga qo'yib, quyidagini hosil qilamiz:

$$\underline{U}_1 = \left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3}\right) \underline{U}_2 + \underline{I}_2 \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}\right) = \underline{A} \underline{U}_2 + \underline{B} \underline{I}_2,$$

bu yerda $\underline{A} = \left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3}\right)$, $\underline{B} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}$.

(4.4) tenglamani quyidagicha o'zgartiramiz:

$$\underline{I}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_3} \underline{U}_2 + \underline{I}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}\right) = \underline{C} \underline{U}_2 + \underline{D} \underline{I}_2,$$

bu yerda $\underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_3}$, $\underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}$.

Yuqoridagi ifodalardan ko'rinib turibdiki, $\underline{B}$ ko'effitsiyent qarshilik, $\underline{C}$ - o'tkazuvchanlik o'lchov birliklarida bo'lib, $\underline{A}$ va $\underline{D}$ ko'effitsiyentlar esa o'lchovsiz kattaliklardir. Simmetrik to'rtqutbliklarda $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$ bo'lib, $\underline{A} = \underline{D}$ shart bajariladi.

Agar to'rtqutblik ko'effitsiyentlari ma'lum bo'lsa, u holda T-simon almashlash sxema parametrlari quyidagicha aniqlanadi:

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{A}-1}{\underline{C}}, \quad \underline{Z}_2 = \frac{\underline{D}-1}{\underline{C}}, \quad \underline{Z}_3 = \frac{1}{\underline{C}}.$$

Oxirgi munosabatlardan quyidagicha xulosa chiqarish mumkin: to'rtqutblik kirish va chiqish qismalari o'zaro almashtirilsa, $\underline{B}$ va $\underline{C}$ ko'effitsiyentlar o'zgarmaydi, ammo tenglamalarda $\underline{A}$ va $\underline{D}$ ko'effitsiyentlar o'zni almashib keladi, ya'ni:

$$\underline{U}_2 = \underline{D} \underline{U}_1 + \underline{B} \underline{I}_1, \quad \underline{I}_2 = \underline{C} \underline{U}_1 + \underline{A} \underline{I}_1. \quad (4.5)$$

4.3. To'rtqutblikning II- simon almashlash sxemasi

II- simon almashlash sxemasi uchun uning $\underline{Z}_4, \underline{Z}_5, \underline{Z}_6$ parametrlarini e'tiborga olib, Kirxgof birinchi va ikkinchi qonunlari asosida quyidagi tenglamalarni yozish mumkin (4.2- rasm, v):

Kirxgof birinchi qonuni bo'yicha:

$$\underline{I}_{12} = \underline{I}_{22} + \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_6} + \underline{I}_2, \quad (4.6a)$$

(4.6b) ni e'tiborga olib Kirxgof ikkinchi qonuni bo'yicha:

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= \underline{I}_{12}\underline{Z}_4 + \underline{U}_2 = \left(\frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_6} + \underline{I}_2\right)\underline{Z}_4 + \underline{U}_2 = \\ &= \underline{U}_2\left(1 + \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_6}\right) + \underline{I}_2\underline{Z}_4 = \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}\underline{I}_2,\end{aligned}\quad (4.6b)$$

bu yerda $\underline{A} = 1 + \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_6}$, $\underline{B} = \underline{Z}_4$.

Kirxgof birinchi qonuni bo'yicha to'rtqutublikning kirish toki.

$$\begin{aligned}\underline{I}_1 &= \underline{I}_{11} + \underline{I}_{12} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_5} + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_6} + \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_5}\left(1 + \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_6}\right) + \underline{I}_2\frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_5} + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_6} + \underline{I}_2 = \\ &= \underline{U}_2\left(\frac{\underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6}{\underline{Z}_6\underline{Z}_5}\right) + \underline{I}_2\left(1 + \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_5}\right) = \underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2.\end{aligned}$$

Oxirgi tenglamadan:

$$\underline{C} = \frac{\underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6}{\underline{Z}_6\underline{Z}_5}, \quad \underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_5}.$$

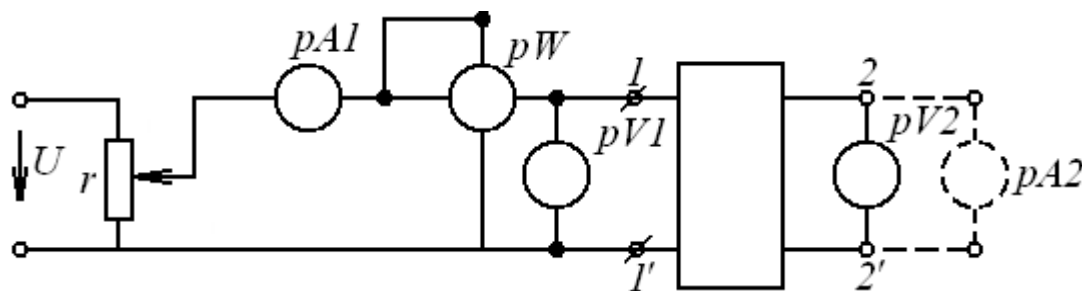
O'z navbatida agar $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$ ko'effitsiyentlar ma'lum bo'lsa, u holda II-simon almashlash sxemasi parametrlari quyidagicha topiladi:

$$\underline{Z}_4 = \underline{B}, \quad \underline{Z}_5 = \frac{\underline{B}}{\underline{D}-1}, \quad \underline{Z}_6 = \frac{\underline{B}}{\underline{A}-1}.$$

Agar $\underline{Z}_5 = \underline{Z}_6$ shart bajarilsa, unda to'rtqutublik simmetrik bo'lib, $\underline{A} = \underline{D}$ bo'ladi.

4.4. To'rtqutublik ko'effitsiyentlarini tajriba yordamida aniqlash

Passiv to'rtqutublik kompleks ko'effitsiyentlarini tajriba yordamida aniqlash mumkin. Buning uchun to'rtqutublik elementlari parametrlarining qiymatlari va ularning ulanish sxemasini bilish shart emas.



4.3- rasm

$\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$ koefitsiyentlarni topish formulalarini salt ish va qisqa tutashish tajribalari natijalariga asoslanib hosil qilish mumkin. Tajriba o'tkaziladigan sxema 4.3- rasmda keltirilgan.

1. *To'rtqutblik kirish qismlari manbaga ulangan holat uchun salt ish tajribasi.* Qarshiligi rostlanadigan rezistor r yordamida to'rtqutblik kirishiga U_{2nom} kuchlanishga teng bo'lgan kuchlanish beriladi va o'lchov asboblari yordamida U_{10} , I_{10} va φ_{10} lar aniqlanadi. Salt ish rejimida $I_{20}=0$ bo'lganligi sababli (4.1) va (4.2) tenglamalar quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{10} &= \underline{A}\underline{U}_{2n}, \quad \underline{I}_{10} = \underline{C}\underline{U}_{2n}. \\ \underline{Z}_{10} &= \frac{\underline{U}_{10}}{\underline{I}_{10}} = \frac{\underline{U}_{10}}{\underline{I}_{10}} \cdot e^{j\varphi_{10}} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}}.\end{aligned}\quad (4.7)$$

2. *To'rtqutblik kirish qismlari manbaga ulangan holat uchun qisqa tutashish tajribasi.* Bu tajribani o'tkazish uchun to'rtqutblik chiqish qismlariga ampermetr ulab, uning kirishiga shunday kuchlanish beramizki, bunda to'rtqutblik chiqishidagi tok I_{2nom} ga teng bo'lsin. O'lchov asboblari yordamida U_{1q} , I_{1q} va φ_{1q} larni topamiz. Qisqa tutashish rejimida $U_{2q}=0$ bo'lganligi sababli (4.1) va (4.2) tenglamalar quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\underline{U}_{1q} = \underline{B}\underline{I}_{1q}, \quad \underline{I}_{1q} = \underline{D}\underline{I}_{2n},$$

bundan kompleks kirish qarshiligini topamiz:

$$\underline{Z}_{1q} = \frac{\underline{U}_{1q}}{\underline{I}_{1q}} = \frac{\underline{U}_{1q}}{\underline{I}_{1q}} \cdot e^{j\varphi_{1q}} = \frac{\underline{B}}{\underline{D}} \frac{\underline{I}_{2n}}{\underline{I}_{2n}} = \frac{\underline{B}}{\underline{D}}. \quad (4.8)$$

3. *To'rtqutblik chiqish qismlari manbaga ulangan holat uchun salt ish tajribasi.* To'rtqutblik 2-2' chiqish qismlariga shunday kuchlanish beramizki, bunda kirish qismlaridagi kuchlanish U_{1nom} ga teng bo'lsin. O'lchov asboblari yordamida U_{20} , I_{20} va φ_{20} larni topib olamiz. Salt ish rejimida $I_{10}=0$ bo'lganligi uchun (4.5) tenglamalar quyidagicha yoziladi:

$$\underline{U}_{20} = \underline{D}\underline{U}_{1n}, \quad \underline{I}_{20} = \underline{C}\underline{U}_{1n}.$$

To'rtqutblikning chiqish qismlari tomonidan kirish qarshiligi:

$$\underline{Z}_{20} = \frac{\underline{U}_{20}}{\underline{I}_{20}} = \frac{\underline{U}_{20}}{\underline{I}_{20}} \cdot e^{j\varphi_{20}} = \frac{\underline{D}}{\underline{C}} \frac{\underline{U}_{1n}}{\underline{U}_{1n}} = \frac{\underline{D}}{\underline{C}}. \quad (4.9)$$

4. *To'rtqutblik chiqish qismlari manbaga ulangan holat uchun qisqa tutashish tajribasi.* (4.5) tenglamalar $U_{1q}=0$ bo'lganda $\underline{U}_{2q} = \underline{B}\underline{I}_{1n}$, $\underline{I}_{2q} = \underline{A}\underline{I}_{1n}$.

Kirish qarshiligi:

$$\underline{Z}_{2q} = \frac{\underline{U}_{2q}}{\underline{I}_{2q}} = \frac{\underline{U}_{2q}}{\underline{I}_{2q}} \cdot e^{j\varphi_{2q}} = \frac{\underline{B}}{\underline{A}} \frac{\underline{I}_{1n}}{\underline{I}_{1n}} = \frac{\underline{B}}{\underline{A}}. \quad (4.10)$$

(4.7)...(4.10) tenglamalar o‘zaro $\underline{Z}_{1q} / \underline{Z}_{10} = \underline{Z}_{2q} / \underline{Z}_{20}$ munosabat bilan bog‘langanligini inobatga olsak, unda $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$ koeffitsiyentlarni topish mumkin. (4.7)...(4.10) tenglamalarni $\underline{A}\underline{D} - \underline{B}\underline{C} = 1$ tenglama bilan birgalikda yechib, quyidagilarni hosil qilamiz:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{10}}{\underline{Z}_{20} - \underline{Z}_{2q}}}, \quad \underline{B} = \underline{A}\underline{Z}_{2q}, \quad \underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{10}}, \quad \underline{D} = \underline{C}\underline{Z}_{20}.$$

Shunday qilib, to‘rtqutblik $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$ koeffitsiyentlarini aniqlash uchun yuqorida keltirilgan tajribalardan uchtasini, simmetrik to‘rtqutblik uchun esa ikkitasini o‘tkazish kifoya.

4.5. To‘rtqutblikning salt ishlash va qisqa tutashishi

(4.1) va (4.2) tenglamalardan ko‘rinib turibdiki, to‘rtqutblik kirishidagi kuchlanish ham tok ham ikkita tashkil etuvchidan iborat bo‘lib, ulardan biri $\underline{U}_2$ kuchlanishga, ikkinchisi esa $\underline{I}_2$ tokka proporsional.

To‘rtqutblikning ikkita: *salt ish* va *qisqa tutashish* chegaraviy rejiminlarini ko‘rib chiqamiz. Salt ish rejimida to‘rtqutblik chiqishidagi kuchlanish uning normal ish rejimidagi nominal kuchlanishga, qisqa tutashish rejimida esa to‘rtqutblik chiqish toki normal ish rejimidagi tokka teng qilib olinadi:

$$\underline{U}_{10} = \underline{A}\underline{U}_2; \quad \underline{U}_{1q} = \underline{B}\underline{I}_2; \quad \underline{I}_{10} = \underline{C}\underline{U}_2; \quad \underline{I}_{1q} = \underline{D}\underline{I}_2. \quad (4.11)$$

(4.11) va (4.5) tenglamalarni o‘zaro taqqoslab, $\underline{U}_1$ kuchlanish va $\underline{I}_1$ tok salt ish va qisqa tutashish rejimlaridagi mos ravishda kuchlanishlar va toklar yig‘indisiga tengligiga ishonch hosil qilish mumkin, ya'ni:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}\underline{I}_2 = \underline{U}_{10} + \underline{U}_{1q}, \quad \underline{I}_1 = \underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2 = \underline{I}_{10} + \underline{I}_{1q}.$$

Shunday qilib, to‘rtqutblik kirish qismidagi kuchlanish va tokni salt ish va qisqa tutashish rejimlari natijalarini ustma-ustlab aniqlash mumkin.

Katta quvvatli elektrotexnik qurilmalarni sinovdan o‘tkazishda mazkur ustma-ustlash prinsipini qo‘llash alohida ahamiyatga ega. Chunki, salt ish va qisqa tutashish tajribalarini o‘tkazishda yuklama rejimidagiga nisbatan ancha kam quvvatli elektr energiyasi manbaini talab qiladi va bunda elektrotexnik qurilmalarni sinovdan o‘tkazishda katta miqdorda elektr energiyasi tejiladi.

4.6. Istalgan yuklama uchun to'rtqutblikning kirish qarshiligi

To'rtqutblik ish rejimini tavsiflashda ko'pincha uning kirish qarshiligi tushunchasidan foydalaniladi. To'rtqutblik kirish kuchlanishi $\underline{U}_1$ ni kirish toki $\underline{I}_1$ ga nisbati uning *kirish qarshiligi* deb ataladi. Bunda manba to'rtqutblik kirish qismalariga ulangan, deb hisoblanadi. Demak:

$$\underline{Z}_{kir(1)} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \frac{\underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}\underline{I}_2}{\underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2} = \frac{\underline{A}\underline{Z}_n + \underline{B}}{\underline{C}\underline{Z}_n + \underline{D}}, \quad (4.12)$$

bu yerda $\underline{Z}_n = \underline{U}_2 / \underline{I}_2$.

Xuddi shuningdek, manba to'rtqutblik chiqish qismalariga ulangandagi kirish qarshiligi quyidagiga teng:

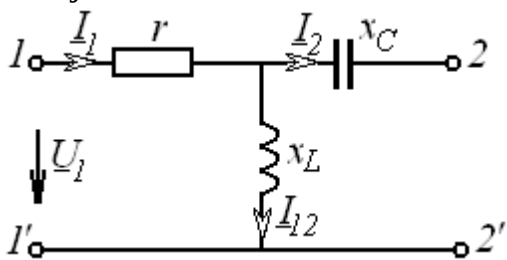
$$\underline{Z}_{kir(2)} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} = \frac{\underline{D}\underline{U}_1 + \underline{B}\underline{I}_1}{\underline{A}\underline{U}_1 + \underline{C}\underline{I}_1} = \frac{\underline{D}\underline{Z}_n + \underline{B}}{\underline{C}\underline{Z}_n + \underline{A}}. \quad (4.13)$$

(4.12) va (4.13) tenglamalardagi $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$ ko'effitsiyentlar o'rniga (4.7)...(4.10) ifodalarini qo'yib, amalda ko'p uchraydigan quyidagi munosabatlarni hosil qilishimiz mumkin:

$$\underline{Z}_{kir(1)} = \frac{\underline{A}(\underline{Z}_n + \underline{B}/\underline{A})}{\underline{C}(\underline{Z}_n + \underline{D}/\underline{C})} = \underline{Z}_{10} \frac{\underline{Z}_n + \underline{Z}_{2q}}{\underline{Z}_n + \underline{Z}_{20}},$$

$$\underline{Z}_{kir(2)} = \frac{\underline{D}(\underline{Z}_n + \underline{B}/\underline{D})}{\underline{A}(\underline{Z}_n + \underline{C}/\underline{A})} = \underline{Z}_{20} \frac{\underline{Z}_n + \underline{Z}_{1q}}{\underline{Z}_n + \underline{Z}_{10}}.$$

Shuni ta'kidlash joizki, to'rtqutblikni yuqorida ko'rilgan tenglamalaridan tashqari turli ko'rinishdagi boshqa tenglamalari ham mavjud.



4.4- rasm

Masala. 4.4- rasmda keltirilgan to'rtqutblik T-simon almashlash sxemasi uchun $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$, $\underline{D}$ ko'effitsiyentlarni toping va $\underline{AD} - \underline{BC} = 1$ munosabat to'g'riligini tekshirib ko'ring. Quyidagilar berilgan: $r = 100 \, \Omega$, $x_L = 200 \, \Omega$, $x_C = 100 \, \Omega$.

Yechish. To'rtqutblik ko'effitsientlarini topish uchun uning salt ish va qisqa tutashish rejimlari uchun yozilgan (4.11) tenglamalaridan foydalanamiz:

$$\underline{A} = \frac{\underline{U}_{10}}{\underline{U}_{2n}} = \frac{\underline{U}_1}{(\underline{U}_1 \cdot jx_L)/(r + jx_L)} = \frac{r + jx_L}{jx_L} = \frac{100 + j200}{j200} = 1 - j0,5.$$

$\underline{B}$ ko'effitsiyentni aniqlash uchun avval qisqa tutashish tokini topamiz:

$$\underline{I}_{2q} = \frac{\underline{U}_{1q}}{r + \frac{x_L x_C}{jx_L - jx_C}} \cdot \frac{jx_L}{jx_L - jx_C} = \frac{\underline{U}_{1q} jx_L}{x_L x_C + jr(x_L - x_C)}$$

$\underline{I}_{2q}$ tokning topilgan ifodasidan foydalanib $\underline{B}$ koeffitsiyentni aniqlaymiz:

$$\underline{B} = \frac{\underline{U}_{1q}}{\underline{I}_{2q}} = \frac{x_L x_C + jr(x_L - x_C)}{jx_L} = 50 - j100 \, \Omega,$$

$$\underline{C} = \frac{\underline{I}_{10}}{\underline{U}_{20}} = \frac{\underline{I}_{10}}{jx_L \underline{I}_{10}} = -j0,005 \, S,$$

$$\underline{D} = \frac{\underline{I}_{1q}}{\underline{I}_{2q}} = \frac{\underline{I}_{1q}}{\underline{I}_{1q} \frac{jx_L}{jx_L - jx_C}} = \frac{x_L - x_C}{x_L} = 0,5.$$

Endi $\underline{AD} - \underline{BC} = 1$ munosabatni tekshirib ko'ramiz:

$$\underline{AD} - \underline{BC} = (1 - j0,5) \cdot 0,5 - (50 - j100) \cdot (-j0,005) = 1.$$

Nazorat savollari

1. To'rtqutblik deb qanday sxemalarga aytiladi? Unga misollar keltiring! 2. Qanday to'rtqutbliklar simmetrik, chiziqli, aktiv va passiv deb ataladi? 3. To'rtqutblik asosiy tenglamalarini yozing va ularni izohlab bering! 4. To'rtqutblikning qanday ko'rinishdagi tenglamalarini bilasiz? 5. To'rtqutblikning qanday almashlash sxemalarini bilasiz? 6. To'rtqutblik salt ishlash va qisqa tutashish rejimlarini izohlab bering! 7. To'rtqutblik A, B, C va D koeffitsiyentlari tajriba yordamida qanday tartibda aniqlanadi? 8. To'rtqutblikning istalgan yuklamadagi kirish qarshiligi ifodalarini yozing.

5- BOB. ELEKTR FILTRLARI

5.1. Umumiy ma'lumotlar

Radiotexnika, avtomatika, telemexanika va elektr aloqa qurilmalarida chastota diapazoni keng bo'lgan signallardan bitta yoki bir nechta chastotali signallarni ajratish kerak bo'lib qoladi. Bu amallar elektr filtrlari yordamida bajariladi. Bunda o'tish kengligi deb ataluvchi diapazondagi signallar susaymasligi, tutish kengligi deb ataluvchi diapazondagi signallar esa belgilangan sathgacha susayishi kerak bo'ladi.

Chastotali elektr filtri deb, ayrim chastotalarni yoki ma'lum oraliqdagi chastotalarni keskin holatda tanlash xususiyatiga ega bo'lgan to'rtqutbliliklarga aytiladi.

Filtrlar vazifasi va turlari. To'g'ri tuzilgan filtr qabul qilish uskunasiga o'tkazuvchi oraliqdagi, ya'ni shaffofli zona deb ataladigan chastota oraliqdagi signal amplitudasini amalda o'zgartirmasdan o'tkazadi hamda chastotasi o'tkazuvchi oraliq tashqarisida, ya'ni to'suvchi deb ataladigan oraliqda bo'lgan signallarni o'tkazmaydi.

O'tkazuvchi oraliq bo'yicha *quyi chastotali filtrlar* (o'tkazish oralig'i $\omega=0$ dan $\omega=\omega_s$ gacha); *yuqori chastotali filtrlar* (o'tkazish oralig'i $\omega=\omega_s$ dan $\omega=\infty$ gacha); *oraliq filtrlar* (o'tkazish oralig'i $\omega=\omega_1$ dan $\omega=\omega_2$ gacha) va nihoyat *to'siqli filtrlar* (o'tkazish oralig'i $\omega=0$ dan $\omega=\omega_1$ gacha va $\omega=\omega_2$ dan $\omega=\infty$ gacha). Oxirgi tur filtrlar chastotasi $\omega=\omega_1$ dan $\omega=\omega_2$ gacha bo'lgan signallarni o'tkazmaydi.

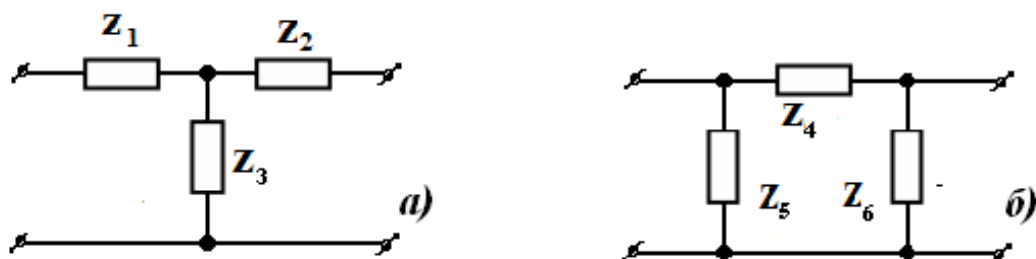
Yuqoridagi tasniflashdan tashqari, filtrlarni ulardagi elementlar xarakteri bo'yicha ham tasniflash mumkin. Filtr tarkibidagi elementlar bo'yicha ular quyidagi turlarga bo'linadi: *reaktiv* - induktiv g'altaklar va kondensatorlardan iborat; *induktivsiz* - kondensator va rezistorlardan iborat; *p'ezoelektrik* - asosan kvars plastinkalardan iborat va h.z.

Zamonaviy radiotexnika uskunalarda filtrlash xususiyatlari yuqori bo'lgan aktiv elementli, ya'ni katta kuchaytirish koeffitsiyentiga ega tranzistor kuchaytirgichli filtrlar ham qo'llaniladi.

Oddiy elektr filtrlar induktiv g'altaklar va kondensatorlardan yig'iladi. Filtrlar asosan radiotexnika, aloqa, telemexanika va avtomatika uskunalarida foydalaniladi.

Katta chastotalarda induktiv qarshiliklar aktiv qarshiliklarga qaraganda ko'p marta katta bo'lganligi sababli bundan keyingi mulohazalarda faqat reaktiv elementlardan iborat filtrlarni ko'rib chiqamiz.

Filtrlar odatda simmetrik T- yoki Π -simon sxema bo'yicha yig'ilganligi sababli (5.1- rasm) ular ham to'rtqutbliklar yoki tarqoq parametrli liniyalar kabi so'nish va faza koeffitsiyentlari tushunchalari bilan tavsiflanadi.



5.1- rasm

5.1- rasm, *a* va *b*) da keltirilgan Z_1 , Z_2 , Z_4 qarshiliklar bo'ylama qarshiliklar va Z_3, Z_5, Z_6 va qarshiliklar esa ko'ndalang qarshiliklar deb ataladi.

Filtrlar k va m turlarga bo'linadi. Bo'ylama va unga mos bo'lgan ko'ndalang qarshiliklar ko'paytmasi filtr uchun o'zgarib turadigan chastotaga bog'liq bo'lmagan qandaydir o'zgarmas k son kvadratiga teng bo'lsa, bunday filtrlar k turdagi, ya'ni eng sodda filtrlar deb ataladi. Mazkur ko'paytma signallar chastotasiga bog'liq bo'lgan filtrlar esa m turdagi filtr deb ataladi. k turdagi filtrlar yuklamasining qarshiligi filtr to'liq qarshiligiga teng, ya'ni uning yuklamasi moslangan bo'lishi kerak. m turdagi filtrlarda yuklama moslangan bo'lishi shart emas.

5.2. Reaktiv filtrlarning signallarni o'tkazish sharti

Filtrlarda eng kam elementlar soni ikkita bo'lishi mumkin (Γ -simon bug'in(zveno)). T- va Π -simon bug'inli filtrlar Γ -simon bug'inlar kombinatsiyasidan tashkil topgan, deyish mumkin.

Simmetrik T- yoki Π -simon filtrlarning to'rtqutblik kabi A_{11} va g parametrlari quyidagi hisoblanishi mumkin(5.2- rasm, *a* va *b*):

$$A_{11} = chg = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2}. \quad (5.1)$$

Simmetrik T- yoki Π -simon filtr uzatish o'lchovi Γ -simon filtr ikkilangan uzatish o'lchovi $0,5g$, ya'ni:

$$sh(0,5g) = \sqrt{\frac{Z_1}{4Z_2}}. \quad (5.2)$$

Xususiy soʻnishi nolga teng, yaʼni $b=0$ boʻlgan reaktiv filtr chastotaviy sohasi uning oʻtkazish polosasi deb ataladi.

Faqat induktiv yoki faqat sigʻim lementlaridan tashkil topgan toʻrtqutblik signallarni oʻtkazish polosasiga ega boʻlmasligini, yaʼni filtr boʻla olmasligini koʻrsatib oʻtamiz. Haqiqatan ham, Γ -simon yoki T- yoki Π -simon simmetrik toʻrtqutblik faqat reaktiv elementlardan tashkil topgan boʻlsin, yaʼni $Z_1 = \pm jx_1$; $Z_2 = \pm jx_2$. (5.3)

bu yerda x_1 va x_2 - reaktiv qarshiliklar absolyut qiymatlari; musbat ishora induktiv, manfiy ishora esa sigʻim elementlarga taalluqli.

(5.2) ga koʻra:

$$sh(0,5g) = sh\left(\frac{b}{2} + j\frac{a}{2}\right) = sh\frac{b}{2}\cos\frac{a}{2} + jch\frac{b}{2}\sin\frac{a}{2} = \pm\sqrt{\frac{x_1}{4x_2}},$$

bundan, haqiqiy va mavhum qismlarini ajratsak:

$$sh\frac{b}{2}\cos\frac{a}{2} = \pm\sqrt{\frac{x_1}{4x_2}}, \quad ch\frac{b}{2}\sin\frac{a}{2} = 0. \quad (5.4)$$

Haqiqiy argument giperbolik kosinusi nolga teng boʻla olmasligidan ($ch\frac{b}{2} \geq 1$), (5.4) ga asoslanib, $\sin\frac{a}{2} = 0$ va $\cos\frac{a}{2} = \pm 1$ deb yozish mumkin.

Shunday qilib, Z_1 va Z_2 qarshiliklar xarakteri bir xil boʻlgada, filtr soʻnishi quyidai formula yordamida aniqlanadi:

$$sh\frac{b}{2} = \pm\sqrt{\frac{x_1}{4x_2}},$$

yaʼni $b > 0$ (toʻrtqutblik oʻtkazish polosasiga ega emas).

Toʻrtqutblikdagi Z_1 va Z_2 qarshiliklar turli ishoralarga ega boʻlgandagina u filtr xususiyatiga ega boʻladi, yaʼni:

$$Z_1 = \pm jx_1; \quad Z_2 = \mp jx_2. \quad (5.5)$$

$$\text{Bunda } sh\frac{g}{2} = \pm j\sqrt{\frac{x_1}{4x_2}} \text{ va binobarin } sh\frac{b}{2}\cos\frac{a}{2} = 0, \quad (5.6)$$

$$ch\frac{b}{2}\sin\frac{a}{2} = \pm\sqrt{\frac{x_1}{4x_2}}. \quad (5.7)$$

(5.6) tenglama $sh\frac{b}{2} = 0$ (5.8) yoki $\cos\frac{a}{2} = 0$ (5.9) boʻlganda oʻrinli boʻladi.

(5.8) shart filtrni o'tkazish polosasi ($b=0$) ga to'g'ri keladi. Bu holarda $ch \frac{b}{2} = 1$ va (5.7) ga ko'ra $\sin \frac{a}{2} = \pm \sqrt{\frac{x_1}{4x_2}}$. (5.10)

O'tkazish polosasida filtr faza koeffitsiyenti (5.10) qonuniyat bilan o'zgaradi (x_1 va x_2 lar chastotaga bog'lik ravishda o'zgaradi).

O'z navbatida (5.9) shart filtr to'siq polosasiga to'g'ri keladi. Bu holatda $a = \pm\pi$, $\sin \frac{a}{2} = \pm 1$ va (5.7) ga ko'ra: $ch \frac{b}{2} = \sqrt{\frac{x_1}{4x_2}}$. (5.11)

To'siq polosasida filtr so'nishi (5.11) qonuniyat bilan o'zgaradi. (5.10) va (5.11) formulalar Γ -simon, T- va Π -simon simmetrik to'rtqutbliklar uchun o'rinli. Buda $\frac{a}{2}$ va $\frac{b}{2}$ deganda Γ -simon bug'in faza koeffitsiyenti va xususiy so'nishi tushuniladi.

T- yoki Π -simon filtr ikkita Γ -simon filtrdan tashkil topganligi uchun uning faza koeffitsiyenti va xususiy so'nishi mos ravishda a va b ga teng bo'ladi.

Istalgan simmetrik reaktiv filtr o'tkazish polosasida, ya'ni $b=0$ bo'lganda, quyidagi shart bajailai:

$$A_{11}(\omega) = chg = ch(b + ja) = chja = \cos a.$$

Kosinus qiymatini -1 dan +1 gacha o'zgarishini inobatga olsak, unda:

$$-1 \leq A_{11}(\omega) \leq 1.$$

T- yoki Π -simon filtrlar uchun ushbu shart quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$-1 \leq 1 + \frac{Z_1}{2Z_2} \leq 1 \quad \text{yoki} \quad -2 \leq \frac{Z_1}{2Z_2} \leq 0.$$

So'nggi tengsizlik barcha qismlarini 2 ga bo'lib, quyidagini hosil qilamiz:

$$-1 \leq \frac{Z_1}{4Z_2} \leq 0. \quad (5.12)$$

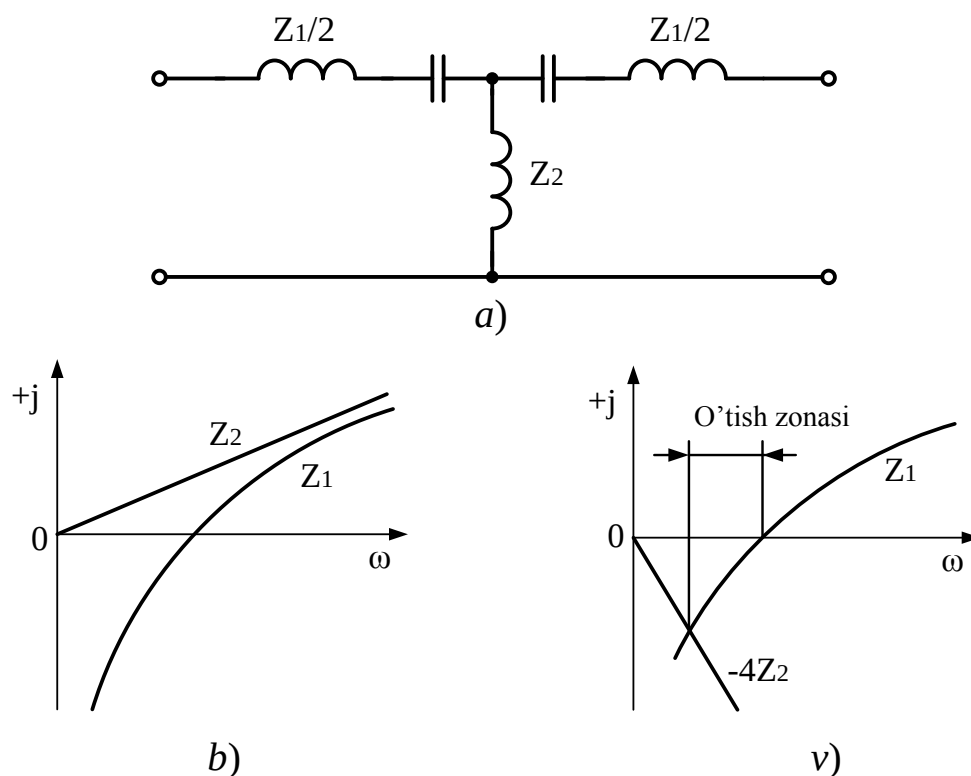
Shunday qilib, o'tkazish polosasi chegarasiga tegishli chegaraviy chastotalar(ular kesim chastotalar deb ataladi) quyidagi shartlarni qanoatlantiradi:

$$Z_1 = 4Z_2, \quad Z_1 = 0. \quad (5.13)$$

(5.12) tengsizlik Γ -, T- yoki Π -simon reaktiv filtlarning signallarni o'tkazish sharti deb ataladi.

Agar $Z_1 = f(\omega)$ va $Z_2 = f(\omega)$ funksional bogʻlanishlar analitik koʻrinishda berilgan boʻlsa, u holda kesim chastotalar (5.13) tenglamadan analitik usulda, agar yuqoridagi funksional bogʻlanishlar grafik koʻrinishda berilgan boʻlsa, u holda ular grafir usulda topiladi.

5.2- rasmda filtr sxemasi (a), uning $Z_1 = f(\omega)$ va $Z_2 = f(\omega)$ chastotaviy tavsiflari (b) va oʻtkazish polosasi (v) keltirilgan.



5.2- rasm

Kesim chastotalari moslangan yuklamaga ulangan filtr kirish qarshiligi chastotaviy tavsifidan, ya'ni filtr xarakteristik qarshiligidan aniqlash mumkin.

T- simon filtr xarakteristik qarshiligi:

$$Z_T = \sqrt{Z_1 Z_2 \left(1 + \frac{Z_1}{4Z_2}\right)}, \quad (5.14)$$

II- simon filtr uchun esa:

$$Z_{II} = \sqrt{\frac{Z_1 Z_2}{1 + \frac{Z_1}{4Z_2}}}. \quad (5.15)$$

Yuqorida qayd etilganidek, $b=0$ shart Z_1 va Z_2 qarshiliklar turli ishoralarga ega boʻlgandagina hosil qilinishi mumkin. Bu holatda

$$\frac{Z_1}{4Z_2} \leq 0, \quad (5.16)$$

bo'lib, $Z_1 Z_2$ ko'paytma haqiqiy son.

$$(5.14) \text{ va } (5.15) \text{ ifodalar } 1 + \frac{Z_1}{4Z_2} \geq 0, \text{ ya'ni } \frac{Z_1}{4Z_2} \geq -1 \quad (5.17)$$

bo'lgandagina haqiqiy sonlar bo'ladi.

(5.16) va (5.17) larni (5.12) bilan taqqoslash shuni ko'rsatadiki, ko'rilyorgan filtr xarakteristik qarshiligining haqiqiy songa teng bo'lish sharti uning o'tkazish sharti bilan mos tushadi. Shuning uchun ham xarakteristik qarshilik haqiqiy qiymatlariga mos keluvchi o'tkazish polosasining chegaraviy chastotalari kesim chastotalari hisoblanadi.

Fizik nuqtai nazardan bu quyidagicha tushuntiriladi. Filtr xarakteristik qarshiligi haqiqiy qiymatlarga teng bo'lgan chastota polosasida filtr qiymati xarakteristik qarshiligiga teng bo'lgan yuklamaga ulangan bo'ladi.

Ushbu bobda filtrlar nazariyasini o'rganayotganimizda filtr yuklamasi moslangan, deb hisoblanadi, aslida esa, barcha chastotalar uchun filtrni moslangan yuklamaga ulash mumkin emas.

Bu yuklama iste'mol qilayotgan quvvat aktiv bo'lib, u quyidagiga teng:

$$P_2 = rI_2^2 = \frac{U_2^2}{r}, \quad (5.18)$$

bunda I_2 , U_2 - filtr chiqishidagi tok va kuchlanishlar ta'sir etuvchi qiymatlari.

Yuklamasi moslangan simmetrik filtr o'tkazish polosasidagi kirish qarshiligi ham aktiv va r ga teng bo'lib, filtr kirishidagi quvvat quyidagiga teng:

$$P_1 = rI_1^2 = \frac{U_1^2}{r}, \quad (5.19)$$

bunda I_1 , U_1 - filtr kirishidagi tok va kuchlanishlar ta'sir etuvchi qiymatlari.

Ideal, ya'ni faqat reaktiv elementlardan tuzilgan filtrda aktiv quvvat sarf bo'lmaydi va shuning uchun $P_1 = P_2$.

(5.18) va (5.19) dan $I_1 = I_2$, $U_1 = U_2$ ekanligi kelib chiqadi, ya'ni signalni so'nishi nolga teng.

Shunday qilib, o'tkazish polosasida filtr aktiv, signalni to'sish polosasida esa reaktiv xarakteristik qarshilikka ega bo'ladi.

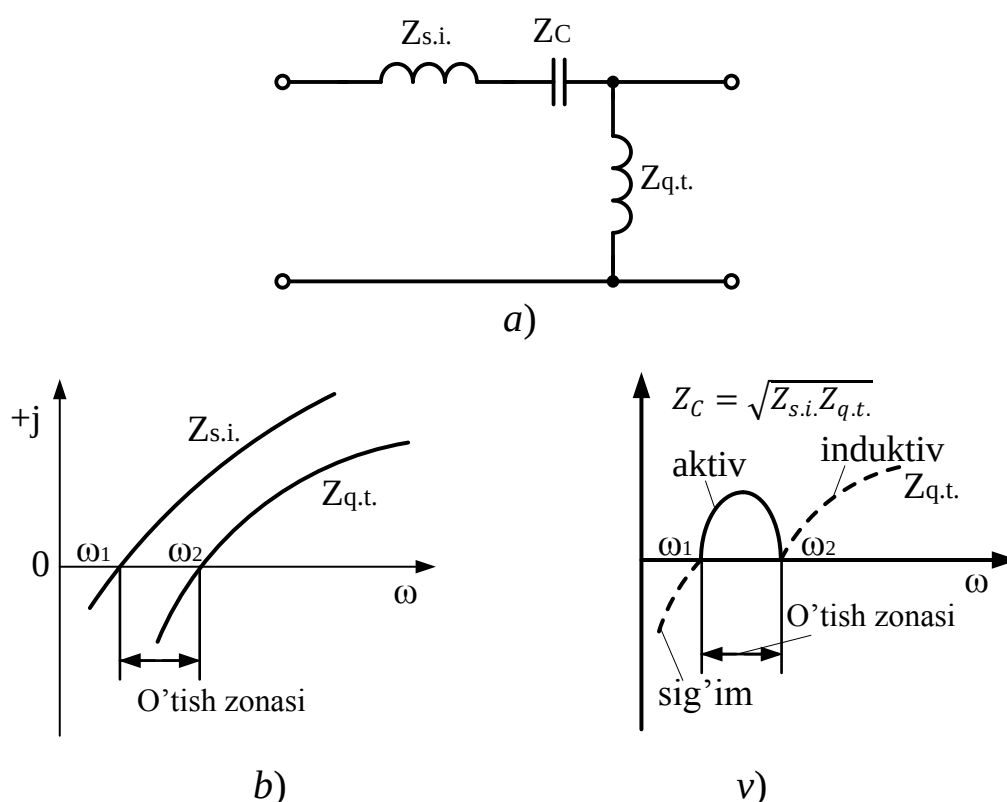
Bundan filtr salt ish ($Z_{s.ish.}$) va qisqa tutashish ($Z_{q.t.}$) rejimlaridagi kirish qarshiliklari chastota tavsiflari bo'yicha kesim chastotalarini grafik usulda aniqlashning oddiy usuli kelib chiqadi.

Filtr xarakteristik qarshiligi Z_C uning $Z_{s.ish.}$ va $Z_{q.t.}$ qarshiliklari orqali quyidagicha aniqlanadi:

$$Z_C = \sqrt{Z_{s.ish.} Z_{q.t.}} \quad (5.20)$$

(5.20) dan ko'rinib turibdiki, $Z_{s.ish.}$ va $Z_{q.t.}$ lar har xil ishoralarida Z_C haqiqiy son bo'ladi.

5.3- rasmda filtr sxemasi (a), uning $Z_{s.ish.} = f(\omega)$ va $Z_{q.t.} = f(\omega)$ chastotaviy tavsiflari (b) va o'tkazish polosasi (v) keltirilgan. 5.3- rasm, b



5.3- rasm

dan ko'rinib turibdiki, filtr o'tkazish polosasi ω_1 va ω_2 chastotalar bilan chegaralangan bo'lib, unda $Z_{s.ish.}$ va $Z_{q.t.}$ lar ishoralari har xil, undan tashqarida esa – bir xil. O'tkazish polosasidan tashqarida $Z_{s.ish.}$ va $Z_{q.t.}$ lar ishoralari har xil bo'lishi (5.20) ga ko'ra xarakteristik qarshilik mavhum

qismga, ya'ni reaktiv qarshilikka ega bo'ladi (5.3- rasm, v dagi uzlikli egri chiziqlar).

Bu holat barcha rusumdagi isrofsiz filtrlar uchun umumiy hisoblanadi.

5.3. k rusumli filtrlar

Γ - simon bug'in elementlari o'zaro teskari ikki qutblikni hosil qilgan bo'lsin. Bunda ular kompleks qarshiliklari ko'paytmasi chastotaning o'zgarish diapazonida o'zgarmas bo'lib, chastotaga bog'lik bo'lmaydi, ya'ni:

$$\frac{1}{2} Z_1 \cdot 2Z_2 = Z_1 Z_2 = k^2, \quad (5.21)$$

bunda k – haqiqiy son.

Γ - simon bug'in Z_T va Z_{II} xarakteristik qarshiliklari ko'paytmasi ham k^2 ga tengligini ko'rsatish mumkin.

Haqiqatan ham, (5.14) ni (5.15) ga ko'paytirib, quyidini hosil qilamiz:

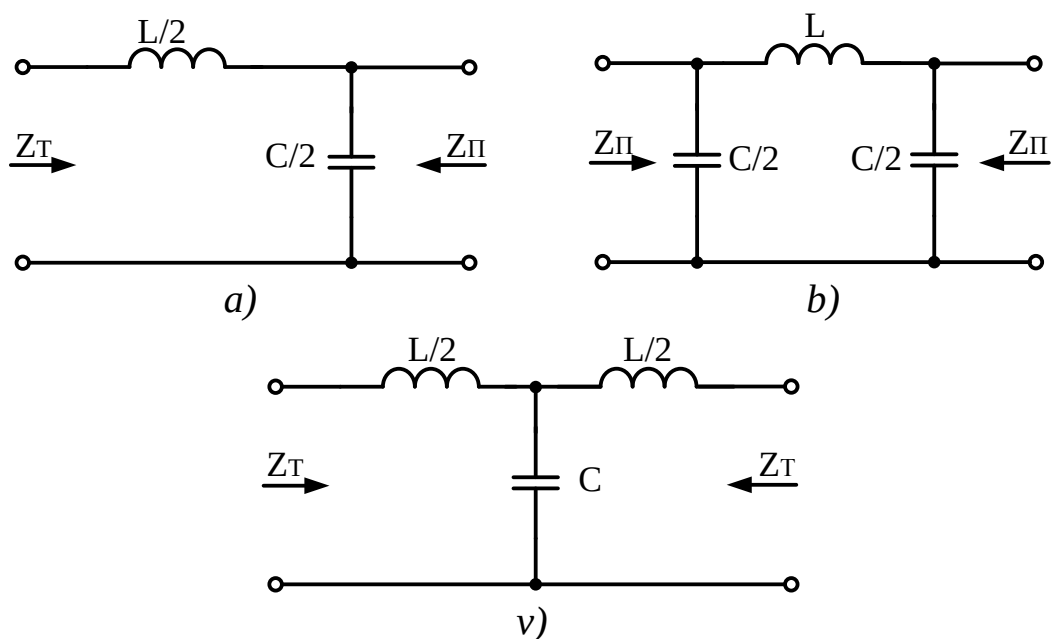
$$Z_T \cdot 2Z_{II} = Z_1 Z_2 = k^2.$$

(5.21) shartni qanoatlantiruvchi filtrlar, avval aytib o'tilganidek, k rusumli filtrlar deb ataladi.

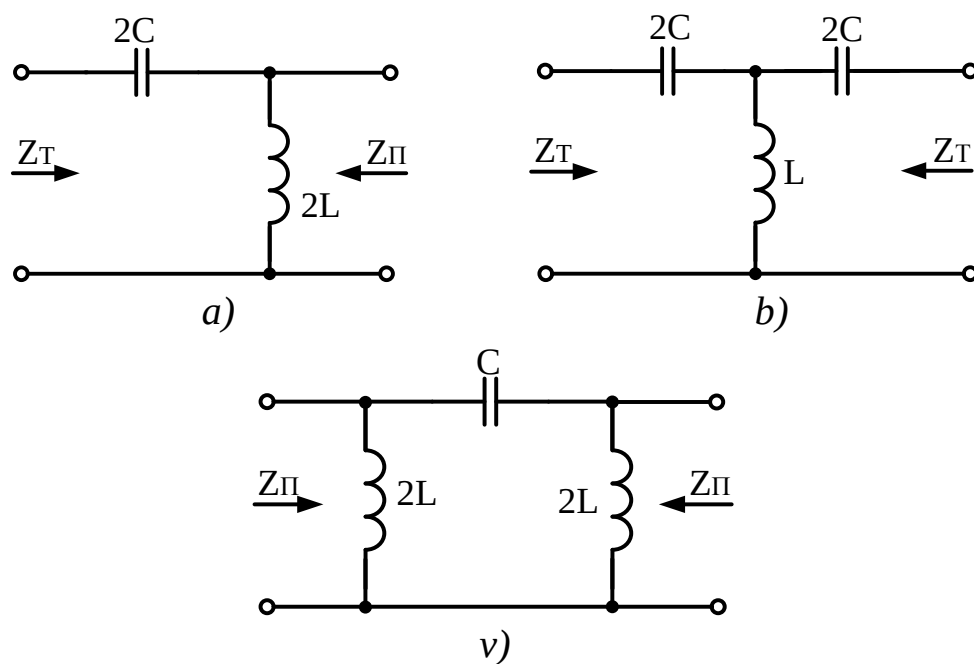
5.4 - 5.7- rasmlarda quyi va yuqori chastota hamda polosali va to'suvchi filtrlar sxemalari keltirilgan.

Fizik nuqtai nazardan bu filtrlar ishlash prinsipi quyidagicha tushuntiriladi: past chastotalarda induktiv qarshilik kichik, sig'im qarshilik katta; yuqori chastotalarda esa aksincha - induktiv qarshilik katta, sig'im qarshilik kichik bo'ladi. Shuning uchun ham, masalan, quyi chastota filtrlarida (5.4- rasm) past chastotali toklar induktivlik orqali yuklamaga deyarli to'siqsiz o'tadi, ularning judaka qismigina sig'im orqali manbaga qaytadi. Yuqori chastotali toklar esa induktivlik chastotaga proporsional ravishda qarshilik ko'rsatadi. Bundan tashqari, induktivlikdan o'tgan tok yuqori chastotali signallar uchun qarshiligi kichik bo'lgan sig'im elementi orqali manbaga qaytadi.

Yuqori chastota filtrlarida (5.5- rasm) bo'ylama shoxobchadagi sig'im elementi qarshiligi yuqori chastotali toklar uchun kichik, ko'ndalang shoxobchadagi induktiv element qarshiligi esa katta bo'lganligi sababli signal yuklamaga juda kam so'nish bilan uzatiladi.



5.4- rasm

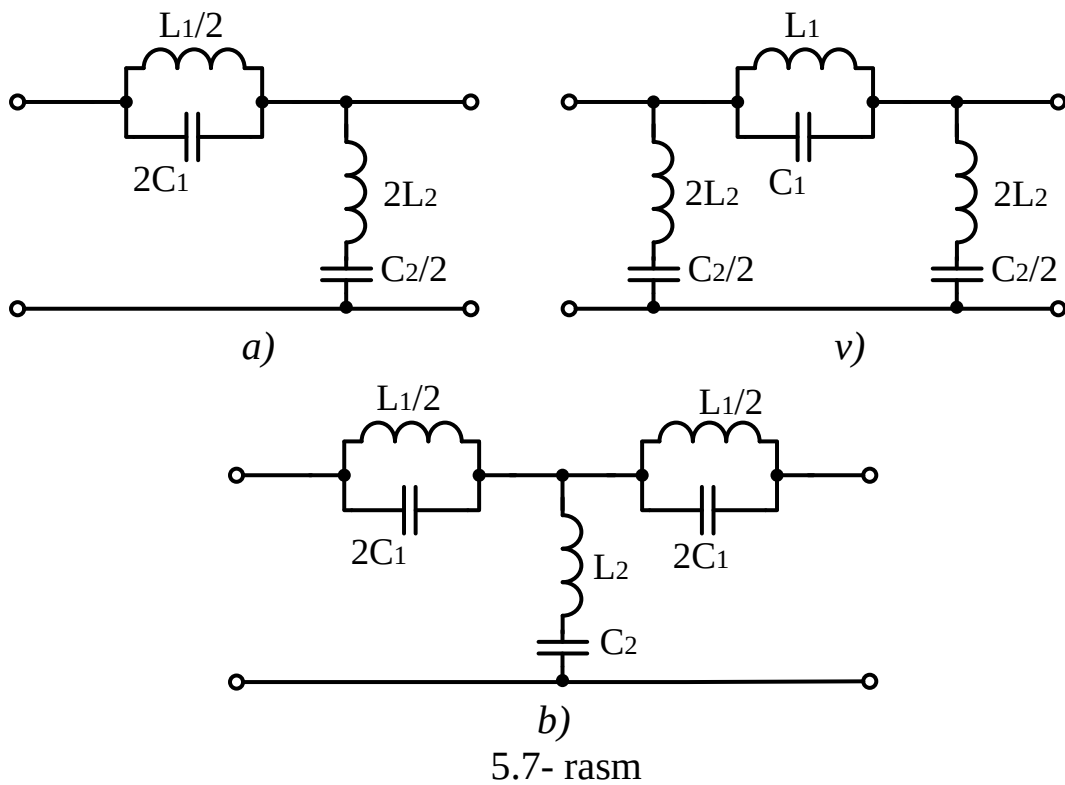
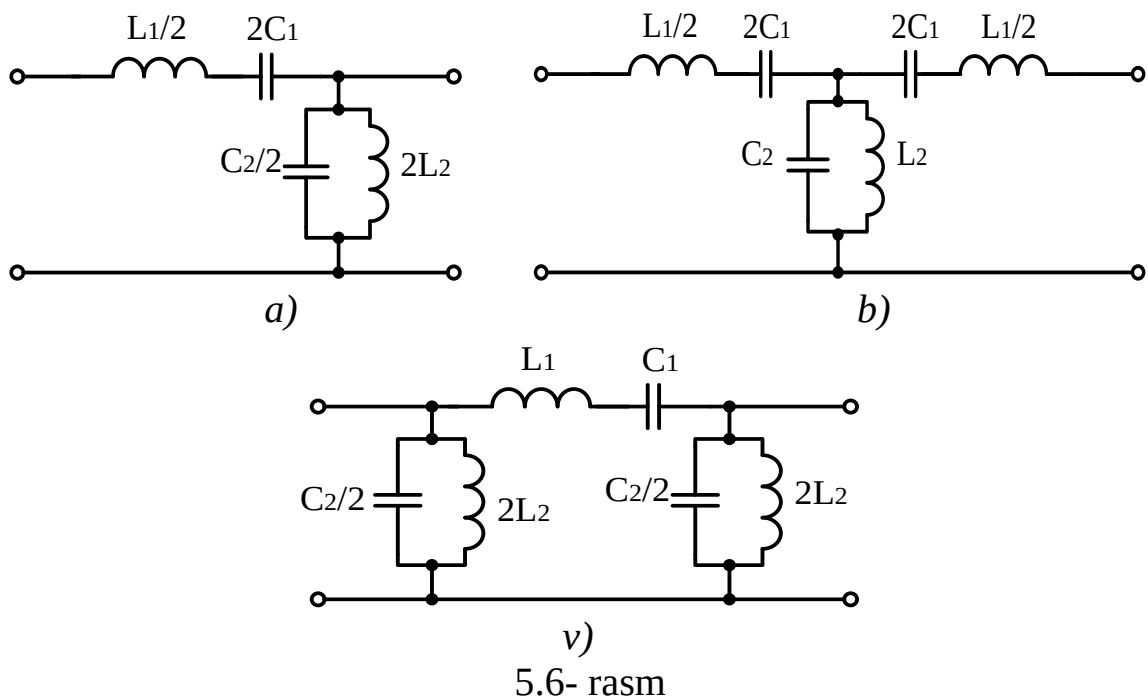


5.5- rasm

O‘z navbatida polosali va to‘suqchi filtrlar (5.6- va 5.7- rasmlar) induktiv va sig‘im elementlari o‘zaro ketma-ket va parallel ulangan ikki qutbliklar chastotaviy bog‘lanishlari asosida ishlaydi.

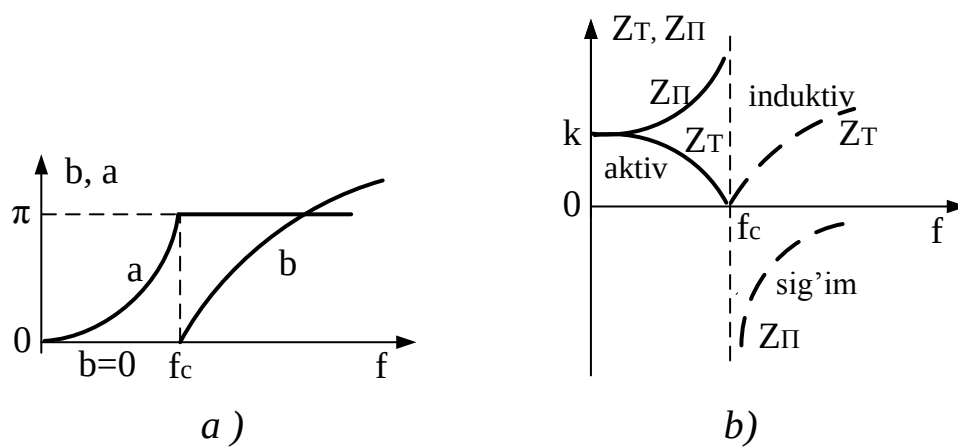
Ko‘rib chiqilayotgan k rusumli filtrlar b , a , Z_T va Z_Π lar chastotaviy tavsiflari 5.8 – 5.11- rasmlarda keltirilgan.

5.8- va 5.9- rasmlarda keltirilgan tavsiflardan ko‘rinib turibdiki, o‘tkazish polosasida moslangan yuklamali simmetrik filtr kirish

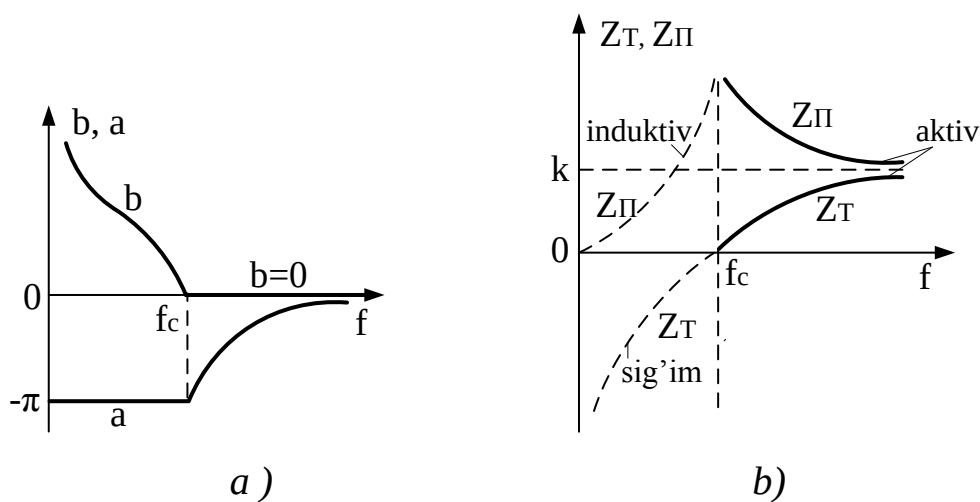


kuchlanishi uning chiqishidagi kuchlanishga nisbatan ilgarilaydi ($a > 0$ - quyi chastotalar filtri) yoki undan orqada qoladi ($a < 0$ - yuqori chastotalar filtri); polosali filtrda (5.10- rasm) a ning ishorasi o'tkazish polosasi oralig'ida minusdan plyusga o'zgaradi. Simmetrik filtr to'sish polosasida faza koeffitsiyenti a π ga (quyi chastotalar filtri), yoki $-\pi$ ga (yuqori chastotalar filtri) teng; simmetrik polosali filtr o'tkazish

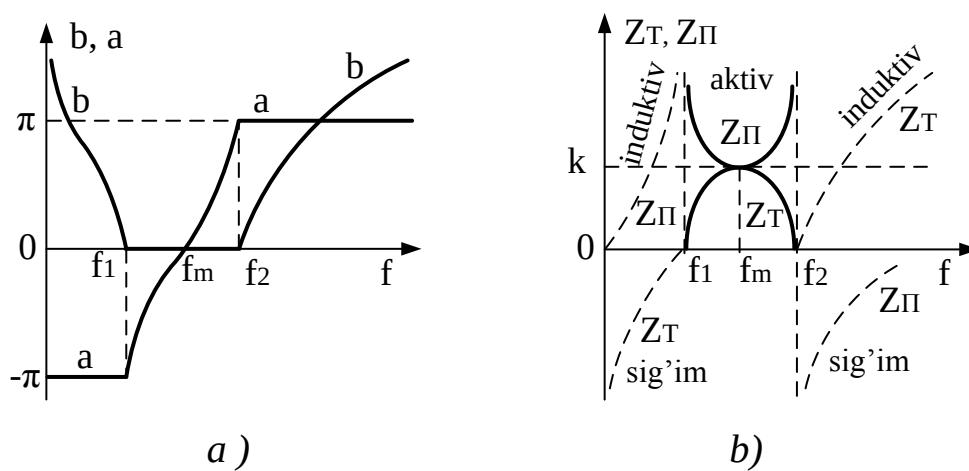
polosasidan pastda faza koeffitsiyenti $-\pi$, o'tkazish polosasidan yuqorida esa π ga teng.



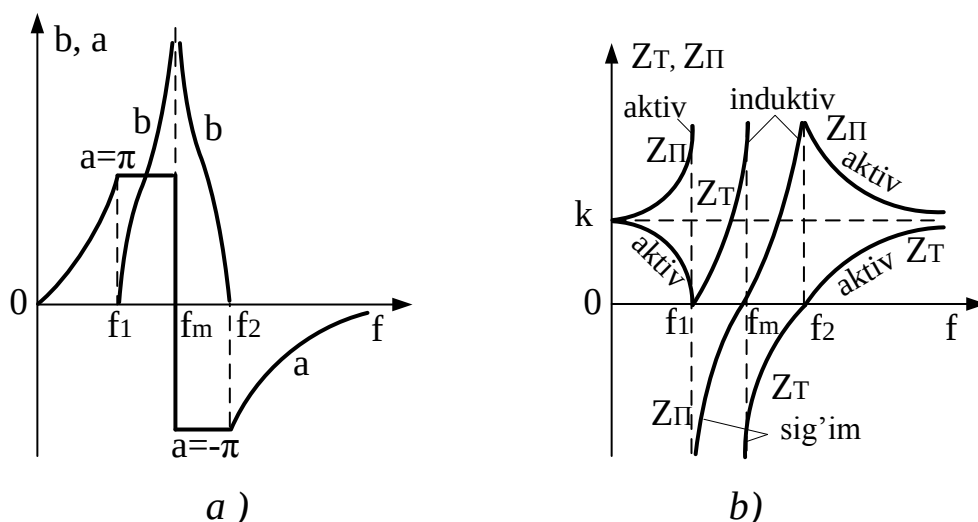
5.8- rasm



5.9- rasm



5.10- rasm



5.7- rasm

Yuqorida aytib o‘tilganidek, Γ - simon filtr faza koeffitsiyenti $0,5a$ ga teng va shuning uchun ham filtr rusumiga qarab, to‘shish polosasida u $0,5\pi$ yoki $-0,5\pi$ ga teng.

Agar Γ - simon filtr moslangan yuklamaga ulangan bo‘lsa, u holda uning kirish va chiqish kuchlanishlari orasidagi faza siljish burchagi $0,5(a + \varphi_{1C} - \varphi_{2C})$ ni tashkil etadi, bunda φ_{1C} , φ_{2C} - ko‘rib chiqilayotgan Γ - simon filtr xarakteristik qarshiliklarining burchaklari.

To‘shish polosasida xarakteristik qarshiliklar mavhum, har xil ishorali va mos ravishda $\varphi_{1C} - \varphi_{2C}$ faza siljish burchagi π yoki $-\pi$ ni tashkil etadi. Bunda moslangan yuklamaga ulangan Γ - simon filtr kirish va chiqish kuchlanishlari orasidagi faza siljish burchagi, so‘nish polosasida $0,5a = \pm 0,5\pi$ ekanligi hisobga olinsa, $\pm \pi$ ga teng bo‘ladi.

Aytib o‘tish joizki, agar , masalan, xarakteristik qarshiligi Z_{Π} bo‘lgan quyi chastotalar Γ - simon filtring chiqishi moslangan yuklamaga ulangan bo‘lsa, u holda o‘tkazish polosasida qarshiligi Z_{Π} ga teng bo‘lgan yuklama aktiv bo‘ladi.

k rusumli filtrlar afzalliklariga ular tuzilishining soddaligi va to‘shish polosasida chastotani kesim chastotasidan uzoqlashishi bilan signalni so‘nishi jaadallashadi.

k rusumli filtrlar kamchiliklariga quyidagilar kiradi:

1. Signalni o‘tkazish polosasida Z_T va Z_{Π} xarakteristik qarshiliklar qiymatlari chastota o‘zgarishi bilan juda keskin o‘zgaradi, natijada o‘tkazish polosasining cheklangan bo‘lagidagina filtrni yuklamaga moslash imkoniyati bo‘ladi, xolos.

2. Kesim chastotasi yaqinida so'nish egri chizig'i tikligi yetarli darajada bo'lmaydi, buning oqibatida chastotalarni aniq ajratish ta'minlanmaydi.

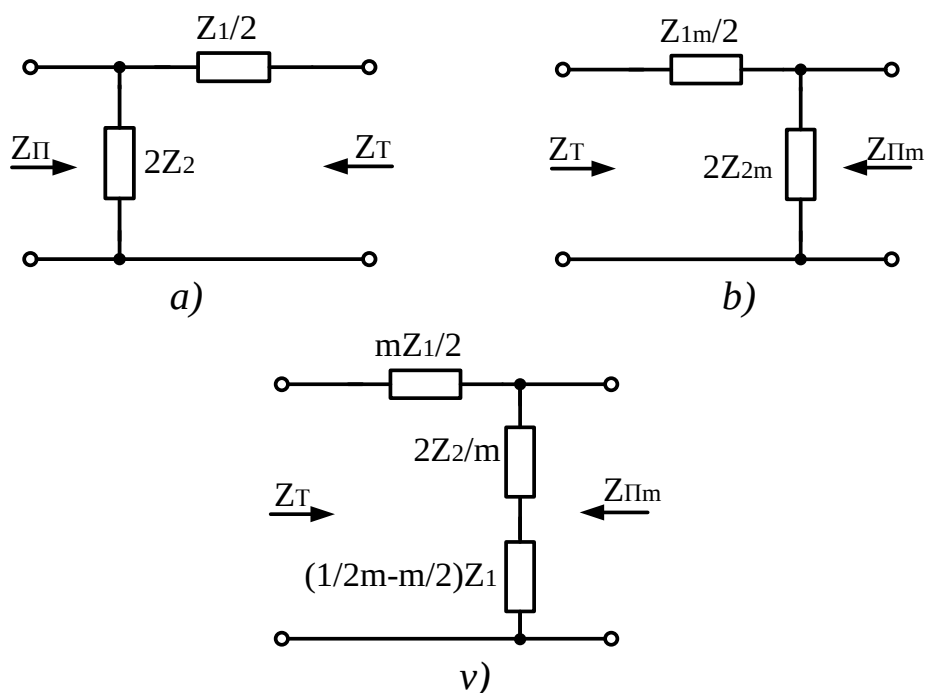
So'nish egri chizig'i tikligini oshirish uchun ko'p bug'inli filtrdan foydalanishga to'g'ri keladi.

5.4. m rusumli filtrlar

Yuklamani filtr bilan samarali moslash uchun filtr xarakteristik qarshiligi o'tkazish polosasida imkoni boricha o'zgarmas bo'lishini ta'minlash lozim. Shu maqsadda k rusumli filtr Γ -simon bug'ini bo'ylama va ko'ndalang shoxobchalarini shunday o'zgartirishga harakat qilamizki, natijada yangi hosil bo'ladigan Γ -simon bug'in xarakteristik qarshiligi filtr o'tkazish polosasida chastota o'zgarganda juda kam o'zgarsin. Bu bug'inning yangi xarakteristik qarshiligi k rusumli dastlabki (prototip deb ataluvchi) bug'in xarakteristik qarshiligiga teng bo'lishi lozim.

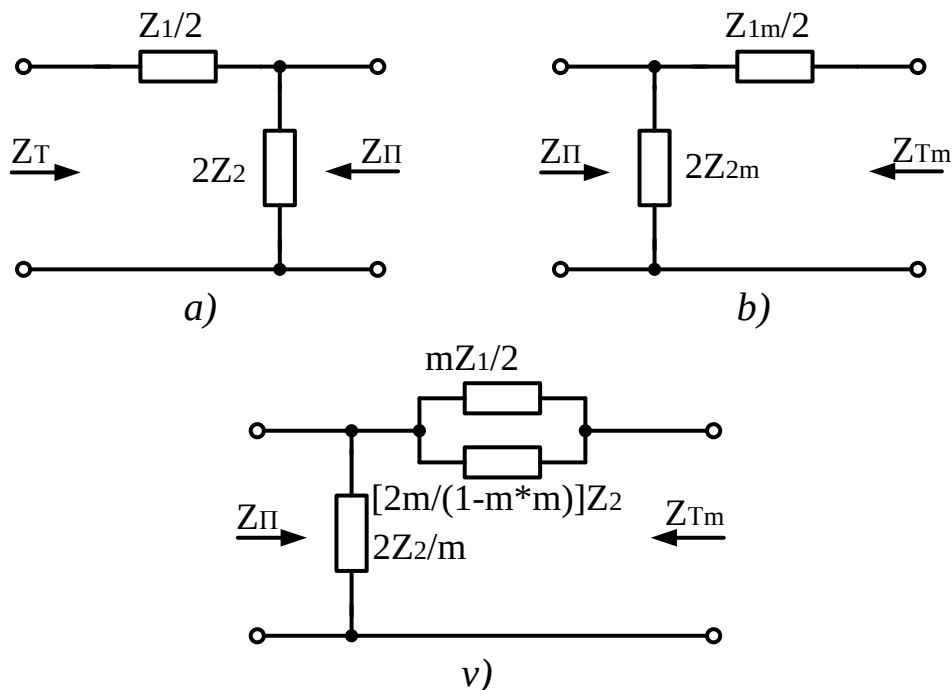
Yangi (m rusumli deb ataluvchi) filtr va uning prototipi xarakteristik qarshiliklarining tengligi ularni o'zaro moslangan holda ulash imkonini beradi va natijada kombinatsiyalangan(birlashgan) filtrlarni hosil qiladi. Bu filtrlarda ikkala filtr afzalliklari qo'shiladi. Γ -simon prototip ikkita xarakteristik qarshilikka ega bo'lganligi sababli quyidagi ikki xil variant bo'lishi mumkin:

1. Z_T xarakteristik qarshilik bir xil bo'lib qoladi (5.12- rasm). Bunda hosil bo'lgan m rusumli bug'in ketma-ket-hosilaviy bug'in deb ataladi.



5.12- rasm

2. Z_{Π} xarakteristik qarshilik bir xil bo'lib qoladi (5.13- rasm). Bu holatda hosil bo'lgan m rusumli bug'in *parallel-hosilaviy bug'in* deb ataladi.



5.13- rasm

Birinchi variantni ko'rib chiqaylik. 5.12- rasm, *a* va *b* da keltirilgan bug'inlar xarakteristik qarshiliklari tenglik shartidan quyidagi kelib chiqadi:

$$Z_T = \sqrt{Z_1 Z_2 \left(1 + \frac{Z_1}{4Z_2}\right)} = \sqrt{Z_{1m} Z_{2m} \left(1 + \frac{Z_{1m}}{4Z_{2m}}\right)}. \quad (5.22)$$

$$Z_{1m} = mZ_1 \quad (5.23) \text{ va } 1 \geq m \geq 0 \quad (5.24) \text{ bo'lsin.}$$

(5.23) ni (5.22) ga qo'yib, u $2Z_{2m}$ ga nisbatan yechilsa:

$$2Z_{2m} = \frac{2Z_2}{m} + \frac{Z_1}{2} \cdot \frac{1-m^2}{m}. \quad (5.25)$$

(5.25) dan ko'rinib turibdiki, m rusumli Γ - simon ketma-ket-hosilaviy bug'in ko'ndalang yelkasi ikkita o'zaro ketma-ket ulangan $\frac{2Z_2}{m}$ va $\frac{(1-m^2)Z_1}{2m}$ qarshiliklardan tashkil topgan (5.12- rasm, *v*).

Endi ikkinchi variantni ko'rib chiqamiz. 5.13- rasm, *a* va *b* da keltirilgan bug'inlar xarakteristik qarshiliklari tenglik shartidan quyidagi kelib chiqadi:

$$Z_{\Pi} = \sqrt{\frac{Z_1 Z_2}{1 + \frac{Z_1}{4Z_2}}} = \sqrt{\frac{Z_{1m} Z_{2m}}{1 + \frac{Z_{1m}}{4Z_{2m}}}}. \quad (5.26)$$

$$Z_{2m} = \frac{Z_2}{m} \quad (5.27) \text{ va } (5.24) \text{ shart o'rinli bo'lsin.}$$

(5.27) ni (5.26) ga qo'yib, u $\frac{2}{Z_{1m}}$ ga nisbatan yechilsa:

$$\frac{2}{Z_{1m}} = \frac{2}{mZ_1} + \frac{1}{Z_2} \cdot \frac{1-m^2}{2m}. \quad (5.28)$$

Demak, m rusumli Γ -simon parallel-hosilaviy bug'in bo'ylama yelkasi ikkita o'zaro parallel ulangan $\frac{mZ_1}{2}$ va $\frac{2mZ_2}{(1-m^2)}$ qarshiliklardan tashkil topgan (5.13- rasm, v).

(5.25) va (5.28) lar asosida Z_{Tm} (5.13- rasm) va $Z_{\Pi m}$ (5.13- rasm) xarakteristik qarshiliklar quyidagi ifodalari aniqlanishi mumkin:

$$Z_{Tm} = Z_T \frac{1}{1 + (1-m^2) \frac{Z_1}{4Z_2}}, \quad (5.29)$$

$$Z_{\Pi m} = Z_{\Pi} \left[1 + (1-m^2) \frac{Z_1}{4Z_2} \right]. \quad (5.30)$$

Quyidagi munosabat o'rinli:

$$Z_{\Pi m} \cdot Z_{Tm} = Z_{\Pi} \cdot Z_T. \quad (5.31)$$

k rusumli filtr va uning asosida hosil qilingan m rusumli filtr o'tkazish polosalari bir xil. Haqiqatan ham, (5.23) va (5.25) lar asosida quyidagini hosil qilish mumlin:

$$\frac{Z_{1m}}{4Z_{2m}} = \frac{mZ_1}{4\left(\frac{Z_2}{m} + \frac{Z_1}{4} \cdot \frac{1-m^2}{m}\right)} = \frac{m^2}{\frac{4Z_2}{Z_1} + 1 - m^2}. \quad (5.32)$$

Xuddi shunday ifodani m rusumli filtr ikkinchi varianti uchun (5.27) va (5.28) lar asosida quyidagini hosil qilish mumlin. (5.32) ga (5.13)

shartni qo'yib, $Z_1 = 0$ va $Z_1 = -4Z_2$ larda mos ravishda $\frac{Z_{1m}}{4Z_{2m}} = 0$ va $\frac{Z_{1m}}{4Z_{2m}} = -1$, (5.33) larni hosil qilamiz.

Bu shartlar m rusumli ketma-ket va parallel-hosilaviy bug'inga ega bo'lgan filtr chegaraviy chastotalariga mos keladi.

O'z navbatida ikkala rusumli filtrlar uchun kesim chastotalari mos keladi.

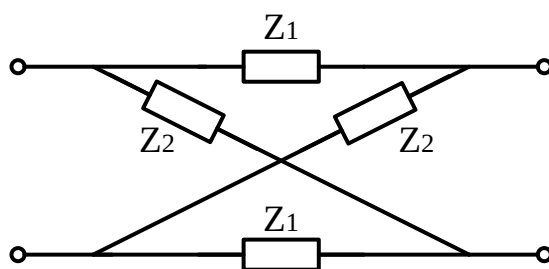
k va m rusumli filtrlar imkoniyatlarini o'zaro taqqoslab shuni aytish mumkinki, o'tkazish polosasida m rusumli filtrlar xarakteristik qarshiligi k rusumli filtrlarnikiga nisbatan nisbatan o'zgarmas saqlanadi. Bundan tashqari, m rusumli filtrlar so'nish egri chizig'i nisbatan tikroq ko'rinishga ega.

m rusumli filtrlar kamchiligi sifatida $f < f_\infty$ (yuqori chastota va polosali filtrlari) va $f > f_\infty$ (quyi chastota va polosali filtrlari) da signal so'nishining susayishini ta'kidlab o'tish mumkin. f_∞ chastotada so'nish cheksizlikka intiladi.

5.5. Ko'priksimon filtrlar

Simmetrik ko'priksimon to'rtqutblik (5.14- rasm) xarakteristik qarshiligi va uzatish o'lchovi quyidagi formulalar yordamida topiladi:

$$Z_M = \sqrt{Z_1 Z_2}; \quad th \frac{g}{2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}. \quad (5.34)$$



5.14- rasm

Filtr o'tkazish polosasi ($b = 0$) $\sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$ ildizning mavhum qiymatlarida va $\sqrt{Z_1 Z_2}$ ildizning haqiqiy qiymatlarida mavjud bo'ladi. Bunda Z_1 va Z_2 lar *har xil ishoraga* ega bo'ladi.

Bunday holatda faza koeffitsiyenti quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi:

$$\operatorname{tg} \frac{a}{2} = \pm \sqrt{\left| \frac{Z_1}{Z_2} \right|}. \quad (5.35)$$

To'sish polosasida Z_1 va Z_2 lar bir xil ishoraga ega bo'ladi. Bu polosada quyidagi ikki holat yuzaga kelishi mumkin: $a = 0$ yoki $a = \pm \pi$.

Birinchi holatda: $\operatorname{th} \frac{g}{2} = \operatorname{th} \frac{b}{2} = \sqrt{\left| \frac{Z_1}{Z_2} \right|}.$

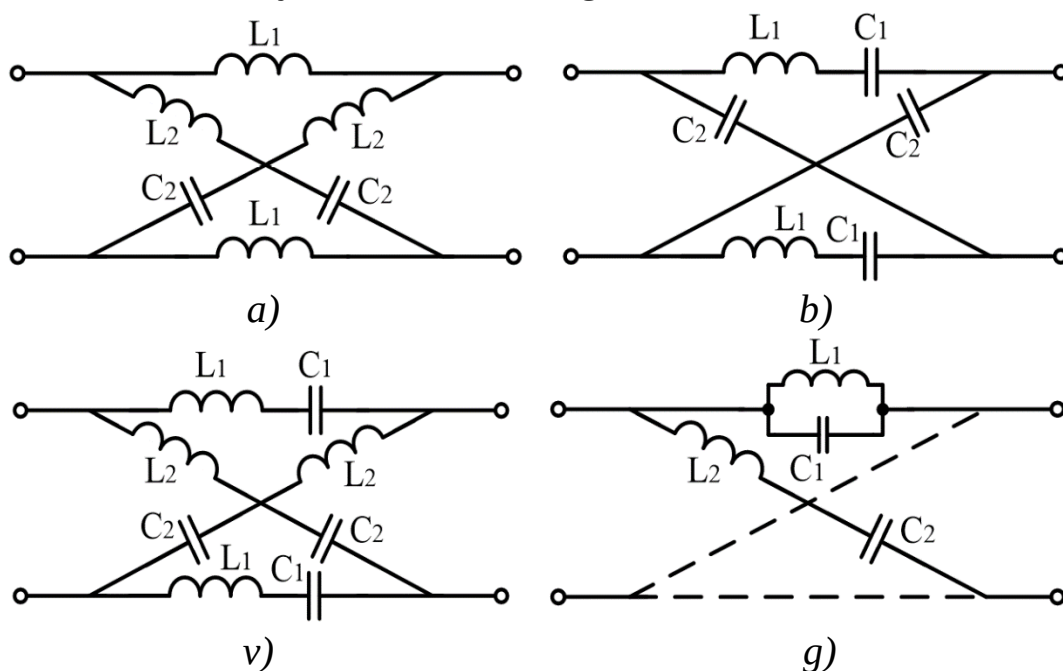
Yuqoridagi yechim $|Z_1| < |Z_2|$ shartga mos keladi, chunki, giperbolik tangens birdan katta bo'lishi mumkin emas.

Ikkinchi holatda: $\operatorname{th} \frac{g}{2} = \operatorname{cth} \frac{b}{2} = \sqrt{\left| \frac{Z_1}{Z_2} \right|}.$

Bu yechim $|Z_1| > |Z_2|$ shartga mos keladi, chunki, giperbolik kotangens birdan kichik bo'lishi mumkin emas.

$Z_1 = Z_2$ bo'lganda so'nish $b = \infty$ bo'ladi, chunki, bunda $\operatorname{th} \frac{b}{2} = 1$ bo'lib, ko'priq sxema chiqishidagi kuchlanish nolga teng. Fizik nuqtai nazardan bu holat ko'priq sxema muvozanatlashganligi bilan izohlanadi.

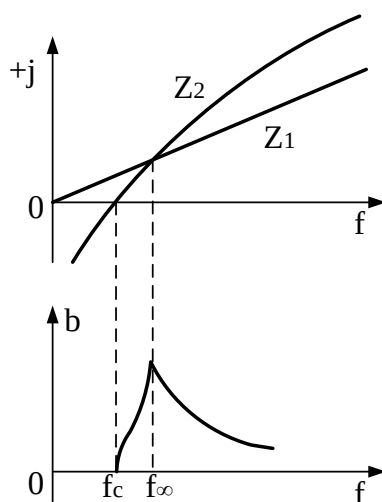
5.15- rasm, a , b , v va g larda mos ravishda quyi, yuqori, polosali va to'suvchi filtrlar oddiy sxemalari keltirilgan.



5.15- rasm

O'tkazish polosasida Z_1 va Z_2 lar har xil ishoraga ega bo'lishiga, Z_1 va Z_2 egri chiziqlari kesishgan nuqtasida, ya'ni $Z_1 = Z_2$ da $b = \infty$ bo'lishiga saoslanib kesim va cheksiz katta so'nish chastotalari (f_{kes} va f_{∞}) ni aniqlash mumkin.

5.16- rasmda quyi chastota filtri misolida ularni aniqlash



5.16- rasm

ko'rsatilgan. Z_1 va Z_2 lar o'zaro kesishmaganda cheksiz katta so'nish chastotasi mavjud bo'lmaydi yoki (Z_1 va Z_2 lar o'zaro asimptotik yaqinlashganda) cheksiz uzoqda joylashgan bo'ladi.

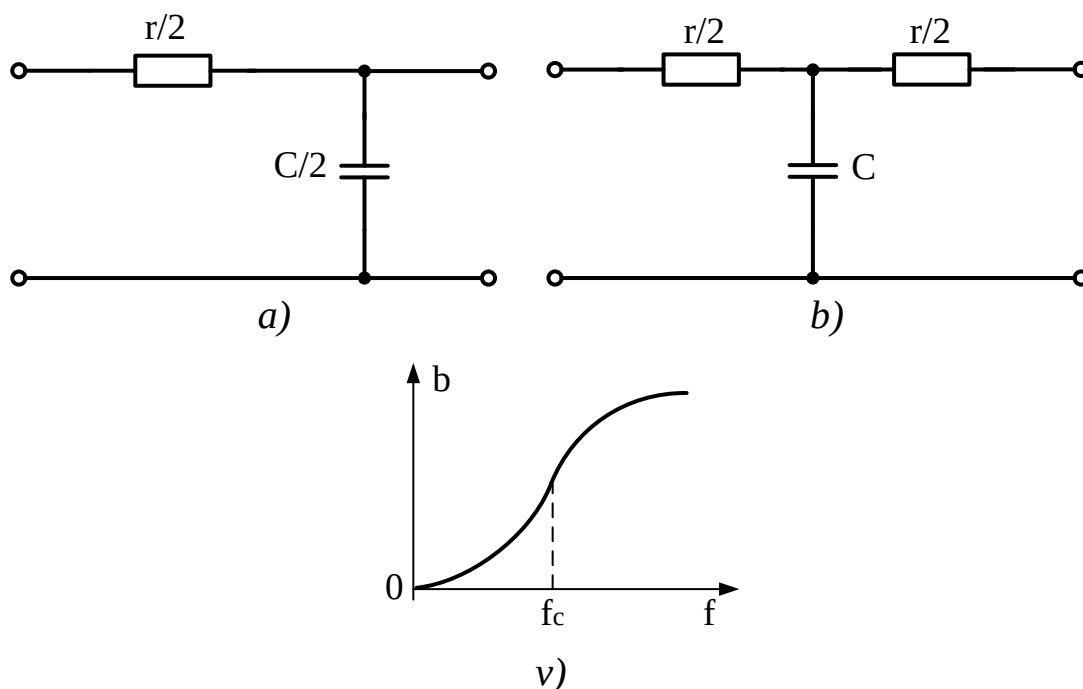
5.6. Noinduksion filtrlar

Quyi chastota sohasida ishlaydigan filtrlar uchun katta induktivlikka va yuqori asllik koeffitsiyentiga ega bo'lgan induktiv g'altaklarni yasashda ma'lum bir qiyinchiliklar yuzaga keladi. G'altak simlari uramlari sonini oshirish uning og'rligi, o'lchamlari va narxlarini oshishiga olib keladi, ferromagnit o'zakdan foydalanish esa g'altak induktivligini undan o'tayotgan tokka bo'g'liq bo'lishiga olib keladi.

Shu sababli, ba'zi hollarda, noinduksion, ya'ni tarkibida induktiv g'altaklar bo'lmagan rC - filtrlardan foydalaniladi. Bu filtrlar faqat aktiv qarshiliklar va sig'implardan tashkil topgan bo'ladi.

5.17- rasmda quyi chastota rC - filtri sxemalari (a , b) va ular xususiy so'nishining chastotaviy tavsifi (ν) keltirilgan. Sig'im qarshilik katta bo'lgan past chastotalarda filtr chiqishidagi kuchlanish uning kirishidagi kuchlanishdan juda kam miqdorga kamayadi. Chastota ortishi bilan sig'im

qarshilik kamayganligi sababli filtr chiqishidagi kuchlanish kamayib (yuqori chastotali signallar sig‘im qarshilik orqaqli manbaga qaytishi hisobiga), so‘nish esa ortib boradi.



5.17- rasm

Bir bug‘inli rC - filtr so‘nish egri chizig‘i (5.17- rasm, v) tikligi kichik bo‘lganligi sababli ikki- yoki uch bug‘inli rC - filtr qo‘llaniladi. Ammo bunda filtr o‘tkazish polosasida ham signalning so‘nishi ortib ketadi.

(5.1) formulaga ko‘ra:

$$chg = ch(b + ja) = chb \cos a + jshb \sin a = 1 + j \frac{\omega r C}{2},$$

$$\text{bundan } chb \cos a = 1, \quad shb \sin a = \frac{\omega r C}{2}. \quad (5.36)$$

O‘zgarmas tok ($\omega = 0$) da (5.36) quyidagicha yoziladi:

$$chb \cos a = 1, \quad shb \sin a = 0. \quad (5.37)$$

Bu tengliklar $a = 0$ va $b = 0$ da o‘rinli bo‘ladi.

Shunday qilib, reaktiv filtrlardan farqli ravishda rC - filtr xususiy so‘nishi b nolga bo‘lgan chastota sohasiga ega bo‘lmaydi.

Quyi chastotalar rC - filtri chastotaviy tavsiflari b va a uchun yozilgan ifodalar bo‘yicha qurilishi mumkin. Bunda b va a ifodalari (5.36) dagi tenglamalarni birgalikda yechib hosil qilinadi. Ularning birinchisini quyidagi ko‘rinishda yozish mumkin:

$$(1 + sh^2 b)(1 - \sin^2 a) = 1.$$

Bu tenglamadagi $\sin a$ o'rniga uning (5.36) ikkinchi tenglamasidan topilgan ifodasi qo'yilsa, quyidagi bikvadrat tenglama hosil bo'ladi:

$$sh^4 b - \left(\frac{\omega r C}{2}\right)^2 sh^2 b - \left(\frac{\omega r C}{2}\right)^2 = 0,$$

bundan

$$shb = \sqrt{\frac{(\omega r C)^2}{8} + \frac{\omega r C}{2}} \sqrt{1 + \frac{(\omega r C)^2}{16}}. \quad (5.38)$$

$\frac{\omega r C}{2} < 1$ shart bajariladigan ω qiymatlarida:

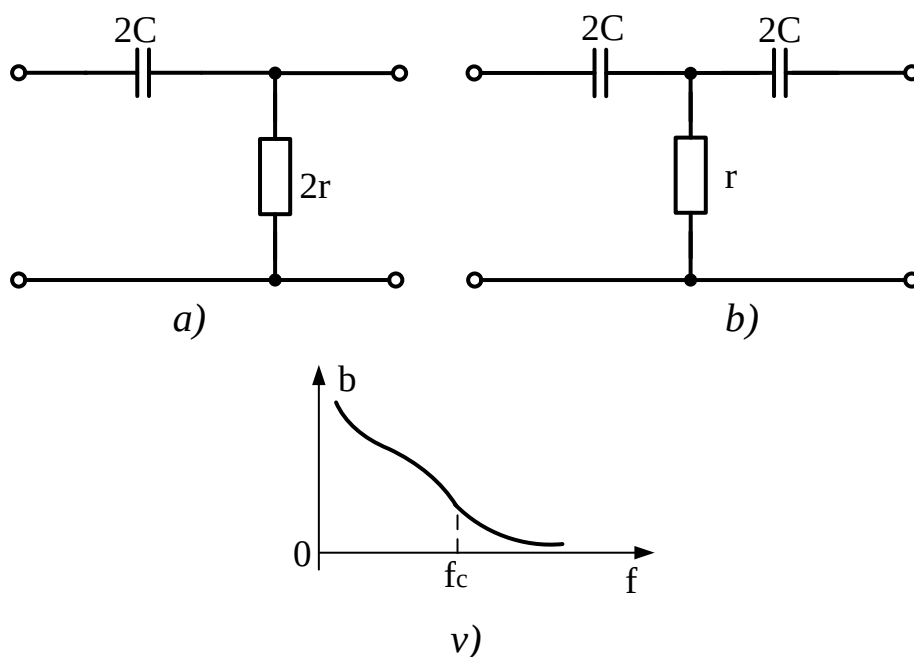
$$shb \approx b \approx \frac{\omega r C}{2}.$$

Quyi chastota rC - filtri kesim chastotasi sifatida shartli ravishda Γ -simon bug'in shoxobchalarining aktiv va sig'im qarshiliklari qiymatlari o'zaro teng bo'ladigan chastota qabul qilinadi, ya'ni:

$$\frac{r}{2} = \frac{2}{\omega_{kes} r C} \quad \text{yoki} \quad \frac{\omega_{kes} r C}{4} = 1.$$

Bu holatda (5.38) ifoda $shb = 2,2$ ga teng bo'ladi, undan $b = 1,54 \text{ nep}$.

5.18- rasmda yuqori chastota rC - filtri sxemalari (a, b) va undagi signallar so'nishining chastotaga bog'liqligining taxminiy tavsifi (v) keltirilgan.



5.18- rasm

Kichik chastotalarda sig'im qarshilik katta bo'lganligi bois filtr chiqishida kuchlanish qiymati kichkina, chunki bu chastotalarda signalning so'nishi katta. Chastota ortishi bilan sig'im qarshilik kamayib borishi natijasida filtr chiqishidagi kuchlanish miqdori ortib boradi, ya'ni signalning so'nishi kamayib boradi.

Bir bug'inli rC - filtr so'nish egri chizig'i (5.18- rasm, v) tikligi kichik bo'lganligi sababli ikki- yoki uch bug'inli rC - filtr qo'llaniladi. Ammo bunda filtr o'tkazish polosasida ham signal so'nishi ortib ketadi.

Nazorat savollari

1. Filtrlar vazifasi va turlarini ayting! 2. Passiv elektr filtrlari tasnifini keltiring! 3. Reaktiv filtrlarning sinallarni o'tkazish shartlarini keltiring! 4. Kesim chastotalari nima? 5. T- simon filtr xarakteristik qarshiligi formulasini yozing! 6. II- simon filtr xarakteristik qarshiligi formulasini yozing! 7. k rusumli filtrlar qanday filtrlar? 8. k rusumli filtrlar afzalliklari va kamchiliklarini ayting! 9. m rusumli filtrlar qanday filtrlar? 10. Ketma-ket-hosilaviy bug'in nima? 11. Parallel-hosilaviy bug'in nima? 12. k va m rusumli filtrlar imkoniyatlarini o'zaro taqqoslang! 13. Ko'priksimon filtrlar xususiyatlarini ayting! 14. Noinduksion filtrlar xususiyatlarini ayting!

6- BOB. UCH FAZALI ZANJIRLAR

6.1. Umumiy ma'lumotlar

Elektr zanjirlarining ko'p fazali tizimi – bu umumiy elektr energiya manbayidan hosil qilinayotgan bir xil chastotali, faza jihatdan bir–biridan (simmetrik uch fazali tizimda 120^0 ga) farq qiladigan elektr yurituvchi kuchlar ta'sirida bo'lgan elektr zanjirlar majmuasidir.

Elektr energiyasi asosan (generatorlar, quyosh batareyalari) manbalar orqali ishlab chiqariladi, uch fazali uzatish liniyalari yordamida uzatiladi va iste'molchilar tomonidan iste'mol qilinadi. Bu holat uch fazali tizimlarni bir fazalilarga nisbatan quyidagi bir qator afzalliklari bilan izohlanadi:

1) elektr energiyasi uch fazali toklar sistemasi ko'rinishida uzatilganda bir fazali tok ko'rinishida uzatilgandagiga nisbatan qariyb 50% rangli metall tejiladi;

2) uch fazali toklar sistemasi tuzilishi jihatdan sodda, yaxshi ish xarakteristikalariga ega bo'lgan, ishlashda ishonchli va arzon hamda bir necha 10 Vt dan 100 kVt va undan katta quvvatli motorlar, transformatorlar va boshqa qurilmalarni yaratish imkonini beradi;

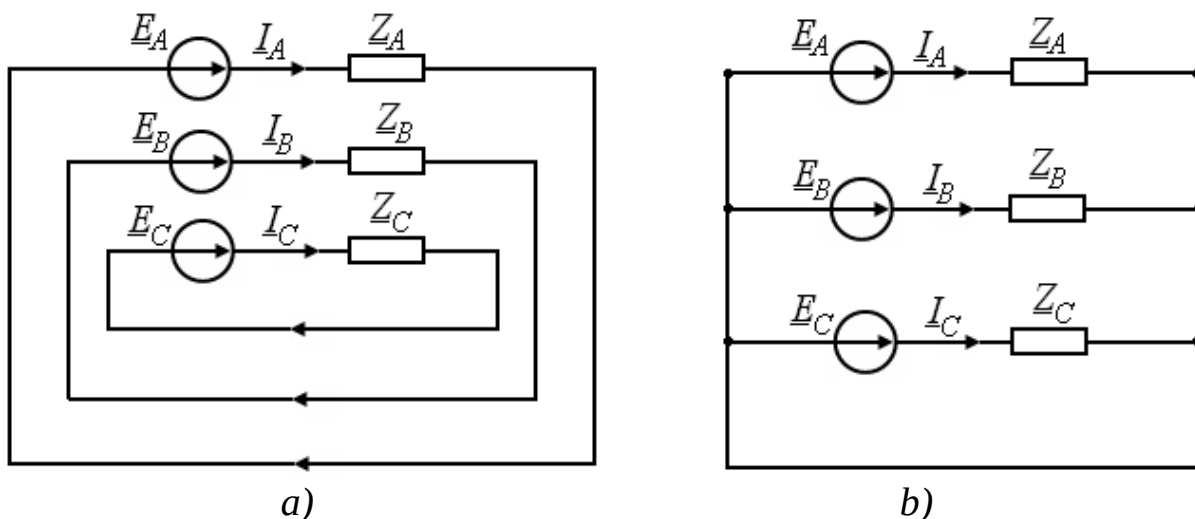
3) uch fazali simmetrik va to'rt simli nosimmetrik sistemada bir-biridan $\sqrt{3}$ ga farq qiluvchi ikkita kuchlanishdan foydalanish mumkin bo'ladi.

Uch fazali zanjirlarni hisoblash bir fazali sinusoidal tok zanjirlarini hisoblashga ma'lum jihatdan o'xshash bo'lsa-da, zanjirda boshlang'ich fazalari har xil bo'lgan bir nechta EYK va toklar ishtiroki hisoblashni ancha murakkablashtiradi.

6.1.1. Uch fazali tizimlar. Uch fazali sinxron generator

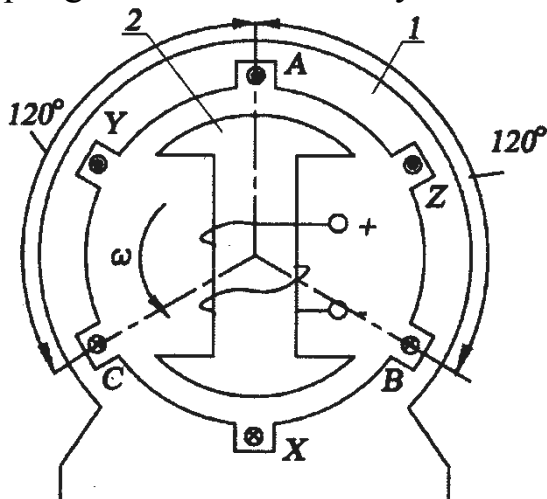
Bir xil chastotali va fazalari bo'yicha o'zaro siljigan sinusoidal EYK lar ta'sirida bo'lgan uchta zanjirlar majmuasi uch fazali sinusoidal tok tizimlari deb ataladi. Agar uch fazali tizimni hosil qiluvchi zanjirlar elektr jihatdan o'zaro ulanmagan bo'lsa, u holda bunday tizim bog'lanmagan uch fazali tizim deb ataladi (6.1- rasm, a). Amaliyotda asosan bog'langan uch fazali tizimlar qo'llaniladi. Bunda toklarni manbaga qaytishi uchun uchta emas, balki ko'pi bilan bitta simdan foydalaniladi (6- rasm, b).

Uch fazali tizimlarni birinchi bo'lib mashhur rus olimi M. O. Dolivo-Dobrovolskiy yaratgan. 1891 yilda bu olim uch fazali tizimlarning barcha zvenolari - generator, transformator va motorlarni ishlab chiqqan.



6.1- rasm

Uch fazali tok elektr energiyasi uch fazali sinxron generatorlar yordamida ishlab chiqariladi. Bu generator asosan ikkita qismdan - qo'zg'almas stator 1 va aylanuvchan rotor 2 dan iborat bo'ladi (6.2- rasm).



6.2- rasm

Rotor chulg'ami o'zgarmas tok manbayidan ta'minlanadi va ushbu tok rotor va statorni kesib o'tuvchi doimiy magnit oqimini hosil qiladi.

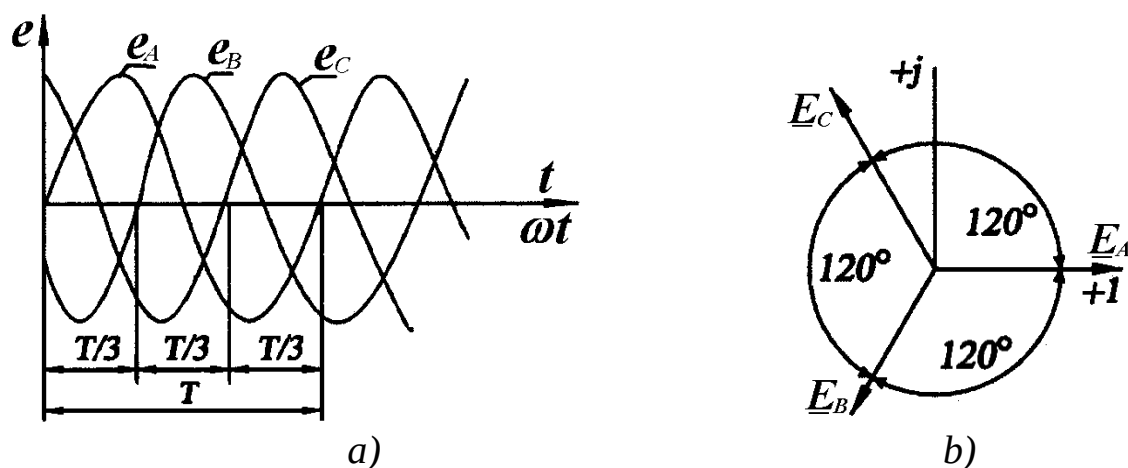
Statorda bir-biridan 120° ga siljigan uchta chulg'am joylashtiriladi. 6.2-rasmda bu chulg'amlar statorning uchta diametral qarama-qarshi pazlarida joylashtirilgan holatda ko'rsatilgan. Chulg'amlar boshlari A, B, C, oxirlari esa X, Y, Z harflari bilan belgilanadi.

Elektromagnit induksiya qonuniga ko'ra bu chulg'amlarda qiymatlari teng va fazalari bo'yicha o'zaro 120° (davrning uchdan bir bo'lagi)ga siljigan sinusoidal EYK lar tizimi hosil bo'ladi, ya'ni

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t, \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ), \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ). \end{aligned} \quad (6.1)$$

Hosil bo'lgan EYK larning vaqtga bog'liqlik to'liqin diagrammasi 6.3- rasm, a da, kompleks tekislikdagi vektor tasviri esa 6.3- rasm, b da keltirilgan. EYK lar kompleks ifodalarini quyidagicha yozish mumkin:

$$\underline{E}_A = E; \underline{E}_B = Ee^{-j120^\circ}; \underline{E}_C = Ee^{-j240^\circ} = Ee^{j120^\circ}. \quad (6.2)$$



6.3- rasm

Bir xil chastotali, amplitudali va fazalari bo'yicha o'zaro 120° ga siljigan sinusoidal EYK lar tizimi *uch fazali simmetrik EYK lar tizimi* deb ataladi. Bu tizimning asosiy xususiyati shundan iboratki, vaqtning istalgan paytida EYK lar oniy qiymatlarining algebraik yig'indisi nolga teng bo'ladi, ya'ni

$$e_A + e_B + e_C = 0. \quad (6.3)$$

(6.3) ifodaning to'g'riligiga 6.3- rasm, a dagi EYK lar oniy qiymatlarini istalgan vaqt uchun algebraik qo'shib yoki $\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0$ tenglik orqali ishonch hosil qilish mumkin, ya'ni:

$$\begin{aligned} \underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C &= E + Ee^{-j120^\circ} + Ee^{j120^\circ} = \\ &= E \left(1 - 0,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2} - 0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 0. \end{aligned}$$

EYK chastotasi generatordagi qutblar soniga va rotorning aylanish chastotasiga bog'liq, ya'ni:

$$f = \frac{pn}{60},$$

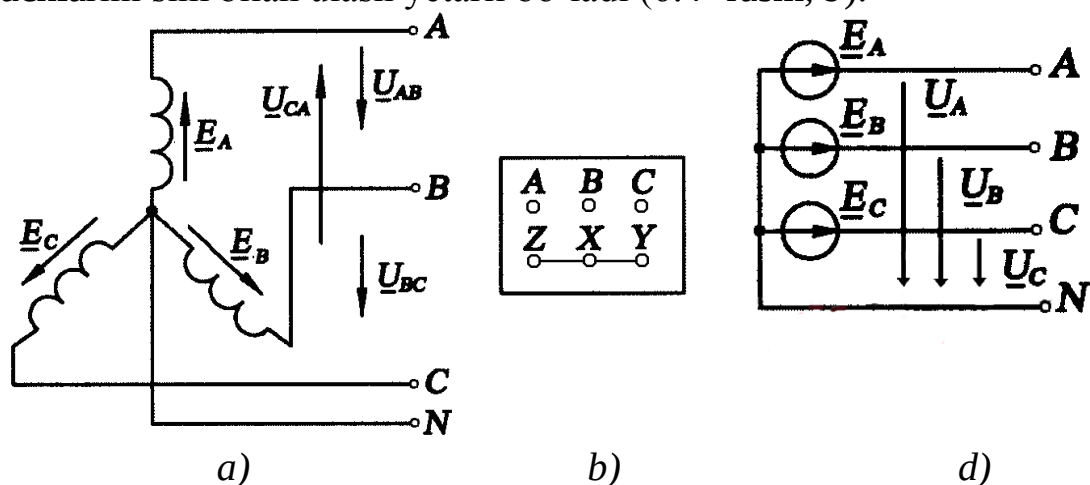
bu yerda p - juft qutblar soni, n - rotorning aylanish chastotasi.

Rotorning konstruktiv tuzilishiga ko'ra, sinxron generatorlar ayon va ayon bo'lmagan qutbli generatorlarga bo'linadi.

6.1.2. Uch fazali zanjirlarning ulanish sxemalari

Uch fazali zanjirlarda generatorlar, motorlar, transformatorlar chulg'amlari va iste'molchilar asosan yulduz va uchburchak sxemalari bo'yicha ulanadi.

Agar generator chulgʻamlarining bir xil nomlangan uchlari oʻzaro ulansa, u holda yulduz sxema hosil boʻladi (6.4- rasm, a). Buning uchun elektr mashina va transformatorlar chulgʻamlarining bir xil nomlangan uchlarini sim bilan ulash yetarli boʻladi (6.4- rasm, b).

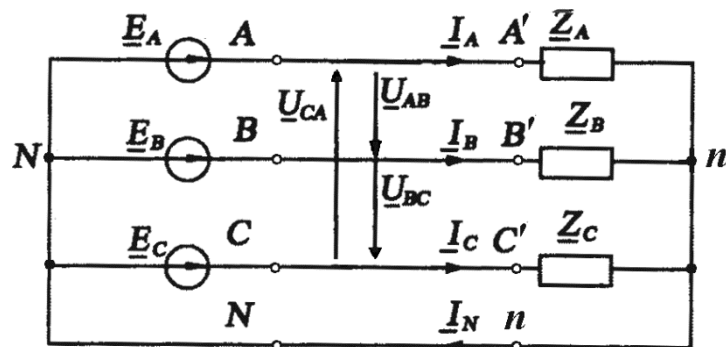


6.4- rasm

Faza chulgʻamlarining bir xil nomlangan uchlari oʻzaro ulangan umumiy nuqta generator neytral nuqtasi deb ataladi va N harfi bilan belgilanadi. Sxema koʻrinishini soddalashtirish maqsadida generator fazalarini oʻzaro 120° burchak ostida emas, balki parallel joylashtiramiz (6.4- rasm, d).

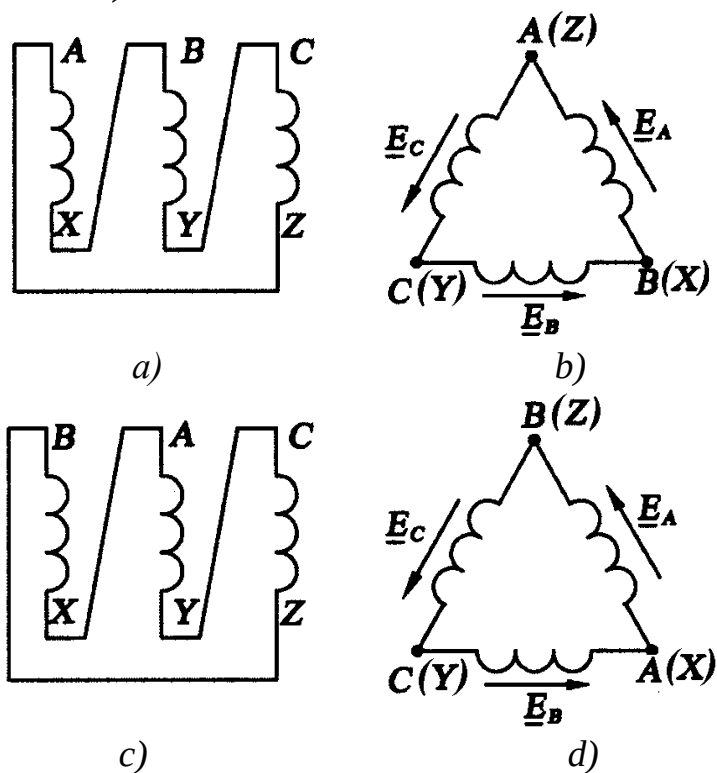
Uch fazali zanjirda yuklama ham yulduz sxemasida ulanishi mumkin. Iste'molchilar fazalari oʻzaro ulangan umumiy nuqta iste'molchilar neytral nuqtasi n, uni generator neytral nuqtasi bilan ulab turuvchi Nn sim neytral sim deb ataladi (6.5- rasm). *Neytral sim fazalar kuchlanishlarining oʻzaro bogʻliqsizligini ta'minlaydi.*

Generator va iste'molchi mos fazalarini ulovchi AA', BB', CC' simlar liniya simlari, ulardagi $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ toklar esa liniya toklari deb ataladi. Liniya simlari orasidagi $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$ kuchlanishlar liniya kuchlanishlari deb ataladi. Liniya simlaridagi toklarning musbat yoʻnalishi shartli ravishda generator(manba)dan yuklama(iste'molchi)ga tomon (elektr energiyasi manbadan iste'molchiga uzatilayotganligi inobatga olib), neytral simdagi tokning musbat yoʻnalishi esa yuklamadan generator tomon olinadi (6.5- rasm). Generator faza chulgʻamlaridan va yulduzcha sxemada ulangan iste'molchilardan oʻtayotgan toklar faza toklari deb ataladi. 6.5- rasmdan koʻrinib turganidek, istemolchilar yulduz sxemada ulanganda liniya toklari faza toklariga teng boʻladi.



6.5- rasm

Uch fazali generator faza chulgʻamlarini uchburchak sxemasi boʻyicha ulash uchun ular oʻzaro ketma-ket ulanadi (6.6- rasm, a, b). Uchburchak ulanganda chulgʻamlar berk kontur hosil qilsa-da, shu konturdagi tok nolga teng, chunki simmetrik EYK lar geometrik yigʻindisi nolga teng boʻladi. Agar biron bir faza teskari ulansa, berk uchburchakda tok keskin oshadi (6.6- rasm, c, d).



6.6- rasm

Chulgʻamlari uchburchak ulangan generator faza kuchlanishi unga mos liniya kuchlanishiga teng, ya'ni $U_F = U_L$. Uchburchak sxemasi boʻyicha ulangan yuklama fazalaridagi I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} toklar esa faza toklari deb ataladi.

Elektroenergetikada generator chulgʻamlari hamda yuklamaning "yulduz-uchburchak", "uchburchak-yulduz", "yulduz-yulduz", "uchburchak-uchburchak" sxemalari keng qoʻllaniladi.

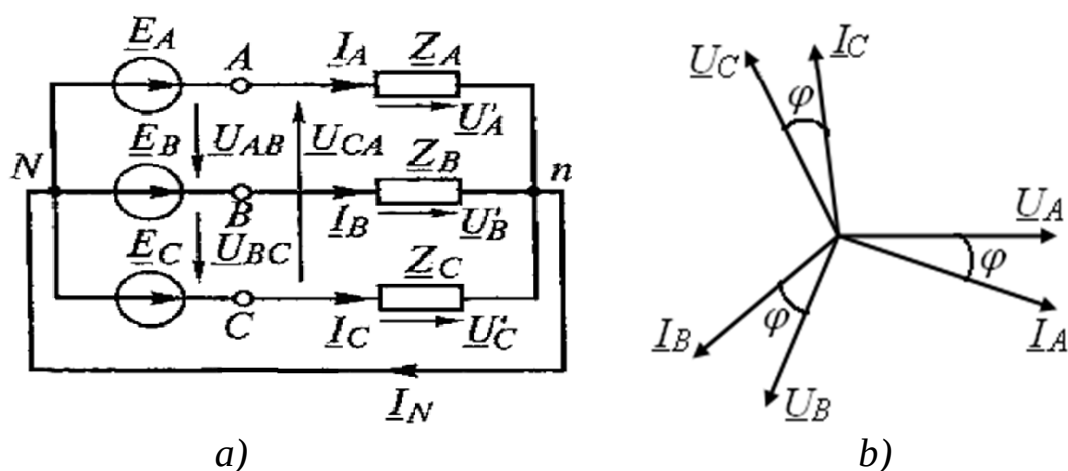
6.2. Uch fazali zanjirlarning simmetrik rejimi

Kompleks qarshiliklari oʻzaro teng boʻlgan uch fazali yuklama $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$ "yulduzcha" yoki "uchburchak" usulda ulanishidan qatʼiy nazar simmetrik kuchlanish(EYK)lar sistemasidan taʼminlanayotgan uch fazali zanjir rejimi simmetrik rejim deb ataladi. Bunday zanjir shoxobchalaridan simmetrik toklar oʻtadi.

6.2.1. Yuklama yulduz usulda ulangan zanjirda simmetrik rejim

Yulduz usulda ulangan simmetrik zanjirda (6.7- rasm, a): $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = ze^{j\varphi}$. Yuklama qarshiliklari induktiv xarakterga ($\varphi > 0$) ega deb hisoblab, kuchlanishlar va toklar vektor diagrammasini quramiz (6.7- rasm, b). Simmetrik rejimda $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ faza kuchlanishlari simmetrik vektorlar sistemasini hosil qiladi:

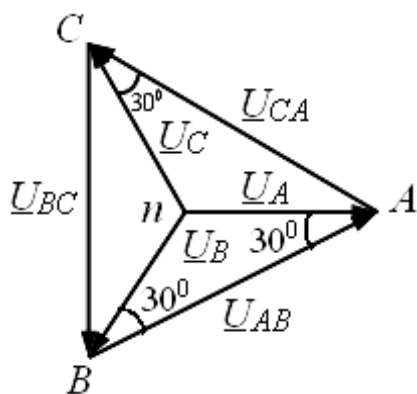
$$\underline{U}_A = \underline{U}'_A = U_F, \underline{U}_B = \underline{U}'_B = U_F e^{-j120^\circ}, \underline{U}_C = \underline{U}'_C = U_F e^{j120^\circ}.$$



6.7- rasm

Har bir fazadagi tok mos faza kuchlanishidan φ burchakka orqada qoladi va toklar ham simmetrik vektorlar sistemasini hosil qiladi (6.7- rasm, b).

Kirxgof birinchi qonuniga koʻra $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$, bu yerda $\underline{I}_N$ - neytral simdagi tok. Simmetrik rejimda $\underline{I}_N = 0$, chunki modullari teng va oʻzaro 120° ga siljigan vektorlarning yigʻindisi nolga teng.



6.8- rasm

Kuchlanishlar topografik diagrammasi (6.8-rasm) dan ko‘rinib turibdiki, liniya kuchlanishlari vektorlari faza kuchlanishlari vektorlari uchlarini birlashtiruvchi vektorlar ko‘rinishida bo‘ladi. Simmetrik rejimda liniya kuchlanishlarining qiymatlari teng bo‘lib, bir-biridan o‘zaro 120° ga siljigan bo‘ladi. Topografik diagrammadan:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B, \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C, \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A, \text{ yoki}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B = U_F - U_F e^{-j120^\circ} = U_F (1 - e^{-j120^\circ}) = \\ &= U_F \left(1 + 0,5 + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = U_F \left(\frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \sqrt{3} U_F \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right) = \\ &= \sqrt{3} U_F e^{j30^\circ}. \end{aligned}$$

Xuddi shunga o‘xshash:

$$\underline{U}_{BC} = \sqrt{3} \underline{U}_B e^{j30^\circ} = \sqrt{3} U_F e^{-j90^\circ},$$

$$\underline{U}_{CA} = \sqrt{3} \underline{U}_C e^{j30^\circ} = \sqrt{3} U_F e^{j150^\circ}.$$

Yuqoridagi tengliklardan ko‘rinib turibdiki, simmetrik rejimda liniya kuchlanishi faza kuchlanishidan $\sqrt{3}$ marta katta. Buni topografik diagrammadagi teng yonli uchburchak xossasidan foydalanib ham hosil qilishimiz mumkin: AnB uchburchakdan $\cos 30^\circ = \frac{U_{AB}/2}{U_A} = \frac{U_L}{2U_F} = \frac{\sqrt{3}}{2}$

bundan $U_L = \sqrt{3} U_F$.

Diagrammaga ko‘ra $\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA} = 0$, chunki bu kuchlanishlar har doim yopiq uchburchak hosil qiladi.

Demak, yulduz ulangan simmetrik uch fazali zanjirda $U_L = \sqrt{3} U_F$, $I_L = I_F$.

Shuni ta’kidlab o‘tish joizki, mamlakatimizda past (1000 B gacha) kuchlanishli zanjirlarda quyidagi nominal liniya va faza kuchlanishlaridan foydalaniladi:

$$U_L = 220 \text{ V}, U_F = 127 \text{ V}; U_L = 380 \text{ V}, U_F = 220 \text{ V}; U_L = 660 \text{ V}, U_F = 380 \text{ V}.$$

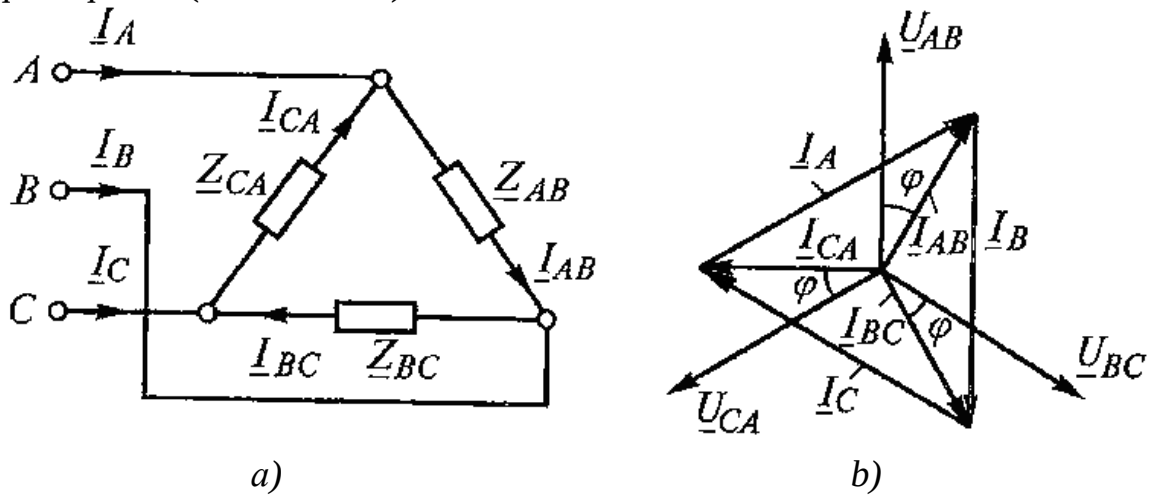
6.2.2. Yuklama uchburchak usulda ulangan zanjirda simmetrik rejim

Yuklama uchburchak ulangan uch fazali zanjirda $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = ze^{j\varphi}$ shart bajarilganida va u simmetrik EYK (kuchlanish) lar sistemasidan ta'minlanganida zanjirda simmetrik rejim yuzaga keladi (6.9- rasm, a). Kuchlanishlar topografik diagrammasi 6.9- rasm, b da keltirilgan. Unga ko'ra kuchlanishlar simmetrik yulduz hosil qiladi.

Kirxgof birinchi qonuniga ko'ra liniya toklari faza toklari orqali quyidagicha ifodalanadi:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA}, \underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}, \underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}.$$

Bundan $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$ ekanligi kelib chiqadi, ya'ni liniya toklari simmetrik vektorlar sistemasini hosil qiladi. Yuklama induktiv ($\varphi > 0$) xarakterli bo'lganida faza toki mos faza kuchlanishidan φ burchakka orqada qoladi (6.9- rasm, b).



6.9- rasm

$\underline{I}_A$ liniya tokini faza toklari orqali ifodalaymiz:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA} = I_F - I_F e^{j120^\circ} = I_F (1 - e^{j120^\circ}) = \sqrt{3} I_F e^{-j30^\circ}$$

boshqa liniya toklari uchun esa:

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB} = \sqrt{3} I_F e^{-j150^\circ}, \underline{I}_C = \sqrt{3} I_F e^{j90^\circ}.$$

Shunday qilib, yuklama uchburchak ulangan simmetrik uch fazali zanjirda liniya kuchlanishi faza kuchlanishiga teng bo'lib, liniya toki faza tokidan $\sqrt{3}$ marta katta bo'ladi, ya'ni $U_L = U_F$, $I_L = \sqrt{3} I_F$.

6.2.3. Simmetrik uch fazali sistemaning quvvatlari

Ikkinchi bobda ko'rib o'tganimizdek, sinusoidal tok zanjirida oniy quvvat vaqtning funksiyasi bo'lib, quyidagiga teng:

$$p = ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = UI[\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)].$$

Simmetrik uch fazali zanjirda oniy quvvat fazalar oniy quvvatlarining yig'indisi ko'rinishida aniqlanadi, ya'ni:

$$\begin{aligned} p &= p_A + p_B + p_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C = U_F \sqrt{2} \sin \omega t \cdot I_F \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) + \\ &+ U_F \sqrt{2} \sin(\omega t - 120^\circ) \cdot I_F \sqrt{2} \sin(\omega t - 120^\circ - \varphi) + \\ &+ U_F \sqrt{2} \sin(\omega t + 120^\circ) \cdot I_F \sqrt{2} \sin(\omega t + 120^\circ - \varphi) = \\ &= U_F I_F [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] + U_F I_F [\cos \varphi - \cos(2\omega t - 240^\circ - \varphi)] + \\ &+ U_F I_F [\cos \varphi - \cos(2\omega t + 240^\circ - \varphi)] = 3U_F I_F \cos \varphi. \end{aligned} \quad (6.4)$$

ifodadan ko'rinish turibdiki, simmetrik uch fazali zanjirning oniy quvvati vaqtga bog'liq emas va zanjir aktiv quvvatiga teng. Bu uch fazali tizimning o'ziga xos xususiyatlaridan biri bo'lib, davr mobaynida generator ta'minlab turgan yuklama (masalan, rotor valining aylantiruvchi momenti) o'z qiymatini o'zgarishsiz saqlaydi.

Bir davr mobaynida oniy quvvat qiymati o'zgarmaydigan uch fazali zanjir *muvozanatlashgan zanjir* deb ataladi. Nosimmetrik rejimda esa bu xossa o'z kuchini yo'qotadi.

Uch fazali zanjir aktiv quvvati har bir faza aktiv quvvatlarining yig'indisiga teng, ya'ni:

$$P = P_A + P_B + P_C = 3P_F = 3U_F I_F \cos \varphi.$$

Uch fazali zanjirlarni hisoblashda liniya kuchlanishi va toklardan foydalanish qulayroq. Yulduz ulangan sxema uchun $U_F = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$, $I_F = I_L$,

uchburchak ulangan sxema uchun esa $U_F = U_L$, $I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$ bo'lganligi sababli ulanish sxemasidan qat'i nazar simmetrik uch fazali zanjirning aktiv quvvati $P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi$ ifoda bilan aniqlanadi.

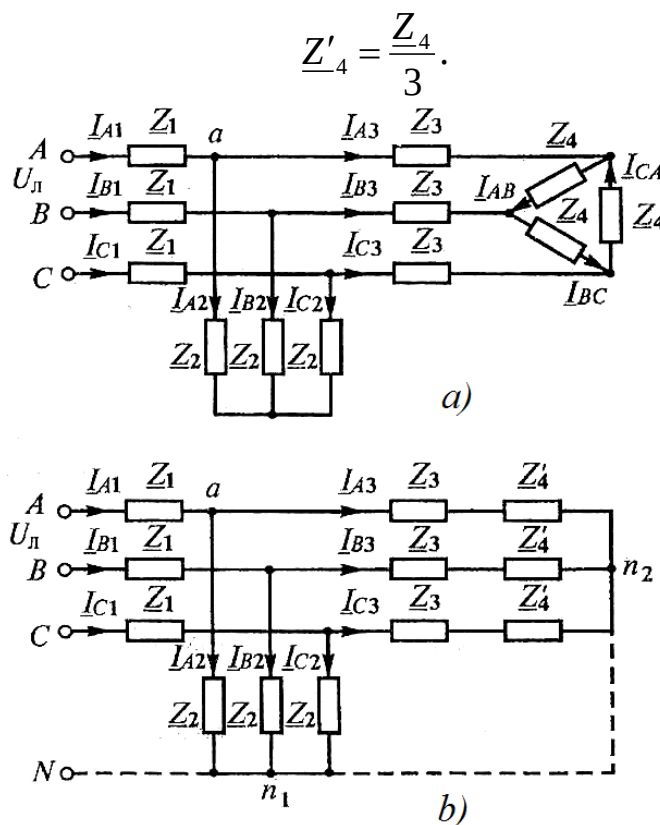
Simmetrik uch fazali zanjirning reaktiv va to'la quvvatlari quyidagicha topiladi: $Q = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi$, $S = \sqrt{3}U_L I_L$, bu yerda φ - faza kuchlanishi va faza toki orasidagi burchak siljishi.

Agar simmetrik uch fazali zanjirda yulduz ulangan faza yuklamalari uchburchak sxemasida qayta ylansa, u holda $U_L = \sqrt{3}U_F$. munosabat hisobidan har bir faza yuklamasidagi tok $\sqrt{3}$ marta, har bir liniyadagi tok

esa $I_L = \sqrt{3}I_F$. munosabat hisobidan 3 marta ortadi. Buning natijasida uch fazali yuklama quvvati 3 marta ortadi.

6.2.4. Murakkab uch fazali simmetrik zanjirlarni hisoblash

Uch fazali simmetrik zanjirlar fazalaridagi toklar modul jihatdan teng bo'lib, o'zaro 120° ga siljigan bo'ladi. Shuning uchun ham bunday zanjirlarni hisoblashda bitta fazadagi tokni aniqlash kifoya. Hisoblash tartibini 6.10-rasm, a da keltirilgan zanjir misolida ko'rib chiqamiz. Bunda manba kuchlanishlari va zanjir qarshiliklari berilgan bo'lib, har bir fazadagi toklarni topish talab etiladi. Buning uchun birinchi navbatda liniya va faza toklari musbat yo'nalishlarini sxemada belgilaymiz va $\underline{Z}_4$ qarshilikli uchburchakni unga ekvivalent yulduz bilan almashtiramiz (6.10-rasm, b). Bunda hosil bo'lgan yulduz sxema qarshiligi quyidagiga teng:



6.10- rasm

Zanjir tarkibiga neytral simni fikran kiritamiz. Zanjir neytral nuqtalari potentsiallari bir xil bo'lganligi sababli neytral simdan foydalanish zanjirdagi toklar taqsimlanishiga ta'sir etmaydi. Zanjirdagi bitta faza, masalan, A faza uchun toklarni hisoblaymiz. Bunda qarshiliklarni ekvivalent almashtirish usulidan foydalanamiz. Unga ko'ra

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2(\underline{Z}_3 + \underline{Z}'_4)}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}'_4}, \quad U_A = U_L / \sqrt{3}.$$

A fazadagi kompleks liniya toklari:

$$\underline{I}_{A1} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}}, \quad \underline{I}_{A2} = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_2}, \quad \underline{I}_{A3} = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}'_4},$$

bu yerda $\underline{U}_a = \underline{I}_{A1} \frac{\underline{Z}_2(\underline{Z}_3 + \underline{Z}'_4)}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}'_4}.$

Boshqa fazalardagi toklar A faza toklariga nisbatan 120° ga siljigan bo'ladi. Masalan, $\underline{I}_{B1} = \underline{I}_{A1} e^{-j120^\circ}$, $\underline{I}_{C1} = \underline{I}_{A1} e^{j120^\circ}$ va h.k.

$\underline{Z}_4$ qarshilikli uchburchak sxemadagi toklar quyidagicha topiladi:

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{I}_{A3}}{\sqrt{3}} e^{j30^\circ}, \quad \underline{I}_{BC} = \underline{I}_{AB} e^{-j120^\circ}, \quad \underline{I}_{CA} = \underline{I}_{AB} e^{j120^\circ}.$$

6.3. Nosimmetrik uch fazali zanjirlar

Uch fazali zanjirlarda nosimmetrik rejimlar turli sabablarga ko'ra yuzaga kelishi mumkin: yuklama nosimmetrik bo'lganida, generator faza EYK lari har xil bo'lganida, nosimmetrik (masalan, ikkita faza o'rtasida, faza bilan neytral sim o'rtasida) qisqa tutashishda, fazaning uzilib qolishi va h.k.

Nosimmetrik uch fazali zanjirlarni hisoblash bir fazali zanjirlarni hisoblashda foydalanilgan usullar yordamida amalga oshiriladi. Quyida har xil nosimmetrik rejim turlarini hisoblash xususiyatlarini ko'rib chiqamiz.

6.3.1. Yulduz usulda ulangan neytral simli zanjir

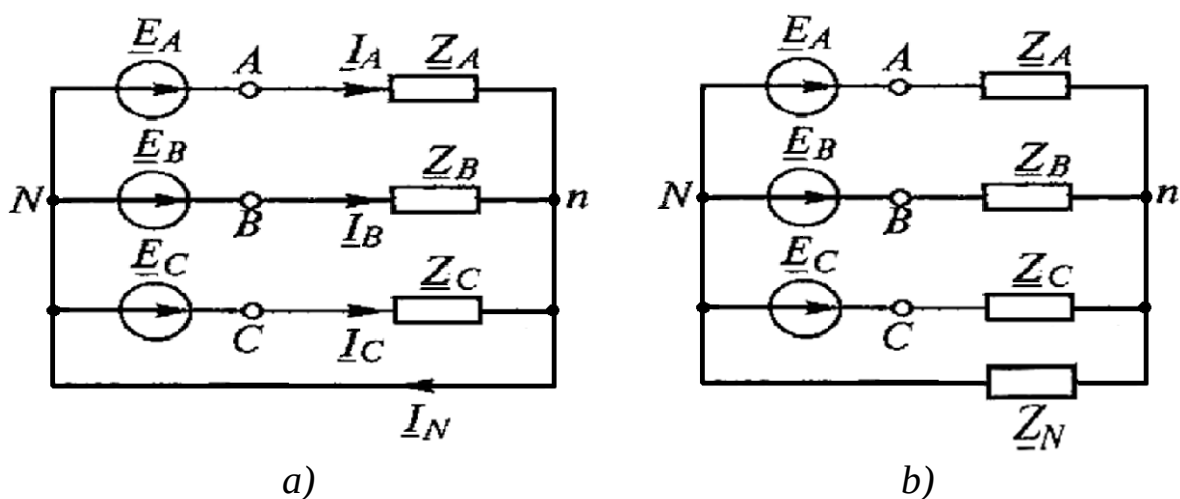
Yuklama qarshiliklari ($\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$) yulduz usulda ulangan to'rt simli ($\underline{Z}_N = 0$) zanjir simmetrik kuchlanishlar sistemasidan ta'minlanayotgan bo'lsin (6.11- rasm, a). Qarshiligi nolga teng bo'lgan neytral simning mavjudligi fazalar o'zaro bog'liqsizligini ta'minlaydi va shuning uchun $\underline{U}_A = U_F$; $\underline{U}_B = U_F e^{-j120^\circ}$; $\underline{U}_C = U_F e^{j120^\circ}$ bo'lganda iste'molchilar faza toklari $\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_A}$, $\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_B}$, $\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_C}$ tengliklar yordamida, neytral simdagi tok esa Kirxgof 1-qonuniga ko'ra $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$ formula bilan topiladi.

Shunday qilib, uch fazali zanjirda *neytral simning mavjudligi faza kuchlanishlar simmetriyasini ta'minlaydi*. Shuning uchun ham iste'molchilar (yoritgich lampalar, maishiy xizmat yuklamalari va boshqalar) to'rt simli tarmoqqa ulanadi.

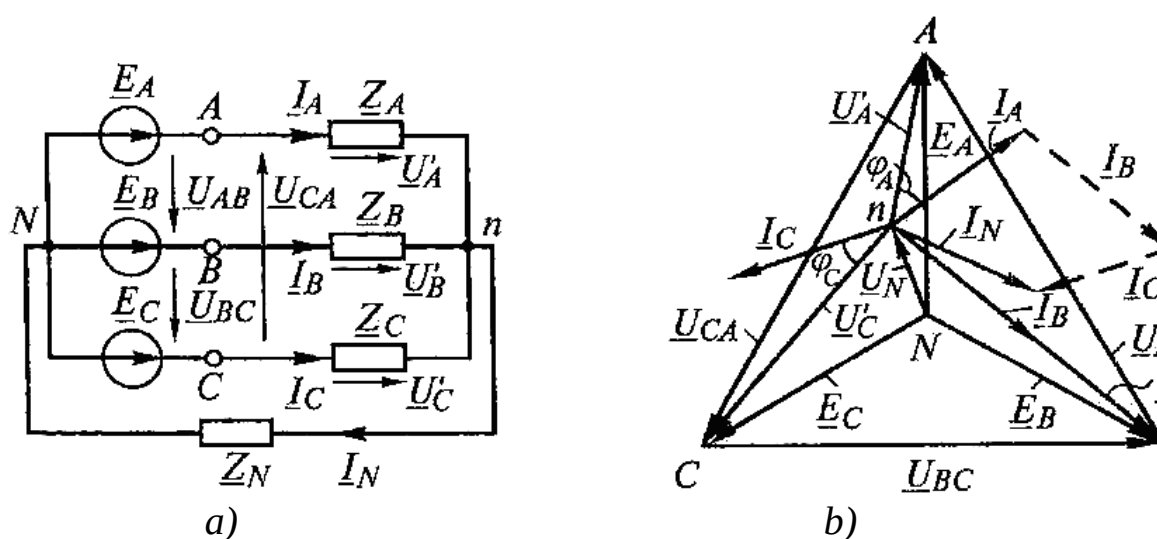
Agar neytral sim qarshiligini hisobga olish lozim bo'lsa, u holda neytralning siljish kuchlanishi ikki tugun usuli bo'yicha aniqlanadi (6.11-rasm, b):

$$\underline{U}_N = \underline{I}_N \underline{Z}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N},$$

bu yerda $\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}$, $\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}$, $\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}$, $\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}$ - fazalar va neytral sim kompleks o'tkazuvchanliklari.



6.11- rasm



6.12- rasm

Quyida generator chulgʻamlari va iste'molchi fazalari "yulduz-yulduz" sxemasida ulangan uch fazali zanjirni hisoblash va uning vektor diagrammasini qurish tartibini koʻrib chiqamiz (6.12- rasm). Hisoblash va qurish tartibi quyidagicha:

1. Kompleks tekislikda $\underline{E}_A$, $\underline{E}_B$, $\underline{E}_C$ EYK lar vektorlari quriladi (6.12-rasm, b).

2. Neytralning siljish kuchlanishi $\underline{U}_N$ hisoblanadi va uning vektori diagrammaga joylashtiriladi.

3. Iste'molchilar faza kuchlanishlarini $\underline{U}'_A = \underline{E}_A - \underline{U}_N$, $\underline{U}'_B = \underline{E}_B - \underline{U}_N$, $\underline{U}'_C = \underline{E}_C - \underline{U}_N$ tengliklar orqali aniqlanadi va ularning vektorlari diagrammada aks ettiriladi.

4. Faza toklari Om qonuni asosida quyidagicha topiladi: $\underline{I}_A = \underline{U}'_A \underline{Y}_A$, $\underline{I}_B = \underline{U}'_B \underline{Y}_B$, $\underline{I}_C = \underline{U}'_C \underline{Y}_C$.

5. Faza toklari vektorlari mos faza kuchlanishlaridan $\underline{\varphi}_A$, $\underline{\varphi}_B$ va $\underline{\varphi}_C$ burchakka siljigan holatda quriladi.

6. Neytral simdagi tok Kirxgof 1-qonuni ($\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$) yoki Om qonuni ($\underline{I}_N = \underline{U}_N \underline{Y}_N$) asosida aniqlanadi va vektor diagrammada aks ettiriladi.

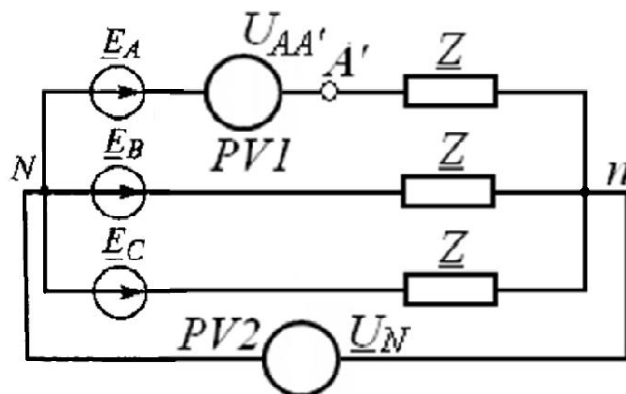
7. Liniya kuchlanishlar vektorlari $\underline{U}_{AB} = \underline{U}'_A - \underline{U}'_B$, $\underline{U}_{BC} = \underline{U}'_B - \underline{U}'_C$,
 $\underline{U}_{CA} = \underline{U}'_C - \underline{U}'_A$ tengliklar asosida quriladi.

6.3.2. Yulduz usulda ulangan neytral simsiz zanjir

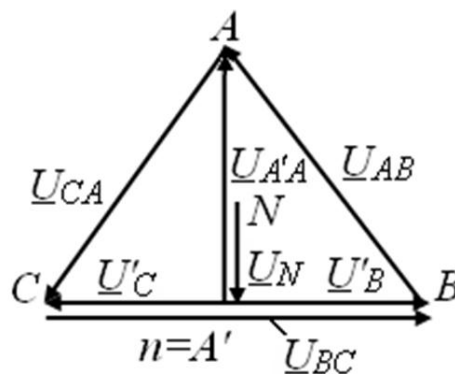
Neytral simsiz yulduz sxemada faza kuchlanishlarining oʻzaro bogʻliqsizligi ta'minlanmaydi. Bir fazada yuklama qiymatining oʻzgarishi boshqa fazalarda tok va kuchlanishlarning oʻzgarishiga sabab boʻladi. Masalan, A fazada liniya simining uzilishi qolgan ikkita faza qarshiliklari oʻzaro ketma-ket ulanib, $\underline{U}_{BC}$ liniya kuchlanishi ta'siri ostida qolishiga sabab boʻladi (6.13- rasm, a). $\underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}$ boʻlganida $\underline{U}_{BC}$ liniya kuchlanishi $\underline{Z}_B$ va $\underline{Z}_C$ qarshiliklarda teng boʻlinib pasayadi (6.13- rasm, b). Bunda neytralning siljish kuchlanishi $\underline{U}_N = \underline{U}_{nN} = -\frac{\underline{E}_A}{2}$, A faza simining uzilgan nuqtalari orasidagi kuchlanish esa $\underline{U}_{AA'} = \underline{U}_{An} = \underline{E}_A - \underline{U}_N = \frac{3}{2} \underline{E}_A$ ga teng boʻladi. Oxirgi tenglikni ikki tugun usulini qoʻllab aniqlashimiz ham mumkin, ya'ni:

$$\underline{U}_N = \frac{\sum \underline{E} \underline{Y}}{\sum \underline{Y}} = \frac{\underline{E}_A \cdot 0 + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{0 + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = \frac{\underline{Y}_B (\underline{E}_B + \underline{E}_C)}{2 \underline{Y}_B} = -\frac{\underline{E}_A}{2},$$

$$\underline{U}_{AA'} = \underline{E}_A - \underline{U}_N = \underline{E}_A + \frac{\underline{E}_A}{2} = \frac{3}{2} \underline{E}_A.$$



a)



b)

6.13- rasm

Shunday qilib, yulduz sxemali neytral simsiz simmetrik uch fazali zanjirda bitta liniya simining uzilishi o'sha faza yuklamasidagi kuchlanishni nolgacha, boshqa ikkita faza yuklamalaridagi kuchlanishlarni

$$\frac{U_F}{U_L} = U_F : \frac{\sqrt{3} U_F}{2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \text{ martagacha, ya'ni } 16\% \text{ gacha kamaytirib yuboradi.}$$

Agar generatorning $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$ va $\underline{U}_{CA}$ liniya kuchlanishlari berilgan bo'lsa, u holda iste'molchilar faza kuchlanishlari quyidagi tenglamalar yordamida aniqlanadi:

$$\underline{U}'_A = \frac{\underline{Y}_B \underline{U}_{AB} - \underline{Y}_C \underline{U}_{CA}}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C},$$

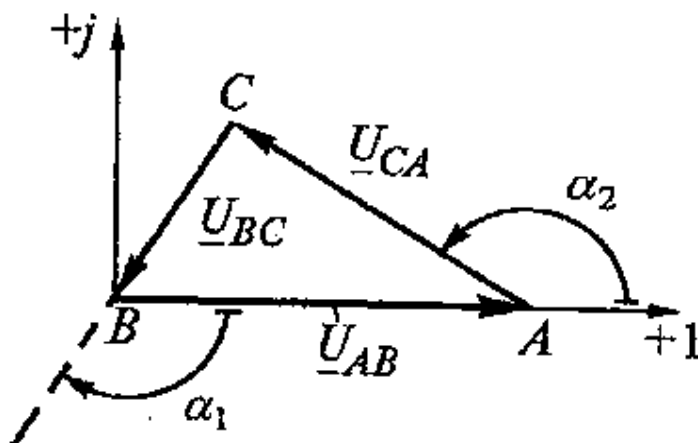
$$\underline{U}'_B = \frac{\underline{Y}_C \underline{U}_{BC} - \underline{Y}_A \underline{U}_{AB}}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C},$$

$$\underline{U}'_C = \frac{\underline{Y}_A \underline{U}_{CA} - \underline{Y}_B \underline{U}_{BC}}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}.$$

Bu kuchlanishlardan foydalanib, faza toklari Om qonuni asosida topiladi.

Odatda liniya kuchlanishlarining ta'sir etuvchi qiymatlari beriladi. Bunday hollarda liniya kuchlanishlari uchburchagi 6.14- rasmdagi kabi joylashtirilishi maqsadga muvofiq. Unga ko'ra $\underline{U}_{AB}$ kuchlanish vektori haqiqiy sonlar yarim o'qi bo'ylab joylashtiriladi. Liniya kuchlanishlari kompleks ko'rinishda quyidagicha yoziladi:

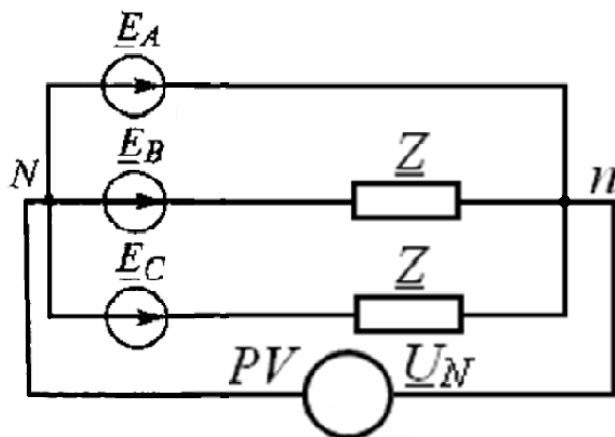
$$\underline{U}_{AB} = U_{AB}, \underline{U}_{BC} = U_{BC} e^{-j\alpha_1}, \underline{U}_{CA} = U_{CA} e^{j\alpha_2}.$$



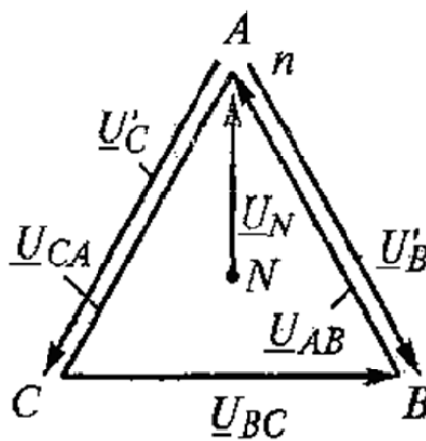
6.14- rasm

A fazada qisqa tutashishdan hosil bo'lgan nosimmetrik rejimda (6.15-rasm, a) A va n nuqtalar potentsiallari teng. Topografik diagrammada bu nuqta teng tomonli uchburchakning A uchida joylashadi (6.15-asm, b). Bunda n nuqta potentsiali generator tomonidan belgilanadigan A nuqtaga siljiydi. B va A fazalardagi faza kuchlanishlari generator liniya kuchlanishlariga teng bo'ladi:

$$\underline{U}'_B = -\underline{U}_{AB}, \underline{U}'_C = \underline{U}_{CA}, \underline{U}_N = \underline{U}_A.$$



a)



b)

6.15- rasm

Binobarin, nosimmetrik rejim yulduz ulangan simmetrik uch fazali zanjir yuklamasi bitta fazasining qisqa tutashishi sababli yuzaga kelganida, boshqa fazalardagi kuchlanish $\sqrt{3}$ marta ortadi. Shuning uchun ham yulduz sxemali uch fazali zanjirlarda har doim neytral sim bo'lishi talab etiladi.

Masala. Uch fazali ta'minlash manbayi, uchta bir xil rezistorli yuklama $r_A = r_B = r_C$ yulduzcha usulida ulangan (6.16-rasm, *a*). Manbaning faza kuchlanishlari simmetrik va uzgichlar qayta ulanishlarida o'zgarmaydi. Berilgan: $U_L = 380\text{ V}$ va $I_A = I_B = I_C = \sqrt{3}\text{ A}$. Quyidagi rejimlar uchun kuchlanishlar topografik vektor diagarammalari va toklar vektor diagarammalari qurilsin:

1) simmetrik rejim (1- va 3- uzgichlar tutashtirilgan, 2- uzgich uzilgan);

2) uzgichlar holati 1- bandedagidek, lekin r_A - rezistor qarshiligi xuddi shunday bo'lgan sig'im bilan almashtirilgan;

3) 1- va 2- uzgichlar uzilgan, 3- uzgich esa ulangan;

4) barcha uzgichlar uzilgan;

5) 1- va 2- uzgichlar ulangan, 3- uzgich esa ulangan.

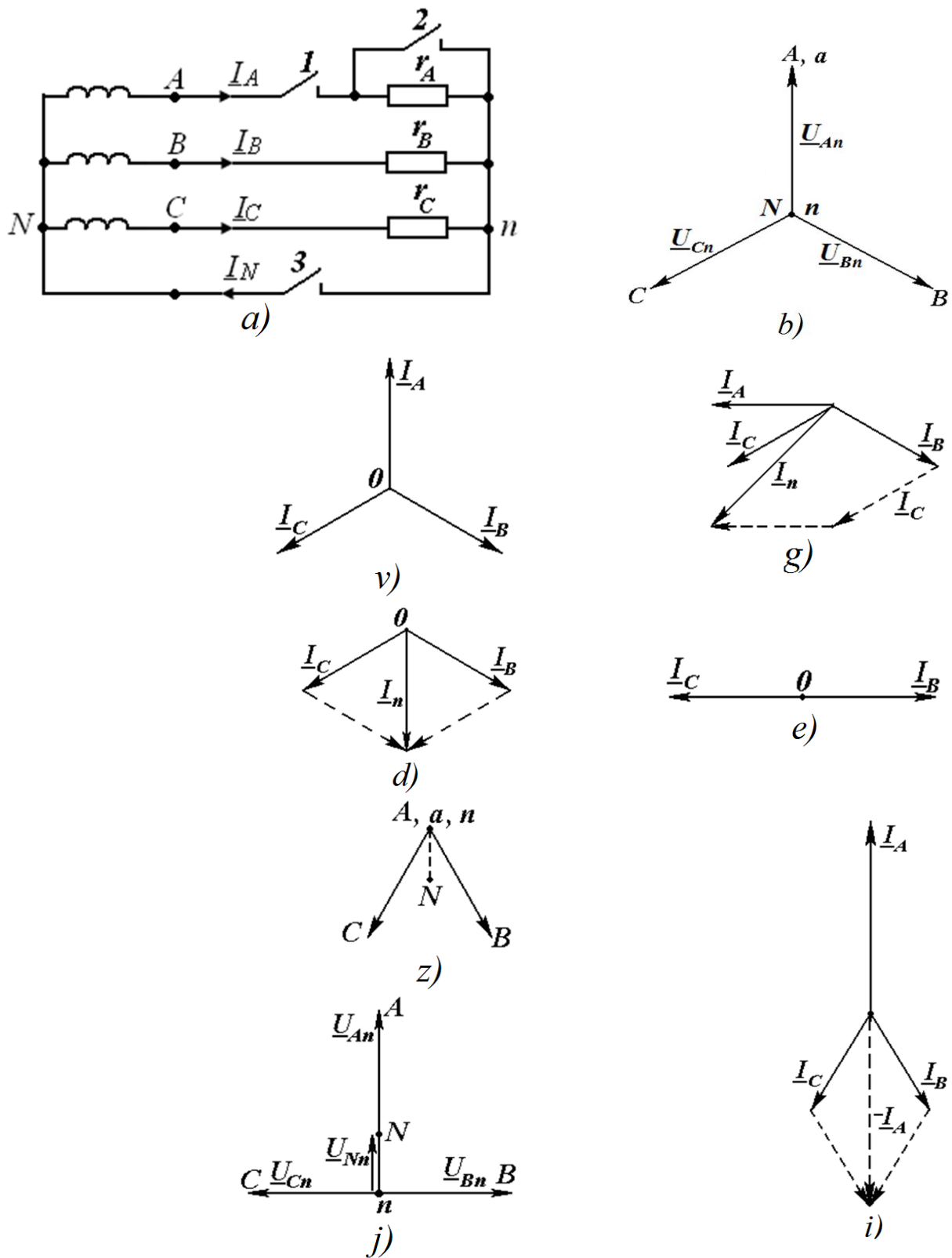
Yechish. Simmetrik rejimda manba va yuklamadagi faza kuchlanishlari bir xil va $380/\sqrt{3} = 220\text{ V}$ ga teng; kuchlanishlar topografik diagrammasi va toklar vector diagrammasi 6.16- rasm, *b* va *v* larda tasvirlangan. Aktiv yuklamada faza toklari vektorlarining yo'nalishlari mos faza kuchlanishlari vektorlarining yo'nalishlariga mos. Neytral simdagi tok nolga teng.

2. r_A rezistor qarshiligining qiymati r_A ga teng bo'lgan kondensator bilan almashtirganda yuklamadagi faza kuchlanishlari o'zgarmaydi. I_B va I_C toklar o'zgarmaydi, I_A tok son qiymati o'zgarmaydi, ammo uning fazasi kuchlanish fazasiga nisbatan 90° ga ilgarilaydi. Bu holat uchun kuchlanishlar topografik diagrammasi avvaldagidek (6.16- rasm, *b*), toklar vektor diagrammasi esa 6.16- rasm, *g* da tasvirlangan. Neytral simdagi tok $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = \sqrt{2}\text{ A}$.

Shuni aytib o'tish joizki, agar 3- uzgich ajratilsa, u holda $\underline{I}_N = 0$ va N va n nuqtalar potentsiallari turlicha bo'ladi va yuklama faza kuchlanishlari $\underline{U}_{An}, \underline{U}_{Bn}, \underline{U}_{Cn}$ mos ravishdagi manba $\underline{U}_{AN}, \underline{U}_{BN}, \underline{U}_{SN}$ kuchlanishlariga teng bo'lmaydi.

3. Agar 1- uzgich ajratilsa, u holda a nuqta potentsiali n nuqta potentsialiga teng bo'ladi. Topografik diagrammada boshqa o'zgarishlar bo'lmaydi (6.16- rasm, *b*). Bu holat uchun toklar vektor diagrammasi 6.16-rasm, *d* ko'rsatilgan. Bunda $I_N = 1\text{ A}$.

4. Agar 3- uzgich qo'shimcha ravishda ajratilsa, u holda N va n nuqtalar potentsiallari har xil bo'lib qoladi. B va C fazalardagi rezistorlar



6.16- rasm

ketma-ket ulanib qoladi va natijada har bir qarshilikda $\underline{U}_{BC}$ liniya kuchlanishining yarmiga teng kuchlanish pasayadi. Topografik diagrammada n va a nuqtalar BC kesmaning o'rtasida bo'ladi (6.16-

rasm, e).

Topografik diagrammadan neytral N va n nuqtalar va ajratilgan A fazaning uchlari orasidagi kuchlanishlarni topamiz:

$$U_{Nn} = U_{AN} / 2 = 100,0 \text{ V}, \quad U_{An} = (3/2)U_{AN} = 329,9 \text{ V}.$$

Rezistorlar r_B va r_C dagi kuchlanishlar $\frac{U_L / \sqrt{3}}{U_L / \sqrt{2}} = \frac{2}{\sqrt{3}}$ marta kamayadi,

xuddi shu miqdorda rezistorlardagi toklar ham $I_B = I_C = \sqrt{3}/2$ marta kamayadi. Toklar vektor diagrammasi 6.16- rasm, j da tasvirlangan.

5. 1- va 2- uzgichlar ulanganda va 3-uzgich ajratilganda A, a va n nuqtalardagi potentsiallar bir xil bo'ladi (6.16- rasm, z). r_B va r_C rezistorlardagi kuchlanishlar liniya kuchlanishiga teng, ya'ni $\underline{U}_{Ba} = \underline{U}_{BA}$ va $\underline{U}_{Cn} = \underline{U}_{CA}$. Shuning uchun ham I_B va I_C toklar simmetrik rejimga nisbatan $\sqrt{3}$ barobar katta bo'ladi. I_A tokni vektor diagramma (6.16- rasm, i)dan quyidagicha topamiz: $I_A = -(I_B + I_C)$; $I_A = 3A$.

6.3.3. Yuklamasi uchburchak ulangan zanjir

Uchburchak ulangan nosimmetrik ($\underline{Z}_{AB} \neq \underline{Z}_{BC} \neq \underline{Z}_{CA}$) yuklamali uch fazali zanjirda faza toklari Om qonuniga binoan aniqlanadi (6.17- rasm, a):

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}, \quad \underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}, \quad \underline{I}_{CA} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}.$$

Liniya toklari A, B va C tugunlar uchun tuzilgan Kirxgof 1- qonunidan foydalanib topiladi:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA}, \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}, \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}.$$

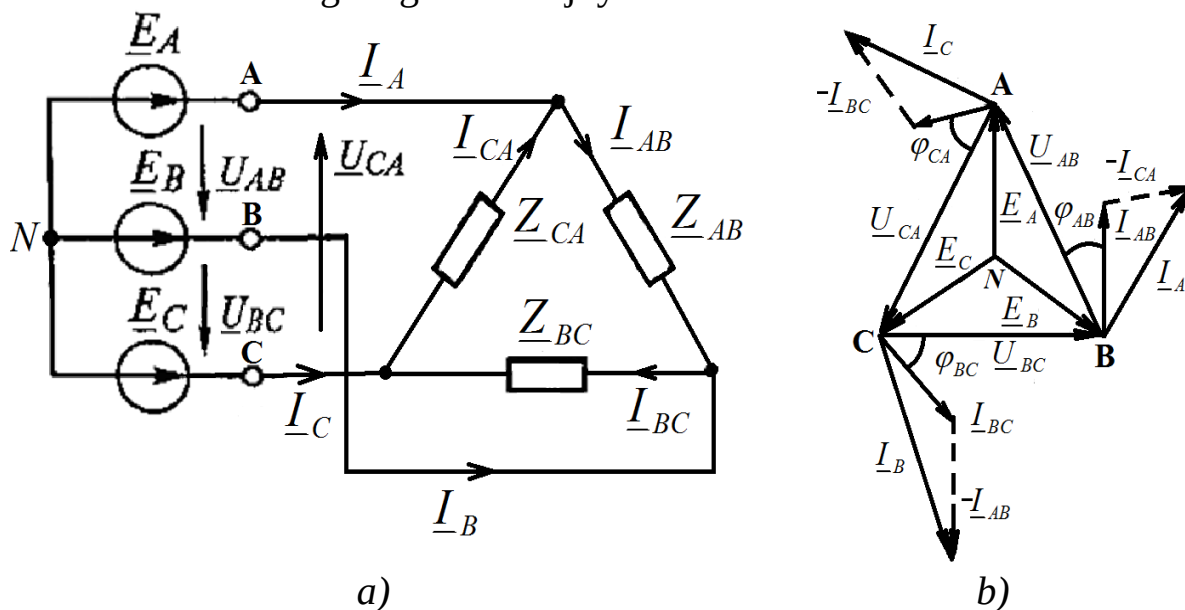
Hisoblash natijalarini $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$ tenglama yordamida tekshirib ko'rish mumkin. Shuni ta'kidlash joizki, uchburchak ulangan nosimmetrik uch fazali zanjirda $I_L \neq \sqrt{3}I_F$.

Ko'rib chiqilayotgan zanjir uchun diagramma qurish tartibi quyidagicha:

1. Kompleks tekislikda manbaning $\underline{E}_A$, $\underline{E}_B$ va $\underline{E}_C$ simmetrik EYK vektorlari quriladi (6.17- rasm, b).

2. Liniya kuchlanishlari vektorlari $\underline{U}_{AB} = \underline{E}_A - \underline{E}_B$, $\underline{U}_{BC} = \underline{E}_B - \underline{E}_C$, $\underline{U}_{CA} = \underline{E}_C - \underline{E}_A$ munosabatlar asosida quriladi.

3. $\underline{I}_{AB}, \underline{I}_{BC}, \underline{I}_{CA}$ faza toklari mos $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$ faza kuchlanishlariga nisbatan diagrammada mos ravishda $\varphi_{AB}, \varphi_{BC}, \varphi_{CA}$ faza siljish burchaklarini hisobga olgan holda joylashtiriladi.



6.17- rasm

4. $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ liniya toklari Kirxgof 1- qonuni asosida yuqorida yozilgan tenglamalar yordamida aniqlanadi.

Masala. Uchta bir xil rezistorli yuklama yulduzcha usulida ulangan uchburchak usulida ulangan (6.18- rasm, a). Manba liniya kuchlanishlari simmetrik sistemasining qiymati $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 220 \text{ V}$ 1- va 2-uzgichlar holati o'zgarganda o'zgarmaydi. 1, 2-uzgichlar qulangan holatda liniya toklari $I_L = 1 \text{ A}$ ga teng.

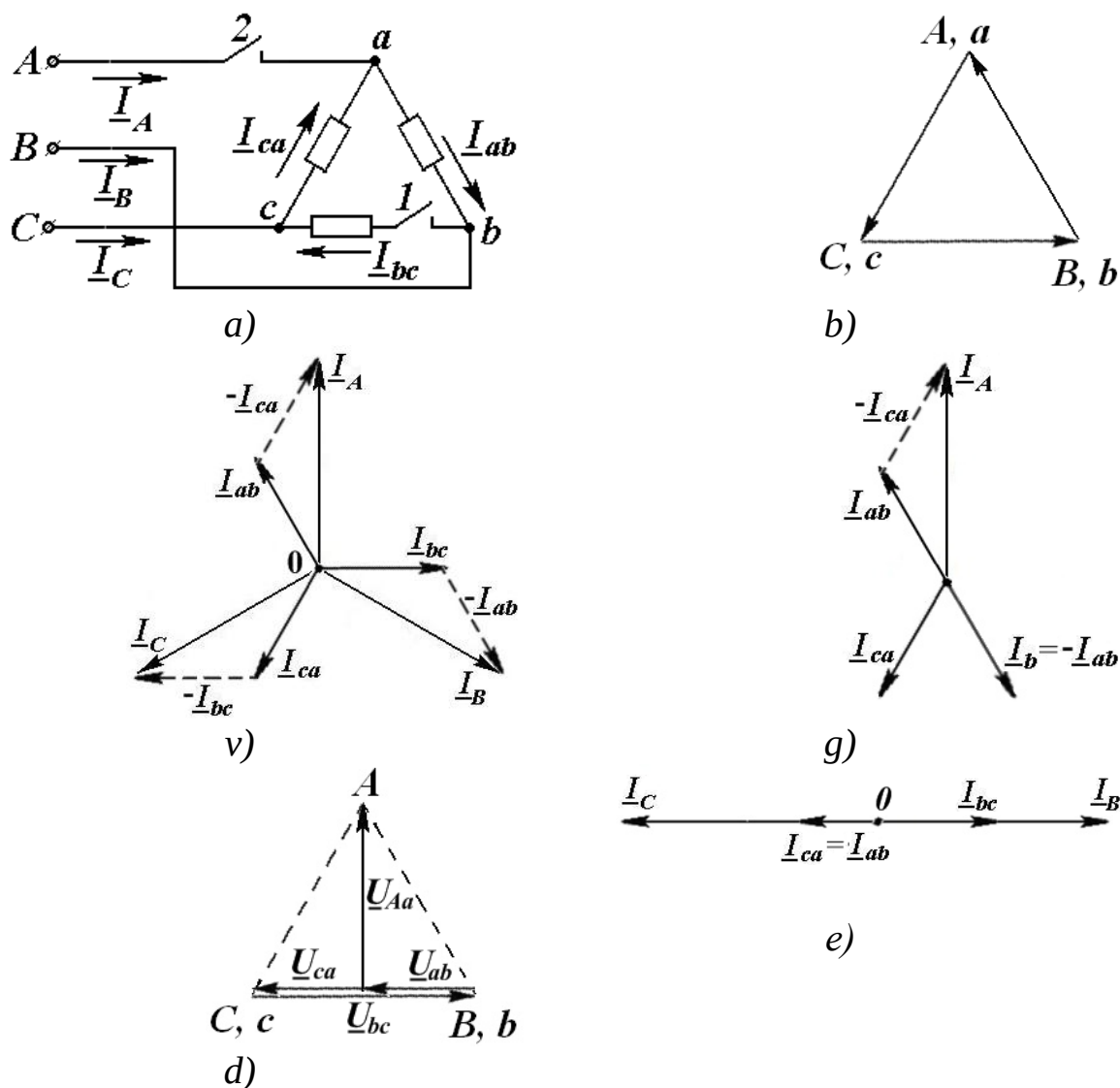
Zanjir kuchlanishlari topografik va toklar vektor diagrammalari quyidagi rejimlar uchun qurilsin:

- 1) simmetrik rejim (1- va 2- uzgichlar ulangan);
- 2) 1- uzgich uzilgan, 2- uzgich ulangan;
- 3) 2- uzgich uzilgan, 1- uzgich ulangan;
- 4) 1- va 2- uzgichlar ulangan va BC fazadagi rezistor qarshiligi xuddi shunday bo'lgan kondensator bilan almashtirilgan.

Yechish: 1. Simmetrik rejim uchun zanjir kuchlanishlari topografik va toklar vektor diagrammalari 6.18- rasm, b da keltirilgan. Yuklama fazalaridagi toklar liniyadagiga nisbatan $\sqrt{3}$ marta kichik: $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I / \sqrt{3} \text{ A}$. Aktiv yuklamada I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} faza toklar vektorlari yo'nalishlari bo'yicha U_{ab}, U_{bc} va U_{ca} vektorlar yo'nalishlariga mos. Liniya toklari faza toklari ayirmasiga teng, ya'ni:

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}; I_B = I_{bc} - I_{ab}; I_C = I_{ca} - I_{bc}.$$

2. 1- uzgich uzilganda tok $I_{bc} = 0$ va "b" nuqtaning potentsiali c nuqtaning potentsiali bilan bir xil. I_{ab} va I_{ca} toklar o'zgarmasdan qoladi, shu sababli $I_A = I_{ab} - I_{ca}$ avvalgi qiymatini saqlab qoladi. I_B va I_C toklar o'zgaradi: $I_B = -I_{ab}$; $I_C = -I_{ca}$. Toklar vektor diagrammasi 6.18-rasm, g da keltirilgan.



6.18- rasm

3. 2- uzgich uzilganda va 1- uzgich ulanganda ca va ab shoxobchada rezistorlar ketma-ket ulangan bo'lib, ulardagi kuchlanishpasayishlar U_{BC} liniya kuchlanishining yarmiga teng bo'ladi. Topografik diagramma(6.18-rasm, d)da a nuqta bc kesmaning o'rtasida joylashadi. A fazaning uzilgan

qismalari orasidagi kuchlanish $U_{Aa} = U_{AB} \cos 30^\circ = 220\sqrt{3}/2 = 190,5 \text{ V}$ ga teng.

. ca va ab shoxobchalardagi kuchlanishlar simmetrik rejimga nisbatan 2 marta kamayadi. Shoxobchadagi toklar ham shuncha marta kamayadi, ya'ni: $I_{ca} = I_{ab} = 0,5(1/\sqrt{3}) = 0,289 \text{ A}$. I_B va I_C toklarni vektor diagramma(6.18- rasm, e)dan quyidagicha aniqlaymiz: $I_C = I_{ca} - I_{bc}$; $I_C = I_{bc} - I_{ab}$; $I_C = I_B = 0,866 \text{ A}$.

4. Bu holat uchun zanjir kuchlanishlari topografik diagrammasi birinchi band kabi bo'ladi, toklar vektor diagrammasi esa 6.18- rasm, j da keltirilgan. Undan quyidagilarni aniqlaymiz:

$$I_A = 1 \text{ A}, I_B = 2I_{bc} \cos 75^\circ = 2(1/\sqrt{3}) \cdot 0,259 = 0,299 \text{ A},$$

$$I_C = 2I_{ca} \cos 15^\circ = 2(1/\sqrt{3}) \cdot 0,966 = 1,15 \text{ A}.$$

6.3.4. Nosimmetrik uch fazali zanjir quvvati

Nosimmetrik uch fazali zanjirda fazalar quvvati o'zaro teng bo'lmaydi. Yulduz sxemada ulangan uch fazali zanjir kompleks quvvati fazalar kompleks quvvatlarining algebraik yig'indisiga teng, ya'ni:

$$\underline{S} = \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C = \underline{U}_A \overset{*}{I}_{-A} + \underline{U}_B \overset{*}{I}_{-B} + \underline{U}_C \overset{*}{I}_{-C}$$

Zanjir aktiv va reaktiv quvvatlari:

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C.$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C.$$

Yuklama uchburchak sxemada ulangan nosimmetrik uch fazali zanjir quvvati ifodalari yuqorida qayd etilganidek, faza quvvatlarining yig'indisi ko'rinishida aniqlanadi. Uch fazali zanjirda ham $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ tenglik o'rinli.

6.4. Tarmoqlangan uch fazali zanjirlarni hisoblash

Yulduz va uchburchak sxemalarda ulangan hamda liniya qarshiliklari hisobga olinishi kerak bo'lgan bir nechta iste'molchili uch fazali zanjirlarni hisoblashda ekvivalent o'zgartirish usullaridan, xususan, qarshiliklar uchburchagini unga ekvivalent bo'lgan qarshiliklar yulduziga va aksincha o'zgartirishlardan keng foydalaniladi. Bu almashtirishlarga ko'ra:

$$\underline{Z}_A = \frac{\underline{Z}_{AB} \underline{Z}_{CA}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}}, \underline{Z}_B = \frac{\underline{Z}_{BC} \underline{Z}_{AB}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}}, \underline{Z}_C = \frac{\underline{Z}_{CA} \underline{Z}_{BC}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}}.$$

Simmetrik yuklamada $\underline{Z}_Y = \frac{\underline{Z}_\Delta}{3}$.

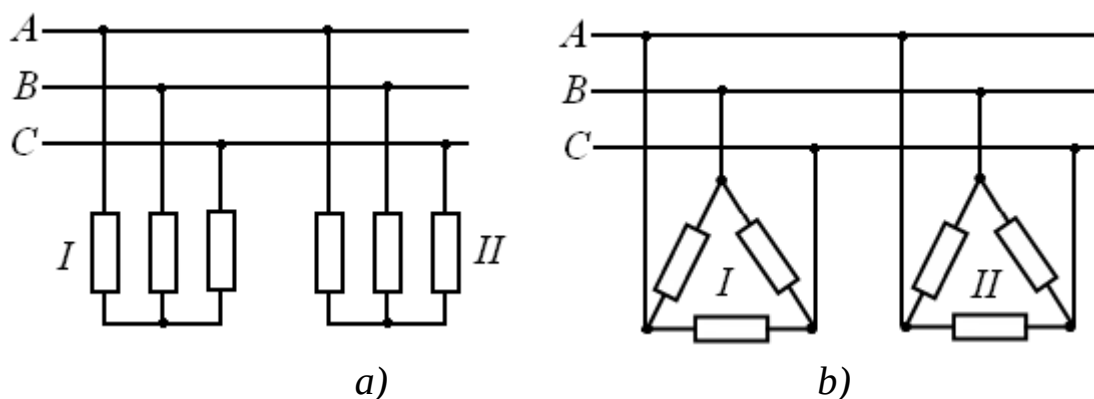
Yulduzchani ekvivalent uchburchakka o'zgartirganda

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_A + \underline{Z}_B + \frac{\underline{Z}_A \underline{Z}_B}{\underline{Z}_C}, \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_B + \underline{Z}_C + \frac{\underline{Z}_B \underline{Z}_C}{\underline{Z}_A},$$

$$\underline{Z}_{CA} = \underline{Z}_C + \underline{Z}_A + \frac{\underline{Z}_C \underline{Z}_A}{\underline{Z}_B}$$

6.4.1. Yulduz sxemada ulangan bir nechta iste'molchili uch fazali zanjirni hisoblash

Agar ikki yoki undan ortiq uch fazali iste'molchilar yulduz sxemada ulangan nosimmetrik zanjir simmetrik kuchlanishlar sistemasidan ta'minlanayotgan bo'lsa, u holda iste'molchilar faza kuchlanishlari nosimmetrik bo'lib, yulduz sxema neytral nuqtalari orasidagi kuchlanish noldan farq qiladi. Shuning uchun ham iste'molchilar bir xil nomli fazalarini o'zaro parallel ulangan deb bo'lmaydi. Bunday holatda yulduz sxema unga ekvivalent bo'lgan uchburchak sxema bilan almashtiriladi (6.19- rasm). Bunday zanjirlarni hisoblash tartibi quyidagicha:



6.19- rasm

1. Qarshiliklar yulduzlari (6.19- rasm, a) ularga ekvivalent bo'lgan qarshiliklar uchburchaklarga (6.17-rasm, b) o'zgartiriladi.

2. Ekvivalent uchburchaklar bir nomli fazalari o'zaro parallel ulanganligi sababli ular o'zaro qo'shilib, bitta ekvivalent uchburchak hosil qilinadi.

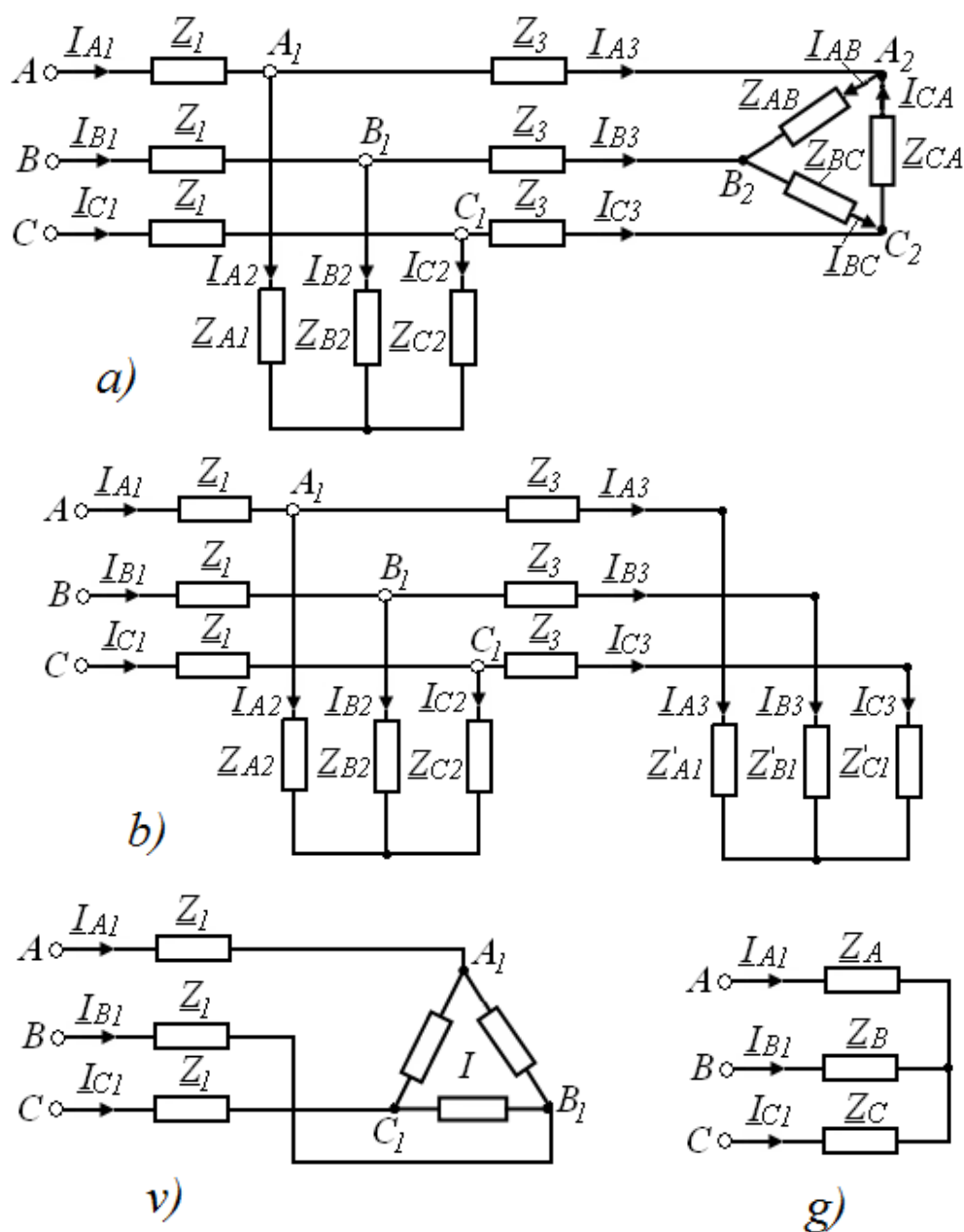
3. Ekvivalent uchburchak ekvivalent yulduz sxemasiga o'zgartiriladi va 6.3.2 va 6.3.3 paragraflarda keltirilgan tartib bo'yicha zanjir hisoblanadi.

6.4.2. Yulduz va uchburchak sxemalarda ulangan uch fazali zanjirni hisoblash

Bir nechta yuklamali uch fazali nosimmetrik zanjir berilgan bo'lsin (6.20- rasm, a), unda $\underline{Z}_{A1} \neq \underline{Z}_{B1} \neq \underline{Z}_{C1}$, $\underline{Z}_{AB} \neq \underline{Z}_{BC} \neq \underline{Z}_{CA}$.

Ko'rib chiqilayotgan zanjirni hisoblash tartibi quyidagicha:

1. Zanjirdagi qarshiliklar uchburchagini unga ekvivalent yulduz bilan



6.20- rasm

almashtiramiz va hosil bo'lgan qarshiliklarga mos liniya qarshiliklari $\underline{Z}_3$ ni qo'shamiz, ya'ni:

$$\begin{aligned}\underline{Z}'_{A2} &= \underline{Z}_{A2} + \underline{Z}_3 = \frac{\underline{Z}_{AB}\underline{Z}_{CA}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}} + \underline{Z}_3, \\ \underline{Z}'_{B2} &= \underline{Z}_{B2} + \underline{Z}_3 = \frac{\underline{Z}_{AB}\underline{Z}_{BC}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}} + \underline{Z}_3, \\ \underline{Z}'_{C2} &= \underline{Z}_{C2} + \underline{Z}_3 = \frac{\underline{Z}_{BC}\underline{Z}_{CA}}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA}} + \underline{Z}_3.\end{aligned}$$

Natijada A_1 , B_1 va C_1 nuqtalarga ulangan ikkita yulduz sxemasini hosil qilamiz (6.20- rasm, b) (bu sxemadagi $\underline{Z}_3$ larni olib tashlash kerak!)

2. Qarshiliklar yulduzi sxemalarini ekvivalent uchburchaklar bilan almashtirib va mos fazalar qarshiliklarini o'zaro parallel qo'shib bitta uchburchak sxemasini hosil qilamiz (6.20- rasm, v).

3. Hosil qilingan ekvivalent uchburchak sxemani ekvivalent yulduzga o'zgartiramiz va faza qarshiliklariga mos liniya qarshiliklari $\underline{Z}_1$ ni qo'shamiz (6.20- rasm, g).

4. $\underline{I}_{A1}$, $\underline{I}_{B1}$ va $\underline{I}_{C1}$ liniya toklarini aniqlaymiz:

$$\underline{I}_{A1} = (\underline{U}_A - \underline{U}_N)\underline{Y}_A, \quad \underline{I}_{B1} = (\underline{U}_B - \underline{U}_N)\underline{Y}_B, \quad \underline{I}_{C1} = (\underline{U}_C - \underline{U}_N)\underline{Y}_C,$$

$$\text{bu yerda } \underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A\underline{Y}_A + \underline{U}_B\underline{Y}_B + \underline{U}_C\underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}.$$

5. $A-A_1$, $B-B_1$, $C-C_1$ qismalardagi faza va liniya kuchlanishlarini topamiz:

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_A - \underline{I}_{A1}\underline{Z}_1, \quad \underline{U}_{B1} = \underline{U}_B - \underline{I}_{B1}\underline{Z}_1, \quad \underline{U}_{C1} = \underline{U}_C - \underline{I}_{C1}\underline{Z}_1.$$

$$\underline{U}_{A1B1} = \underline{U}_{A1} - \underline{U}_{B1}, \quad \underline{U}_{B1C1} = \underline{U}_{B1} - \underline{U}_{C1}, \quad \underline{U}_{C1A1} = \underline{U}_{C1} - \underline{U}_{A1}.$$

6. Ikkala yulduz sxemalardagi toklarni aniqlaymiz (6.20- rasm, b). Buning uchun 6.3.1 va 6.3.2 paragraflarda keltirilgan formulalardan foydalanamiz. Natijada $\underline{I}_{A2}$, $\underline{I}_{B2}$, $\underline{I}_{C2}$ yulduz toklarini va $\underline{I}_{A3}$, $\underline{I}_{B3}$, $\underline{I}_{C3}$ liniya toklarini aniqlaymiz. A_1, A_2, A_3 liniya toklarini tugunlar uchun tuzilgan Kirxgof 1- qonuni asosida ham topishimiz mumkin:

$$\underline{I}_{A3} = \underline{I}_{A1} - \underline{I}_{A2}, \quad \underline{I}_{B3} = \underline{I}_{B1} - \underline{I}_{B2}, \quad \underline{I}_{C3} = \underline{I}_{C1} - \underline{I}_{C2}.$$

7. A_2, B_2, C_2 qismalardagi faza va liniya kuchlanishlarini aniqlaymiz:

$$\underline{U}_{A2} = \underline{U}_{A1} - \underline{I}_{A3}\underline{Z}_3, \quad \underline{U}_{B2} = \underline{U}_{B1} - \underline{I}_{B3}\underline{Z}_3, \quad \underline{U}_{C2} = \underline{U}_{C1} - \underline{I}_{C3}\underline{Z}_3,$$

$$\underline{U}_{A2B2} = \underline{U}_{A2} - \underline{U}_{B2}, \quad \underline{U}_{B2C2} = \underline{U}_{B2} - \underline{U}_{C2}, \quad \underline{U}_{C2A2} = \underline{U}_{C2} - \underline{U}_{A2}.$$

8. Dastlabki sxema uchburchagidagi toklarni topamiz:

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{A2B2}}{\underline{Z}_{AB}}, \quad \underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{B2C2}}{\underline{Z}_{BC}}, \quad \underline{I}_{CA} = \frac{\underline{U}_{C2A2}}{\underline{Z}_{CA}}.$$

6.4.3. Bir va uch fazali iste'molchili uch fazali zanjirlarni hisoblash

Simmetrik uch fazali kuchlanishlar sistemasiga faza qarshiligi $\underline{Z}_1$ bo'lgan uch fazali elektr motori va qarshiliklari $\underline{Z}_2$ va $\underline{Z}_3$ bo'lgan ikkita bir fazali iste'molchilar ulangan zanjirni ko'rib chiqamiz (6.21- rasm). Bunday zanjirlarni hisoblash tartibi quyidagicha:

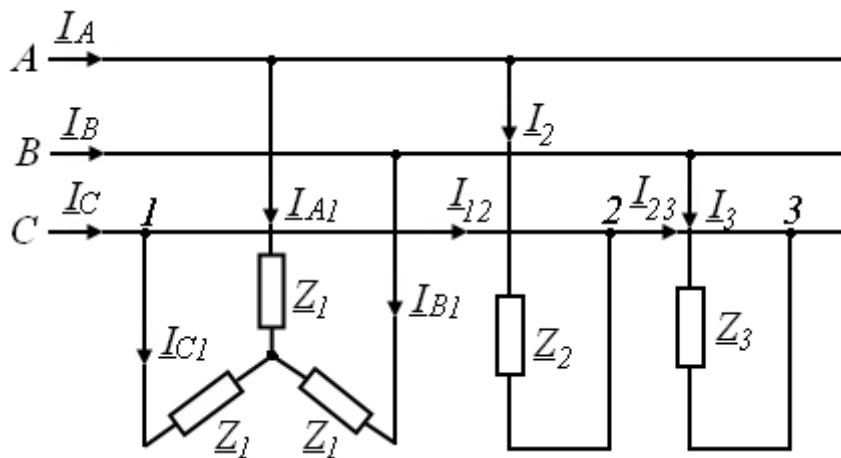
1. Iste'molchi(faza)lardagi toklar yo'nalishlarini belgilab olamiz.
2. A fazani birinchi faza deb hisoblab, faza va liniya kuchlanishlarini kompleks shaklda quyidagicha yozib olamiz:

$$\underline{U}_A = U_F, \quad \underline{U}_B = U_A e^{-j120^\circ} = U_F e^{-j120^\circ}, \quad \underline{U}_C = U_A e^{j120^\circ} = U_F e^{j120^\circ}.$$

$$\underline{U}_{AB} = \sqrt{3}U_F e^{j30^\circ}, \quad \underline{U}_{BC} = \sqrt{3}U_F e^{-j90^\circ}, \quad \underline{U}_{CA} = \sqrt{3}U_F e^{j150^\circ}.$$

3. Uch fazali iste'molchi(elektr motori) fazalaridagi kompleks toklarni topamiz: $\underline{I}_{A1} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_A}$, $\underline{I}_{B1} = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_B}$, $\underline{I}_{C1} = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_C}$, chunki simmetrik yuklamada $\underline{U}_N = 0$.

4. Bir fazali iste'molchilardagi kompleks toklarni aniqlaymiz: $\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{AC}}{\underline{Z}_2}$, $\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_3}$, bu yerda $\underline{U}_{AC}$ vektor 6.8- rasmda keltirilgan topografik diagrammaga ko'ra quyidagicha aniqlanadi: $\underline{U}_{AC} = -\underline{U}_{CA} = U_F e^{-j30^\circ}$.



6.21- rasm

5. Liniya toklari Kirxgof 1- qonuni asosida quyidagicha topiladi:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_2, \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{B1} + \underline{I}_3, \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{C1} - (\underline{I}_2 + \underline{I}_3),$$

1 va 2 hamda 2 va 3 nuqtalar orasidagi uchastkalarda.

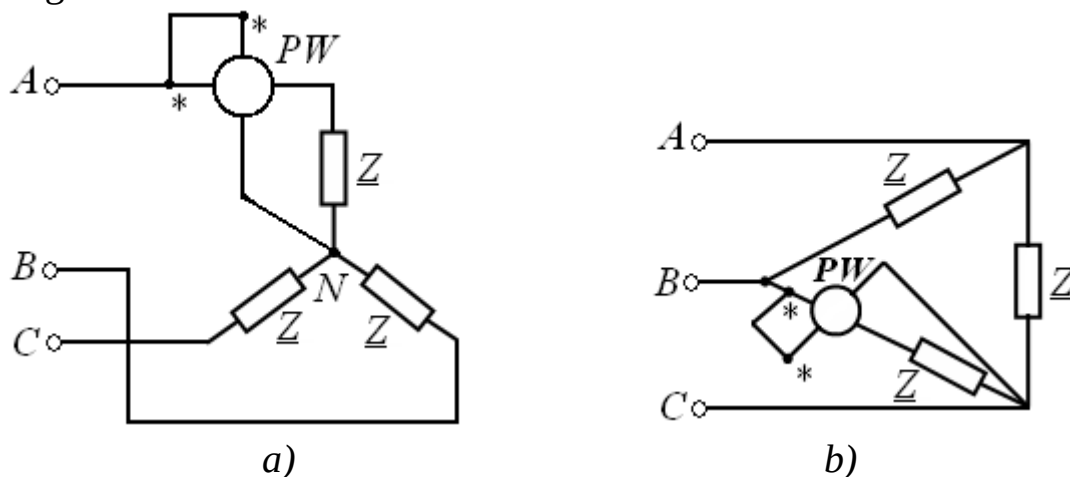
$$\underline{I}_{12} = -\underline{I}_2 - \underline{I}_3 = \underline{I}_C - \underline{I}_{C1}, \quad \underline{I}_{23} = -\underline{I}_3.$$

6.5. Uch fazali zanjirlarda quvvatni o'lchash

Avval ko'rib o'tganimizdek, aktiv quvvat quyidagi formula yordamida aniqlanishi mumkin: $P = U_{AB} I_A \cos(\underline{U}_{AB} \wedge \underline{I}_A)$, $P = \operatorname{Re}[\underline{U}_{AB} \underline{I}_A]$, bu yerda $\underline{U}_{AB}$ - vattmetr ulangan zanjir A va B fazalari orasidagi kompleks kuchlanish, $\underline{I}_A$ - A fazadagi kompleks tok, φ - $\underline{U}_{AB}$ va $\underline{I}_A$ vektorlar orasidagi faza siljish burchagi.

6.5.1. Simmetrik uch fazali zanjirda aktiv quvvatni o'lchash

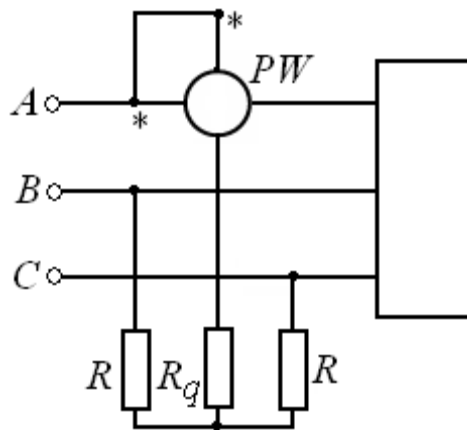
Ma'lumki, simmetrik uch fazali zanjirda faza quvvatlari o'zaro teng, shuning uchun ham zanjir quvvatini aniqlash uchun bitta fazadagi aktiv quvvatni o'lchash kifoya. Zanjir aktiv quvvati esa $P = 3P_W = 3P_F$ ga teng bo'ladi. 6.22- rasm, a da yulduz ulangan va neytra nuqtasidan foydalanish imkoniyati bo'lgan zanjirning A fazasiga vattmetrni ulash sxemasi keltirilgan.



6.22- rasm

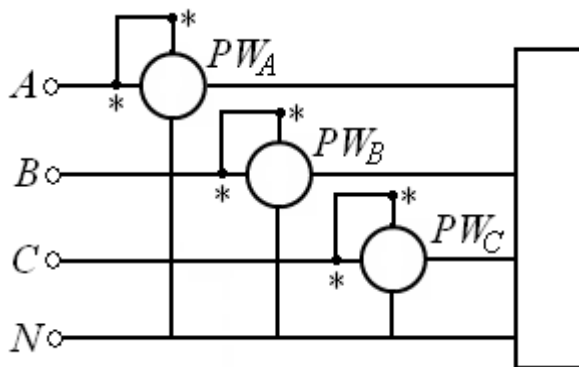
Iste'molchi uchburchak ulanganda vattmetrni ulash sxemasi esa 6.22- rasm, b da ko'rsatilgan.

Agar yulduz ulangan zanjirda neytral nuqtadan foydalanish imkoniyati bo'lmasa, u holda u sun'iy ravishda hosil qilinadi. Bu nuqta uchta rezistorning yulduz ulanishidan hosil bo'ladi (6.23- rasm). Bunda $R_q + R_w = R$, bu yerda R_w - vattmetr kuchlanish chulg'amining qarshiligi. Zanjirning aktiv quvvati $P = 3P_w$ ifoda bilan aniqlanadi.



6.23- rasm

6.5.2. Nosimmetrik uch fazali zanjirda aktiv quvvatni o'lchash



6.24- rasm

Nosimmetrik uch fazali zanjirlarda fazalar aktiv quvvati o'zaro teng emas. Shuning uchun to'rt simli uch fazali zanjirda har bir fazadagi aktiv quvvatni o'lchash lozim bo'ladi (6.24-rasm).

Istalgan xarakterli yuklamada uch fazali zanjir aktiv quvvati uchala vattmetr ko'rsatishlarining

yig'indisiga teng:

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C.$$

Uch simli uch fazali zanjirlarda aktiv quvvat ko'pchilik hollarda ikkita vattmetr yordamida o'lchanadi (6.25- rasm, a).

Ikkala vattmetr ko'rsatishining yig'indisi zanjir aktiv quvvatiga teng. Bunga ishonch hosil qilish uchun zanjir oniy quvvatini kuchlanish va toklar oniy qiymatlari orqali ifodalaymiz, ya'ni:

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C.$$

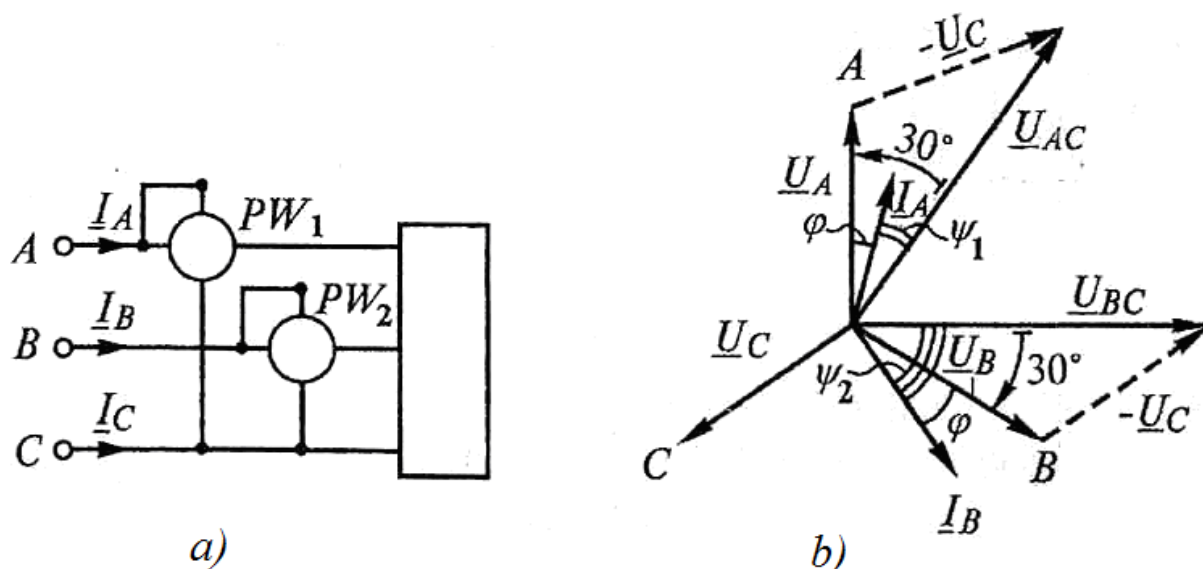
Uch simli uch fazali zanjirda $i_A + i_B + i_C = 0$. Bundan $i_C = -(i_A + i_B)$. Bu ifodani oniy quvvat formulasiga qo'yib, quyidagini hosil qilamiz:

$$p = u_{AC} i_A + u_{BC} i_B. \text{ Bundan: } P = P_1 + P_2 = U_{AC} I_A \cos \psi_1 + U_{BC} I_B \cos \psi_2.$$

Shuni ta'kidlab o'tish joizki, har bir vattmetr ko'rsatishi alohida qaralganda hech bir aniq quvvatni bildirmaydi. Vattmetrlar ko'rsatkichlari kuchlanish va tok orasidagi faza siljish burchagiga bog'liq. Ushbu bog'lanishni simmetrik yuklama uchun tahlil qilib ko'ramiz. Vektor

diagrammadan ko‘rinib turibdiki, $\psi_1 = 30^\circ - \varphi$, $\psi_2 = 30^\circ + \varphi$ (6.25- rasm, b). Bu qiymatlarni vattmetr ko‘rsatishini ifodalovchi formulalarga qo‘yib, quyidagilarni hosil qilamiz:

$$P_1 = UI \cos(30^\circ - \varphi_1), \quad P_2 = UI \cos(30^\circ + \varphi_1).$$



6.25- rasm

Oxirgi tenglamalar tahlili quyidagilarni ko‘rsatadi:

- 1) aktiv simmetrik yuklamada $P_1 = P_2$;
- 2) $\varphi = 60^\circ$ da $P_2 = 0$;
- 3) $\varphi = -60^\circ$ da $P_1 = 0$;
- 4) $\varphi = \pm 90^\circ$ (reaktiv yuklama)da $P_1 = -P_2$ yoki $P_1 + P_2 = 0$.

Simmetrik yuklamada ikkita vattmetr ko‘rsatishi asosida zanjir reaktiv quvvatini va faza siljish burchagini aniqlash mumkin:

$$P_1 - P_2 = UI(\cos(30^\circ - \varphi) - \cos(30^\circ + \varphi)) = UI \sin \varphi,$$

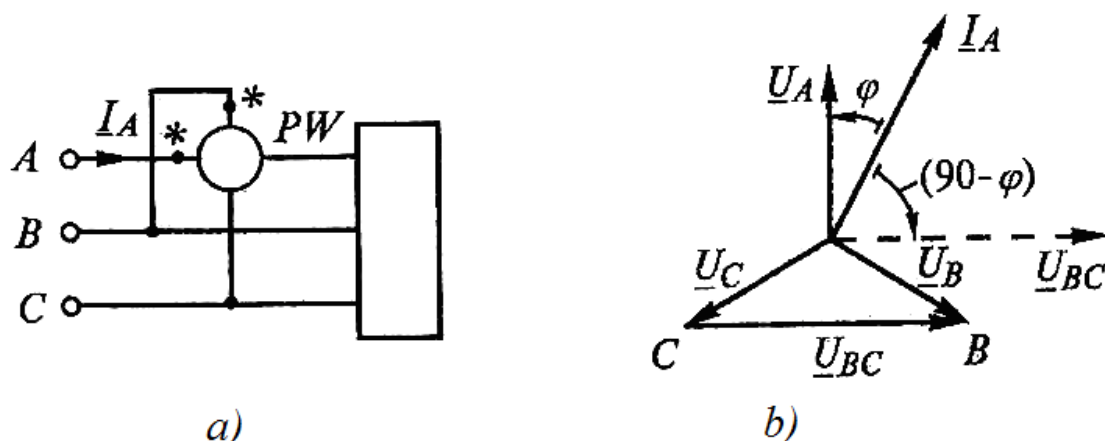
$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi = \sqrt{3}(P_1 - P_2)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{3}(P_1 - P_2)}{P_1 + P_2}, \quad \varphi = \arctg \frac{\sqrt{3}(P_1 - P_2)}{P_1 + P_2}.$$

6.5.3. Reaktiv quvvatni o‘lchash

6.26- rasm, a da uch fazali simmetrik zanjir reaktiv quvvatini vattmetr yordamida o‘lchash sxemasi keltirilgan. Vattmetrlar ko‘rsatkichi $\underline{U}_{BC}$ va $\underline{I}_A$ vektorlar skalyar ko‘paytmasi bilan aniqlanadi, ya'ni:

$$P_W = U_{BC} I_A \cos(\underline{U}_{BC} \wedge \underline{I}_A) = U_{BC} I_A \cos(90^\circ - \phi) = U_{BC} I_A \sin \phi.$$



6.26- rasm

$\underline{U}_{BC}$ va $\underline{I}_A$ vektorlar orasidagi faza siljish burchagi 3.24- rasm, b dagi vektor diagrammadan aniqlanadi.

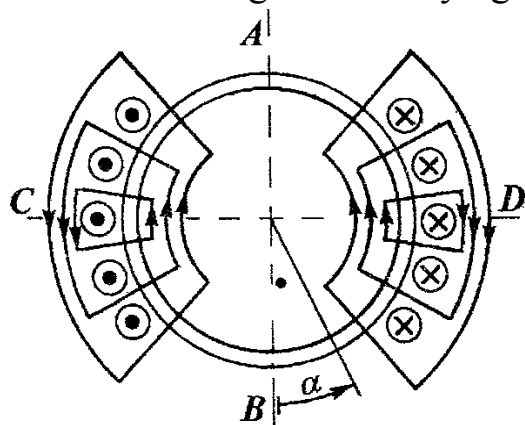
Zanjirning reaktiv quvvati: $Q = \sqrt{3} U_{BC} I_A \sin \phi = \sqrt{3} P_W$.

Binobarin, reaktiv quvvatni aniqlash uchun vatmetrda o'lchangan qiymatni $\sqrt{3}$ ga ko'paytirish kerak.

6.6. Aylanuvchan magnit maydoni

6.6.1. Pulsatsiyalanuvchi magnit maydoni

Uch fazali toklar sistemasining asosiy xususiyatlaridan biri o'zgaruvchan tok elektr motorlarining ishlash prinsipining asosi bo'lgan aylanuvchan magnit maydonini hosil qilishidir. Aylanuvchan magnit maydonini o'rganishga kirishishdan avval bitta g'altak atrofida hosil bo'ladigan magnit maydoni xususiyatlarini o'rganamiz. Elektr mashinasi stator pazlariga chulg'am joylashtirilgan bo'lib, undan yo'nalishi 6.27- rasmda ko'rsatilgan tok o'tayotgan bo'lsin.



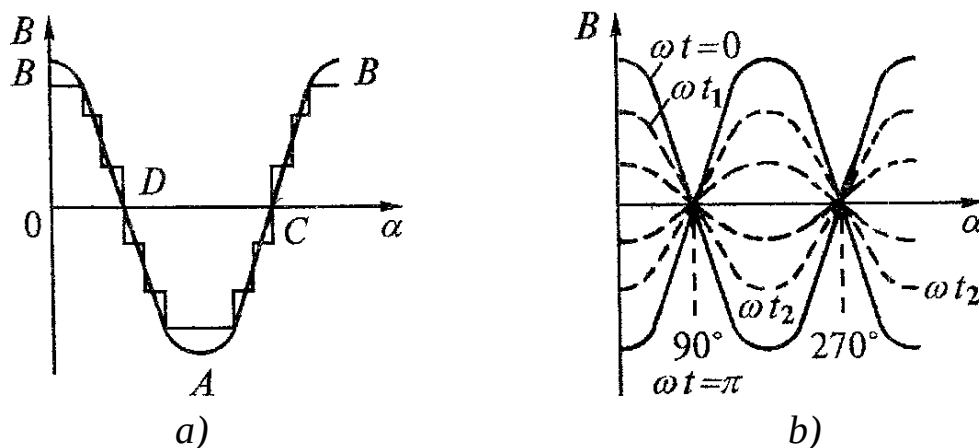
6.27- rasm

Hosil bo'lgan magnit maydoni induksiyasi tok kattaligiga va chulg'amdagi o'ramlar soniga to'g'ri proporsional bo'ladi. AB liniya bo'ylab induksiyaning qiymati maksimal, CD liniya bo'ylab esa minimal bo'ladi.

Halqasimon havo oralig'ida magnit maydoni induksiyasining taqsimlanishi burchak funksiyasi

hisoblanadi. Masalan, AB kesimda induksiyaning taqsimlanish qonuniyati zinapoyasimon ko‘rinishga ega bo‘ladi (6.28- rasm). Induksiyaning asosiy garmonikasi $B = B_0 \cos \alpha$ ko‘rinishida bo‘ladi. Induksiya o‘zgarishining bunday shakli chulg‘amdagi tok o‘zgarmas bo‘lganida hosil bo‘ladi.

Agar chulg‘amdan sinusoidal tok o‘tkazilsa, u holda uning atrofida sinusoidal qonuniyat bilan o‘zgaruvchi magnit maydoni hosil bo‘ladi. Misol uchun $B_0 = B_m \cos \omega t$ bo‘lganda havo oralig‘ining istalgan nuqtasida $B = B_0 \cos \alpha = B_m \cos \omega t \cos \alpha$ bo‘ladi. Bu tenglikdan ko‘rinib turibdiki,



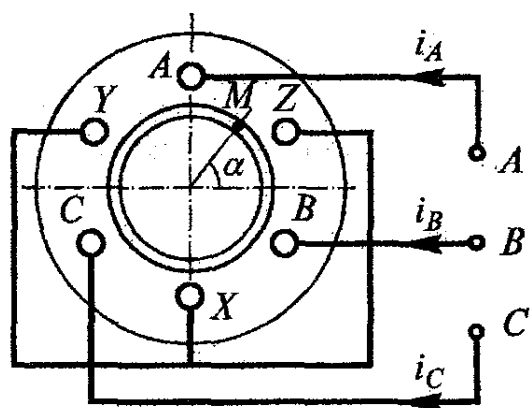
6.28- rasm

induksiya vaqt bo‘yicha ham, fazoda ham sinusoidal qonun bilan o‘zgaradi (6.28- rasm, b). Vaqtning istalgan paytida $\alpha = 0, 180^\circ, 360^\circ$ nuqtalarda $B = B_m$, $\alpha = 90^\circ, 270^\circ$ nuqtalarda esa $B = 0$ bo‘ladi. Magnit maydoni induksiyasi to‘lqinining maksimal bo‘lgan yo‘nalish magnit maydonining o‘q chizig‘i deb ataladi. Bu o‘q g‘altak o‘q chizig‘i bilan mos tushadi (6.27- rasmda AB chiziq).

Qiymati vaqt bo‘yicha o‘zgaradigan, lekin fazoda o‘zgarmaydigan maydon pulsatsiyalanuvchi maydon deb ataladi. Bunday maydonda induksiyaning maksimal qiymati har doim bir chiziqda bo‘ladi.

Shunday qilib, bitta chulg‘am yordamida faqat pulsatsiyalanuvchi maydon hosil qilish mumkin. Agar elektr mashinasi statorida uchta chulg‘am joylashtirilib, ular uch fazali toklar sistemasidan ta‘minlansa, u holda uchta pulsatsiyalanuvchi maydonning ustma-ustlanishi natijasida aylanuvchan maydon hosil bo‘ladi. Endi ana shu maydon xususiyatlarini ko‘rib chiqamiz.

6.6.2. Aylanuvchan magnet maydonini hosil qilish



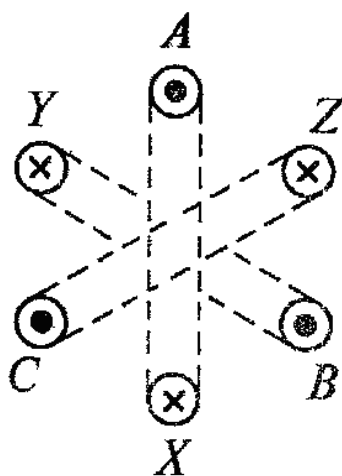
6.29- rasm

Elektr mashinasi statorida yulduz ulangan va fazoda oʻzaro 120° siljigan uchta AX , BY , CZ chulgʻamlar joylashtirilgan boʻlsin (6.29- rasm). Ushbu chulgʻamlarga uch fazali simmetrik kuchlanishlar sistemasi ulanganda chulgʻamlardan bir-biridan oʻzaro 120° ga siljigan quyidagi simmetrik toklar sistemasi hosil boʻladi:

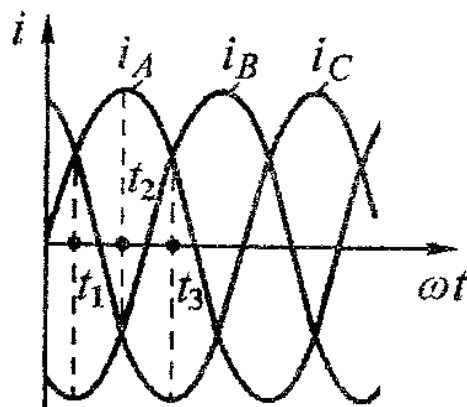
$$i_A = I_m \sin \omega t,$$

$$i_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ), \quad i_C = I_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

Vaqtning turli momentlari uchun natijaviy magnet maydonining shaklini koʻrib chiqamiz. Tokning musbat yoʻnalishini chulgʻam oxiridan boshiga tomon qabul qilamiz (6.30- rasm, a).



a)



b)

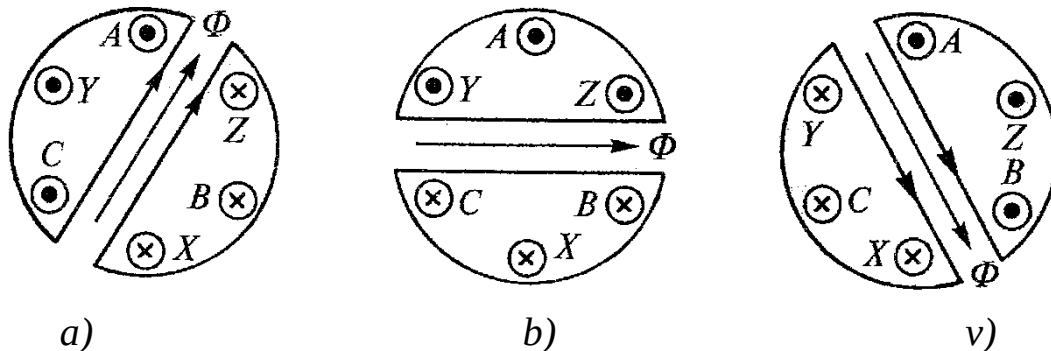
6.30- rasm

$t = t_1$ paytda (6.30- rasm, b) $i_A > 0$, $i_B < 0$, $i_C > 0$. Bu holat uchun chulgʻamlar ichidagi magnet maydoni kuch chiziqlarining yoʻnalishi 6.31- rasm, a da tasvirlangan.

$t = t_2$ paytda $i_A > 0$, $i_B < 0$, $i_C < 0$ boʻlib, unga 6.31- rasm, b dagi koʻrinish mos keladi. Rasmdan koʻrinib turibdiki, natijaviy magnet oqimi (magnet maydonining oʻq chizigʻi) maʼlum burchakka burilgan.

$t = t_3$ paytda $i_A > 0$, $i_B > 0$, $i_C < 0$ bo'lib, magnit maydonining o'q chizig'i yana ma'lum burchakka buriladi (6.31- rasm, v) va h.k.

Shunday qilib, chulg'amlardagi toklar qiymatlari va yo'nalishlarini vaqt bo'yicha o'zgarishi natijaviy magnit maydonini soat mili harakati



6.31- rasm

bo'yicha burilishiga yoki boshqacha qilib aytganda, uni aylanishiga olib keladi. O'zgaruvchan tokning bitta davri mobaynida magnit maydoni stator o'qi atrofida bir marta to'liq aylanadi. Aylanish yo'nalishi chulg'amlardagi faza toklari ketma-ketligiga bog'liq bo'ladi. Aylanish yo'nalishini o'zgartirish uchun fazalar ketma-ketligini o'zgartirish, ya'ni ikkita faza o'rnini o'zaro almashtirish kifoya. Natijaviy magnit maydoni induksiyasi vektori joylashishining vaqt bo'yicha va fazoda o'zgarishini ko'rib chiqamiz. 6.29- rasmda keltirilgan elektr mashinasi havo oralig'ining M nuqtasidagi induksiya qiymatini aniqlaymiz. Bu nuqta A faza chulg'ami o'qidan α burchakka, B faza chulg'ami o'qidan $\alpha + 120^\circ$ burchakka, C fazadan $\alpha - 120^\circ$ ga siljigan. M nuqtadagi induksiya qiymatini topish uchun ustma-ustlash prinsipidan foydalanamiz:

$$B = B_A + B_B + B_C; \quad \text{bu yerda} \quad B_A = B_m \cos \omega t \cos \alpha, \\ B_B = B_m \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\alpha + 120^\circ), \quad B_C = B_m \cos(\omega t - 240^\circ) \cos(\alpha + 240^\circ).$$

$\cos \omega t \cos \alpha = \frac{1}{2} [\cos(\omega t + \alpha) + \cos(\omega t - \alpha)]$ ifodani hisobga olib, quyidagilarni hosil qilamiz:

$$B_A = \frac{1}{2} B_m [\cos(\omega t + \alpha) + \cos(\omega t - \alpha)], \\ B_B = \frac{1}{2} B_m [\cos(\omega t + \alpha) + \cos(\omega t - \alpha - 240^\circ)] \\ B_C = \frac{1}{2} B_m [\cos(\omega t + \alpha) + \cos(\omega t - \alpha + 240^\circ)].$$

Bundan

$$B = B_A + B_B + B_C = \frac{3}{2} B_m \cos(\omega t + \alpha).$$

Oxirgi tenglikdan ko‘rinib turibdiki, havo oralig‘i nuqtasidagi maydon induksiyasi bir paytning o‘zida ham vaqt, ham shu nuqtaning fazodagi holati funksiyasi hisoblanadi.

Aytaylik, ko‘rib chiqilayotgan M nuqta havo oralig‘i bo‘ylab manfiy, ya'ni soat mili harakati yo‘nalishida ω burchak tezlik bilan harakatlanmoqda. Bu holat uchun $\alpha = -\omega t$ bo‘lib, $B = \frac{3}{2} B_m = 1,5B_m$ bo‘ladi. Bundan ko‘rinadiki, natijaviy maydonning o‘q chizig‘i soat mili harakati yo‘nalishida ω burchak tezlik bilan aylanib turadi va o‘q chiziqning o‘zida uning qiymati ($1,5B_m$) o‘zgarmaydi.

Yuqorida olingan natijalarni tahlil qilib, quyidagi xulosalarni hosil qilishimiz mumkin:

1. Fazoda o‘zaro siljigan chulg‘amlardan toklar o‘tganida burchak tezligi tok chastotasiga teng bo‘lgan aylanuvchan magnit maydoni hosil bo‘ladi. Tok davriga teng bo‘lgan vaqt davomida maydon to‘liq bir marta aylanib ulguradi.

2. Stator ichki yuzasi bo‘ylab maydon induksiyasi sinusoidal (aniqrog‘i trapesiyasimon) qonuniyat bo‘yicha taqsimlangan bo‘ladi. Uning qiymati maydon o‘q chizig‘i bo‘ylab $1,5B_m$ ga teng va o‘zgarmasdir.

3. Pulsatsiyalanuvchi magnit maydonini bir-biriga qarama-qarshi yo‘nalgan ikkita aylanuvchan magnit maydonlariga ajratish mumkin.

Bunda mazkur maydon induksiyasining maksimal qiymati $\frac{1}{2} B_m$ ga teng, chunki

$$B = B_m \cos \omega t \cdot \cos \alpha = \frac{1}{2} B_m [\cos(\omega t + \alpha) + \cos(\omega t - \alpha)].$$

4. Chulg‘amlar simmetrik toklar sistemasidan ta'minlanganida aylanuvchan magnit maydonining trayektoriyasi aylana hosil qiladi, chunki moduli $1,5B_m$ ga teng bo‘lgan vektor uchining harakati aylana hosil qiladi. Agar chulg‘amlardan nosimmetrik toklar o‘tsa, u holda aylanuvchan magnit maydoni harakatining trayektoriyasi elliptik ko‘rinishda bo‘ladi.

6.6.3. Uch fazali asinxron motorning ishlash prinsipi

6.29- rasmda ko‘rsatilgan elektr motorining stator chulg‘amlari uch fazali manbadan ta'minlanganida aylanuvchan magnit maydoni hosil

bo'ladi. Rotor qisqa tutashtirilgan yoki 3 ta faza chulg'amlaridan tashkil topgan bo'ladi. Aylanuvchan magnit maydoni rotor chulg'amlarini kesib o'tganida ularda elektromagnit induksiya qonuniga ko'ra EYK hosil bo'ladi. Bu EYK lar ta'sirida rotor chulg'amlaridan toklar o'ta boshlaydi. Stator aylanuvchan magnit maydoni va rotor toklari atrofidagi maydonning o'zaro ta'siri natijasida rotorni aylanuvchan magnit maydoni yo'nalishida aylantiruvchi moment yuzaga keladi. Rotorning aylanish tezligi (n_2) stator aylanuvchan magnit maydoni aylanish tezligi (n_1) dan biroz kichikroq bo'ladi. Chunki, agar $n_1 = n_2$ bo'lganida aylanuvchan magnit maydoni kuch chiziqlari rotor chulg'amlarini kesib o'tmagan va unda EYK induksiyalanmagan bo'lar edi. Shuning uchun ham bunday motorlar asinxron motorlar deb ataladi.

Rotor tezligini aylanuvchan magnit maydoni tezligidan kichiklik darajasi sirpanish bilan tavsiflanadi:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Kam quvvatli asinxron motorlar turg'un ish rejimlarida sirpanish $0,1 \div 0,15$ ni, katta quvvatli asinxron motorlarda esa u $0,02 \div 0,05$ ni tashkil etadi.

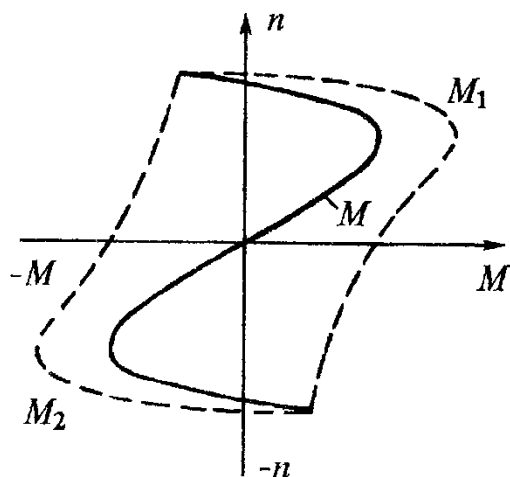
Asinxron motorlarning tuzilishi, ishlash prinsipi va o'ziga xos xususiyatlari "Elektromexanika" kursida batafsil bayon etiladi.

6.6.4. Bir fazali asinxron motorning ishlash prinsipi

Bir fazali asinxron motor statorida bitta chulg'am, rotorida esa qisqa tutashtirilgan chulg'am joylashtirilgan bo'ladi. Stator chulg'amiga sinusoidal tok berilganida uning atrofida pulsatsiyalanuvchi magnit maydoni hosil bo'ladi. Bu maydonni ikkita aylanuvchi maydon ko'rinishida tasvirlab, uning ta'sirida yuzaga keladigan aylantiruvchi momentni $M = M_1 - M_2$ ko'rinishida yozishimiz mumkin. $n = f(M)$ bog'lanish 6.32- rasmda keltirilgan.

Rotor qo'zg'almas bo'lgan holatda aylanuvchi maydonlar qiymat jihatdan o'zaro teng, lekin bir-biriga qarama-qarshi yo'nalgan aylantiruvchi momentlarni hosil qiladi. Shuning uchun ham bu momentlar ta'sirida rotor harakatga kelmaydi. U harakatga kelishi uchun momentlardan birining qiymati kattaroq bo'lishi lozim.

Bir fazali elektr motorlarida ishga tushirish momentini hosil qilish uchun qo'shimcha ishga tushirish chulg'amidan foydalaniladi yoki stator zanjiriga faza siljituvchi element, masalan, kondensator ulanadi. Natijada



6.32- rasm

ikki fazali sistema hosil bo'lib, motor ishchi havo oralig'ida elliptik trayektoriya bo'ylab aylanuvchan maydon hosil bo'ladi va uning ta'sirida rotor harakatga keladi. Motor ishga tushganidan keyin ishga tushirish chulg'ami zanjirdan ajratiladi.

6.7. Simmetrik tashkil etuvchilar usuli

Nosimmetrik uch fazali zanjirlarda tok yoki kuchlanishlarni simmetrik tashkil etuvchilar yig'indisi ko'rinishida ifodalashga asoslangan hisoblash usuli simmetrik tashkil etuvchilar usuli deb ataladi. Ushbu usulning mohiyati quyidagicha:

1. Istalgan uch fazali nosimmetrik kuchlanishlar sistemasi nol, to'g'ri va teskari deb ataluvchi ketma-ketlikli tashkil etuvchilar ko'rinishida ifodalanadi.
2. Kuchlanishning har bir tashkil etuvchisidan zanjirda hosil bo'lgan toklar aniqlanadi.
3. Ustma-ustlash prinsipi asosida zanjirdagi toklar topiladi.

6.7.1. Uch fazali vektorlar sistemasining simmetrik tashkil etuvchilari

Nol ketma – ketlikli simmetrik toklar tizimi – bu elektr toklari faza jihatidan o'zaro mos tushadigan ko'p fazali simmetrik elektr toklari tizimidir.

Aytib o'tish joizki, elektr kuchlanishlar, elektr yurituvchi kuchlar, magnit oqimlari va boshqa kattaliklar simmetrik nol ketma – ketlikli tashkil etuvchilari ham shu singari aniqlanadi.

To'g'ri ketma – ketlikli simmetrik toklar tizimi – bu fazalar ketma-ketligi tartibi asosiy deb qabul qilingan ko'p fazali simmetrik elektr toklari tizimidir.

Ko'p fazali simmetrik elektr toklari tizimi fazalar ketma – ketligining asosiy tartibida har bir faza birinchi deb qabul qilingan fazaga nisbatan

$2\pi(1-k)/m$ ga teng bo'lgan bir xil kattalikka ortadi yoki kamayadi, bu yerda m – fazalar soni; $k = 1, 2, \dots, m$ – faza raqami. Elektr kuchlanishlar, elektr yurituvchi kuchlar, magnit oqimlari va boshqa kattaliklar to'g'ri ketma – ketlikli simmetrik tashkil etuvchilari ham shu singari aniqlanadi.

Teskari ketma–ketlikli simmetrik toklar tizimi – fazalar ketma–ketligining tartibi asosiy deb qabul qilingan fazalar ketma–ketligi tartibiga teskari bo'lgan ko'p fazali simmetrik elektr toklari tizimidir.

Ko'p fazali simmetrik elektr toklari tizimi fazalar ketma – ketligining teskari tartibida har bir faza birinchi deb qabul qilingan fazaga nisbatan $2\pi(1-k)/m$ ga teng bo'lgan bir xil kattalikka ortadi yoki kamayadi, bu yerda m – fazalar soni; $k = 1, 2, \dots, m$ – faza raqami. Elektr kuchlanishlar, elektr yurituvchi kuchlar, magnit oqimlari va boshqa kattaliklar teskari ketma – ketlikli simmetrik tashkil etuvchilari ham shu singari aniqlanadi.

Nosimmetrik m–fazali elektr toklari tizimining simmetrik tashkil etuvchilari – m–fazali nosimmetrik elektr toklari tizimi m ketma–ketlikli va $n = 1, 2, \dots, m - 1$ indeksli simmetrik tashkil etuvchilarga ajratilishi (yoyilishi) mumkin, bunda har bir ketma – ketlikdagi faza siljishi $2\pi(1 - k)\frac{n}{m}$ ga teng bo'ladi, bu yerda $k = 1, 2, \dots, m$ – faza raqami.

Fazalari A, B va C bilan belgilanadigan uch fazali tizimda nol ($n = 0$), to'g'ri ($n = 1$) va teskari ($n = 2$) deb nomlangan $k = 1, 2$ va 3 ketma – ketliklar mos keladi. Nosimmetrik m–fazali elektr kuchlanishlar, elektr yurituvchi kuchlar, magnit oqimlari va boshqa kattaliklar simmetrik tashkil etuvchilari ham shu singari aniqlanadi.

Nol, to'g'ri va teskari ketma-ketlikli tashkil etuvchilar va ularni nosimmetrik uch fazali vektorlar sistemasi orqali aniqlashni ko'rib chiqamiz. Uch fazali simmetrik sistemada EYK, kuchlanish va tok fazalari orasidagi burchak 120° ga teng bo'lganligi sababli matematik almashtirish amallarini soddalashtirish maqsadida, quyidagi kompleks ko'paytuvchi yoki uch fazali operatorlardan foydalanamiz:

$$a = e^{j120^\circ} = e^{-j240^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ} = \cos 120^\circ - j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$a^3 = e^{j360^\circ} = 1,$$

$$1 + a + a^2 = 1 - \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,$$

ya'ni $1, a$ va a^2 vektorlar yig'indisi simmetrik sistemani hosil qiladi.

Uch fazali simmetrik EYK lar sistemasini a operator yordamida ifodalaymiz:

$$\begin{aligned}\underline{E}_A &= E, \quad \underline{E}_B = Ee^{-j120^\circ} = Ee^{j240^\circ} = a^2 E, \\ \underline{E}_C &= Ee^{-j240^\circ} = Ee^{j120^\circ} = aE\end{aligned}$$

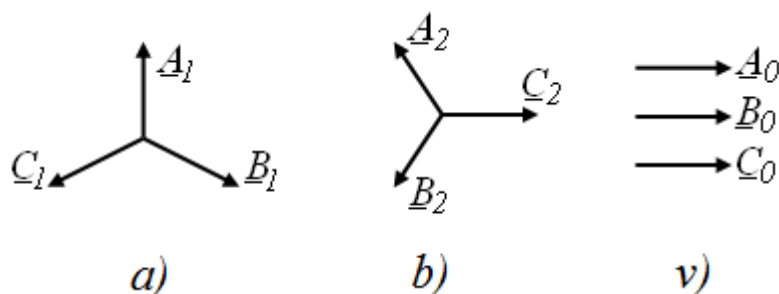
yoki

$$\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = (1 + a + a^2)E = 0.$$

Vektorni a ga ko'paytirish uni soat mili harakatiga teskari yo'nalishda 120° ga yoki soat mili harakati yo'nalishida 240° ga burish demakdir. Vektorni a^2 ga ko'paytirish uni soat mili harakatiga teskari yo'nalishda 240° ga, mos yo'nalishda esa 120° ga burish demakdir.

Endi a operator orqali simmetrik tashkil etuvchilar ifodalarini hosil qilamiz.

To'g'ri ketma-ketlikli tashkil etuvchilar modullari teng va o'zaro 120° ga siljigan A_1, B_1 va C_1 vektorlardan iborat bo'lib, asosiy ketma-ketlik deb qabul qilinadi va ketma-ketlik tartibi A_1, B_1, C_1 ko'rinishida bo'ladi (6.33-rasm, a), bunda $\underline{B}_1 = a^2 \underline{A}_1$, $\underline{C}_1 = a \underline{A}_1$.



6.33- rasm

Teskari ketma-ketlikli tashkil etuvchilar modullari teng va o'zaro 120° ga siljigan A_2, B_2, C_2 vektorlardan iborat bo'lib, ketma-ketlik tartibi A_2, C_2, B_2 ko'rinishida bo'ladi (6.33-rasm, b), bunda $\underline{B}_2 = a \underline{A}_2$, $\underline{C}_2 = a^2 \underline{A}_2$.

Nol ketma-ketlikli tashkil etuvchilar modullari teng va faza jihatdan mos bo'lgan uchta bir xil vektordan iborat (6.33- rasm, v), bunda $\underline{A}_0 = \underline{B}_0 = \underline{C}_0$.

$\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}$ nosimmetrik vektorlar sistemasini uchta simmetrik tashkil etuvchilar yig'indisi ko'rinishida yozamiz:

$$\left. \begin{aligned}\underline{A} &= \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0, \\ \underline{B} &= \underline{B}_1 + \underline{B}_2 + \underline{B}_0 = a^2 \underline{A}_1 + a \underline{A}_2 + \underline{A}_0, \\ \underline{C} &= \underline{C}_1 + \underline{C}_2 + \underline{C}_0 = a \underline{A}_1 + a^2 \underline{A}_2 + \underline{A}_0.\end{aligned}\right\} \quad (6.5)$$

Hosil bo'lgan tenglamalar sistemasi yordamida berilgan $\underline{A}_1, \underline{A}_2$ va $\underline{A}_0$ simmetrik tashkil etuvchilar yordamida $\underline{A}, \underline{B}$ va $\underline{C}$ vektorlarni aniqlash mumkin.

(6.5) tenglamalar sistemasini $\underline{A}_1, \underline{A}_2$ va $\underline{A}_0$ larga nisbatan yechib, $\underline{A}, \underline{B}$ va $\underline{C}$ vektorlar berilgan holat uchun tegishli simmetrik tashkil etuvchilarni topish mumkin bo'ladi. $\underline{A}_0$ vektorni topish uchun (6.5) sistemadagi tenglamalarni o'zaro qo'shish kifoya, ya'ni:

$$\underline{A} + \underline{B} + \underline{C} = \underline{A}_1(1 + a + a^2) + \underline{A}_2(1 + a + a^2) + 3\underline{A}_0.$$

$$1 + a + a^2 = 0 \text{ ni hisobga olsak: } \underline{A}_0 = \frac{1}{3}(\underline{A} + \underline{B} + \underline{C}). \quad (6.6)$$

$\underline{A}_1$ va $\underline{A}_2$ vektorlar uchun (6.5) sistemani Gauss usuli yordamida yechib, quyidagilarni hosil qilamiz:

$$\underline{A}_1 = \frac{1}{3}(\underline{A} + a\underline{B} + a^2\underline{C}), \quad (6.7)$$

$$\underline{A}_2 = \frac{1}{3}(\underline{A} + a^2\underline{B} + a\underline{C}). \quad (6.8)$$

(6.6) tenglama tahlilidan quyidagi xulosalarni chiqarish mumkin:

1. Uch fazali zanjirda liniya kuchlanishlar yig'indisi nolga teng bo'lganligi sababli liniya kuchlanishlar tarkibida nol ketma-ketlikli tashkil etuvchilar bo'lmaydi, ya'ni:

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA}}{3} = 0.$$

2. Uch simli uch fazali zanjirda liniya toklari vektorlarining yig'indisi nolga teng. Shuning uchun ham liniya toklar sistemasida nol ketma-ketlikli tashkil etuvchilar nolga teng, ya'ni:

$$\underline{I}_0 = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) = 0.$$

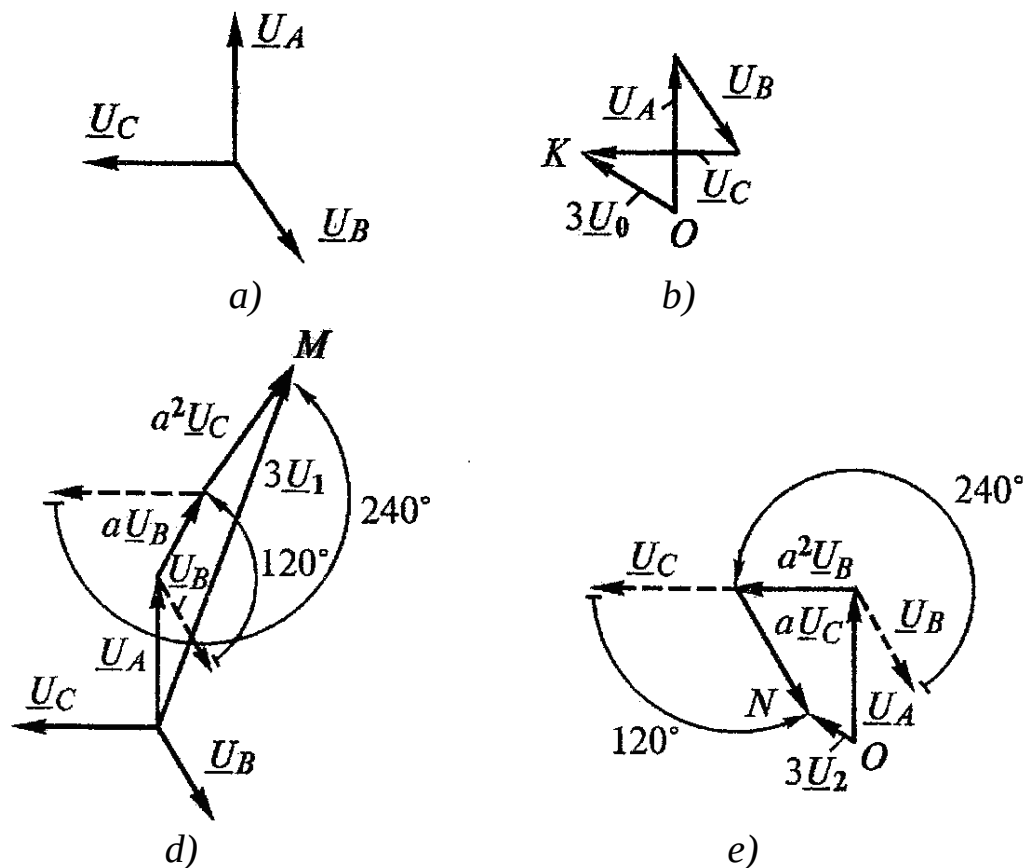
3. Neytral simli uch fazali zanjirda neytral simdagi tok nol ketma-ketlikli tashkil etuvchining uchlanganiga teng, ya'ni:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 3\underline{I}_0.$$

(6.6), (6.7) va (6.8) tenglamalar yordamida berilgan nosimmetrik vektorlar sistemasining simmetrik tashkil etuvchilarini topish mumkin.

Masalan, $\underline{U}_A, \underline{U}_B$ va $\underline{U}_C$ faza kuchlanishlari nosimmetrik sistemasi berilgan bo'lsin (6.34- rasm, a). $\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C}{3}$; $U_0 = \frac{OK \cdot m_U}{3}$

bunda m_U – kuchlanishlar masshtabi.



6.34- rasm

Kuchlanishlarning to'g'ri va teskari ketma-ketlikli tashkil etuvchilarini aniqlash uchun vektorlarni quyidagi formulalar bo'yicha qo'shamiz $\underline{U}_1 = \frac{\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C}{3}$; $\underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C}{3}$. Vektorlarni qurishda eslatib o'tish joizki, vektorni a ga ko'paytirish uni soat miliga qarama-qarshi yo'nalishda 120° ga burish demakdir, a^2 ga ko'paytirish esa uni soat miliga qarama-qarshi yo'nalishda 240° ga burish demakdir.

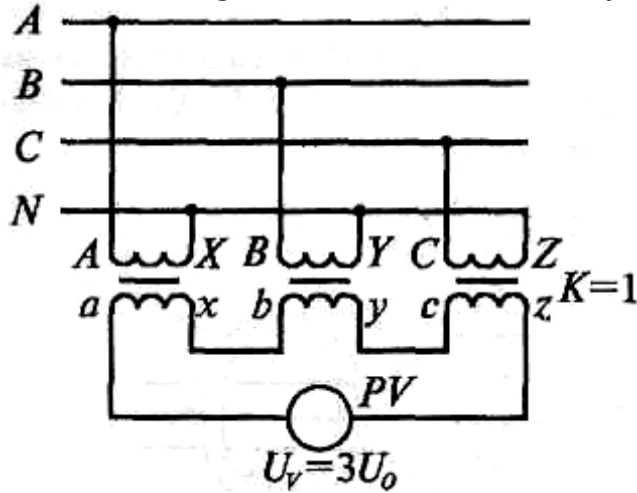
$\underline{U}_0, \underline{U}_1$ va $\underline{U}_2$ kuchlanishlarni topish uchun (6.6)...(6.8) tenglamalar asosida vektorlarni qo'shamiz (6.34- rasm, b, d, e). Vektor diagrammalardan to'g'ri va teskari tashkil etuvchilarni topamiz:

$$\underline{U}_1 = \frac{0Mm_u}{3}; \quad \underline{U}_2 = \frac{0Nm_u}{3}.$$

6.7.2. Simmetrik tashkil etuvchilarni o'lchash usullari

Tok va kuchlanishlar simmetrik tashkil etuvchilarini tajriba yordamida aniqlashda maxsus filtrlardan foydalaniladi. Bunday filtrlar uch fazali energetik tizimlarni avariya rejimlaridan himoya qiluvchi sxemalarda

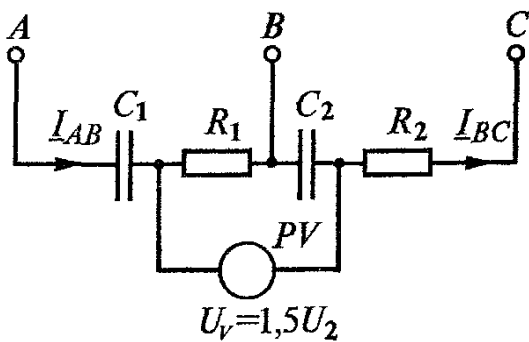
qo'llaniladi. Bu tizimlarda nol va teskari ketma-ketlikli tashkil etuvchilarning hosil bo'lishi simmetriya buzilganligini ko'rsatadi.



6.35- rasm

Kuchlanish nol ketma-ketlikli tashkil etuvchisini ajratuvchi (aniqllovchi) filtr uchta bir fazali transformatoridan tashkil topgan bo'lib, ularning birlamchi chulg'amlari uch fazali zanjir faza kuchlanishlariga, ikkilamchi chulg'amlari esa ochiq uchburchak sxemasida voltmetrga ulangan (6.35- rasm). Agar transformatorlar ko'effitsiyentlari birga teng

bo'lsa, u holda voltmetr o'lchaydigan natijaviy kuchlanish quyidagicha aniqlanadi: $\underline{U}_V = \underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = 3\underline{U}_0$ yoki $\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_V}{3}$, ya'ni voltmetr kuchlanish nol ketma-ketlikli tashkil etuvchisini uchlangan qiymatini ko'rsatadi.



6.36- rasm

Teskari ketma-ketlikli kuchlanish filtri ikkitadan rezistor va kondensatordan iborat (6.36- rasm).

Filtr parametrlari $\frac{R_1}{X_1} = \frac{X_2}{R_2} = \sqrt{3}$ shartni qanoatlantirishi lozim. Bu holda fazalar orasidagi qarshiliklar;

$$\underline{Z}_{AB} = R_1 - jX_1 = R_1 - j\frac{R_1}{\sqrt{3}} = \frac{2R_1}{\sqrt{3}}e^{-j30^\circ},$$

$$\underline{Z}_{BC} = R_2 - jX_2 = \frac{X_2}{\sqrt{3}} - jX_2 = \frac{2X_2}{\sqrt{3}}e^{-j60^\circ}.$$

Liniya kuchlanishlarini simmetrik tashkil etuvchilar orqali ifodalaymiz:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2; \quad \underline{U}_{BC} = a^2\underline{U}_1 + a\underline{U}_2; \quad \underline{U}_0 = 0.$$

Filtr shoxobchalaridagi toklar:

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}} = \frac{\sqrt{3}}{2R_1}\underline{U}_1e^{j30^\circ} + \frac{\sqrt{3}}{2R_1}\underline{U}_2e^{j30^\circ},$$

$$\underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}} = \frac{\sqrt{3}a^2}{2X_2}\underline{U}_1e^{j60^\circ} + \frac{\sqrt{3}a}{2X_2}\underline{U}_2e^{j60^\circ}.$$

R_1 va X_2 elementlardagi kuchlanishlar:

$$\underline{U}_{R_1} = \underline{I}_{AB} R_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \underline{U}_1 e^{j30^\circ} + \frac{\sqrt{3}}{2} \underline{U}_2 e^{j30^\circ},$$

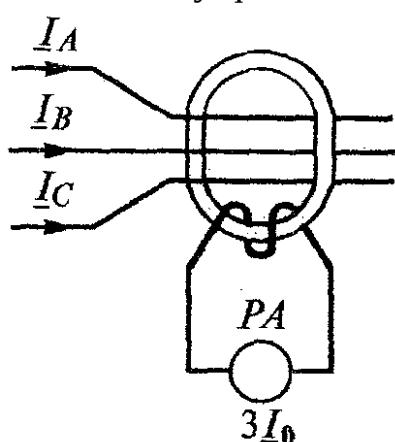
$$\underline{U}_{X_2} = \underline{I}_{BC} (-jX_2) = -\frac{\sqrt{3}}{2} \underline{U}_1 e^{j30^\circ} + \frac{\sqrt{3}}{2} \underline{U}_2 e^{j30^\circ}.$$

Voltmetr ko'rsatkichi

$$\underline{U}_V = \underline{U}_{R_1} + \underline{U}_{X_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \underline{U}_2 (e^{j30^\circ} + e^{j90^\circ}) = 1,5 \underline{U}_2 e^{j60^\circ},$$

$$U_V = 1,5 U_2 \text{ yoki } \underline{U}_2 = \frac{U_V}{1,5}.$$

Shunday qilib, voltmetr teskari ketma-ketlikli kuchlanishni ko'rsatadi.



6.37- rasm

Agar A va C qismalar o'rni almashtirilsa va $\frac{R_1}{X_1} = \frac{R_2}{X_2} = \sqrt{3}$ shart bajarilsa, u holda voltmetr to'g'ri ketma-ketlikli kuchlanishni ko'rsatadi, ya'ni

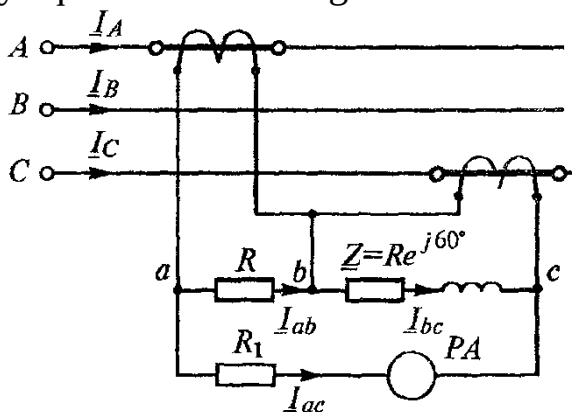
$$U_V = \sqrt{3} U_1 \quad U_1 = \frac{U_V}{\sqrt{3}}.$$

Nol ketma-ketlikli toklar filtri tok transformatorlari asosida qurilish mumkin (6.37- rasm)

Agar transformatorning transformatsiya koeffitsiyenti birga teng bo'lsa, u holda uning ikkilamchi chulg'amiga ulangan ampermetr ko'rsatkichi $\underline{I}_0 = \frac{1}{3} \underline{I} = \frac{1}{3} (\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C)$ ga teng bo'ladi.

Uch simli uch fazali simmetrik zanjir normal rejimda ishlaganda ampermetr nolni ko'rsatadi. Asbob ko'rsatishining noldan og'ishi uch fazali sistemada normal rejim buzilganligidan dalolat beradi. Shuning uchun ham bunday filtrlar releli himoya qurilmalarida keng ishlatiladi.

Teskari ketma-ketlikli toklar filtri ham tok transformatorlari asosida hosil qilinadi (6.38- rasm). Shoxobchalar qarshiliklari $\underline{Z}_{ab} = R$, $\underline{Z}_{bc} = R \cdot e^{j60^\circ}$, $\underline{Z}_{ac} = R_1$ munosabatda tanlansa, ampermetr ko'rsatkichi teskari ketma-ketlikli tokka proporsional bo'ladi. Ushbu tasdiqni isbotlash uchun quyidagi o'zgartirishlarni bajaramiz.



6.38- rasm

Kirxgof qonunlariga ko'ra:

$$RI_{ab} + R \cdot e^{j60^\circ} I_{bc} - R_1 I_{ac} = 0, \quad (6.9)$$

$$I_{ab} = I_a - I_{ac}, \quad I_{bc} = I_c - I_{ac}, \quad (6.10)$$

(6.10) ifodalarni (6.9) ga qo'yamiz.

$$RI_a + RI_{ac} + R \cdot e^{j60^\circ} I_c - R \cdot e^{j60^\circ} I_{ac} - R_1 I_{ac} = 0,$$

bundan

$$I_{ac} = \frac{RI_a + R \cdot e^{j60^\circ} I_c}{R + R \cdot e^{j60^\circ} + R_1}.$$

$I_0 = 0$ bo'lganligi uchun $I_a = I_1 + I_2$, $I_c = aI_1 + a^2 I_2$.

Bularni va $1 + ae^{j60^\circ} = 0$ ekanligini hisobga olib, quyidagini hosil qilamiz:

$$I_{ac} = \frac{R + aR \cdot e^{j60^\circ}}{R + R \cdot e^{j60^\circ} + R_1} = k I_2,$$

bu yerda k - ampermetr ko'rsatkichi va teskari ketma-ketlikli tok orasidagi proporsionallik koeffitsiyenti.

Agar filtr sxemasidagi Z_{ab} va Z_{bc} qarshiliklar o'zaro almashtirilsa, u holda ampermetr ko'rsatkichi to'g'ri ketma-ketli tokka proporsional bo'ladi.

6.8. Uch fazali zanjirlarni simmetrik tashkil etuvchilar usuli yordamida hisoblash

Bu usul usma-ustlash prinsipiga asoslangan bo'lib, dastlabki nosimmetrik uch fazali zanjir uchta simmetrik zanjir majmuasi ko'rinishida tasvirlanadi. Bunda har bir simmetrik tashkil etuvchining zanjirga ta'siri alohida hisoblanadi. Boshqacha qilib aytganda, kuchlanishning har bir simmetrik tashkil etuvchisi zanjirda mos tashkil etuvchi toklarni hosil qiladi va aksincha: tokning har bir tashkil etuvchisidan zanjirda mos tashkil etuvchili kuchlanish pasayishi yuzaga keladi.

6.8.1. Simmetrik uch fazali zanjirlarni har xil ketma-ketlikli toklar uchun qarshiliklari

Uch fazali zanjirlarni hisoblashda har xil ketma-ketlikli toklar uchun zanjir qarshiliklarini bilish lozim bo'ladi, chunki bu qarshiliklar qiymatlari har xil ketma-ketliklar uchun turlicha. To'g'ri, teskari va nol ketma-ketlikli faza kuchlanishlari kompleks qiymatlarining unga mos faza toklari

kompleks qiymatlariga nisbati zanjirning mos ravishda to'g'ri, teskari va nol ketma-ketlikli kompleks qarshiliklari deb ataladi:

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1}, \quad \underline{Z}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2}, \quad \underline{Z}_0 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{I}_0}.$$

Tarkibida aylanuvchan elektr mashinalari bo'lmagan uch fazali zanjirlar (masalan, transformatorlar, uzatish liniyalari va h.k.) to'g'ri va teskari tashkil etuvchi qarshiliklar uchun $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$.

Nol ketma-ketlikli tashkil etuvchi tok uchun qarshilik qiymati uch fazali zanjir ulanish sxemasiga bog'liq bo'ladi. To'rt simli uch fazali zanjirda agar $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}$ bo'lsa, u holda unga berilgan simmetrik kuchlanish fazalari ketma-ketligi o'zgartirilganda toklar qiymatlari o'zgarmasdan qoladi (faqat ularning ketma-ketligi o'zgaradi). Shuning uchun ham bunday zanjirlar uchun $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}$ bo'ladi.

Agar uch fazali zanjirga nol ketma-ketlikli kuchlanishlar sistemasi ($\underline{U}_A = \underline{U}_B = \underline{U}_C = \underline{U}_0$) berilgan bo'lsa, u holda toklar sistemasi ham sismmetrik va nol ketma-ketlikli bo'ladi (3.11-rasm).

$$\underline{I}_A = \underline{I}_B = \underline{I}_C = \underline{I}_0$$

Neytral simdagi tok:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 3\underline{I}_0.$$

6.11- rasmdagi zanjir $An NA$ konturi uchun Kirgof 2- qonuniga binoan quyidagini $\underline{U}_A = \underline{I}_A \underline{Z}_A + \underline{I}_N \underline{Z}_N$ aniqlaymiz va bu tenglamaga $\underline{U}_A = \underline{U}_0$; $\underline{I}_A = \underline{I}_0$; $\underline{I}_N = 3\underline{I}_0$ tengliklarni qo'yamiz va $\underline{U}_0 = \underline{I}_0 \underline{Z} + 3\underline{I}_0 \underline{Z}_N = \underline{I}_0 (\underline{Z} + 3\underline{Z}_N)$ ga kelamiz bundan $\underline{Z}_0 = \underline{Z} + 3\underline{Z}_N = \frac{\underline{U}}{\underline{I}}$ ni aniqlaymiz.

Agar neytral sim bo'lmasa, u holda $\underline{Z}_0 = \infty$ bo'lib, $\underline{I}_0 = 0$ bo'ladi.

Aylanuvchi qismga ega bo'lgan elektr mashinalarda $\underline{Z}_1 \neq \underline{Z}_2 \neq \underline{Z}_0$ bo'lib, ko'pincha $\underline{Z}_1 > \underline{Z}_2$ bo'ladi. Buning sababi shundan iboratki, to'g'ri va teskari ketma-ketlikli tashkil etuvchi toklar o'zaro qarama-qarshi yo'nalishda aylanuvchi magnit maydonlarini hosil qiladi. Bunda tok to'g'ri ketma-ketlikli tashkil etuvchisidan hosil bo'lgan aylanuvchi magnit maydonining yo'nalishi rotor aylanish yo'nalishiga mos, tok teskari ketma-ketlikli tashkil etuvchisidan hosil bo'lgan aylanuvchi magnit maydonining yo'nalishi esa rotor aylanish yo'nalishiga teskari bo'ladi.

6.8.2. Nosimmetrik manbadan ta'minlanayotgan simmetrik uch fazali zanjirlardagi toklarni aniqlash

Bunday turkumdagi zanjirlarni hisoblashni nosimmetrik kuchlanishlar sistemasidan ta'minlanayotgan uch fazali elektr motori chulg'amlaridagi toklarni aniqlash misolida ko'rib chiqamiz. Hisoblashni quyidagi tartibda olib boramiz:

1. Berilgan nosimmetrik faza kuchlanishlari sistemasini simmetrik tashkil etuvchilar ko'rinishida ifodalaymiz:

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C); \quad \underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C);$$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C).$$

2. Om qonuni asosida toklar simmetrik tashkil etuvchilarini aniqlaymiz:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1}, \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_2}, \quad \underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_0}.$$

3. Toklar simmetrik tashkil etuvchilari orqali liniya toklarini topamiz:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_0 + \underline{I}_1 + \underline{I}_2; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_0 + a^2\underline{I}_1 + a\underline{I}_2;$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_0 + a\underline{I}_1 + a^2\underline{I}_2.$$

Shuni ta'kidlab o'tish joizki, bu usulni faqat chiziqli zanjirlarni hisoblashda qo'llash mumkin.

Masala. Uch fazali asinxron motor stator chulg'amlari nosimmetrik kuchlanishlar sistemasi $\underline{U}_A = 400 \text{ V}$, $\underline{U}_B = -j300 \text{ V}$, $\underline{U}_C = j300 \text{ V}$ ga ulangan. Motor neytral nuqtasi izolyasiyalangan. Motor fazalarining to'g'ri va teskari ketma-ketlikli toklarga qarshiliklari $\underline{Z}_1 = 6 + j6 \Omega$, $\underline{Z}_2 = 0,3 + j1,1 \Omega$. Liniya toklari, motor iste'mol qilayotgan aktiv, reaktiv va to'la quvvatlar topilsin.

Yechish. 1. Faza kuchlanishlari simmetrik tashkil etuvchilari quyidagicha topiladi:

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C) = \frac{400 - j300 + j300}{3} \approx 133 \text{ V},$$

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C) = \frac{1}{3}[400 + e^{j120^\circ}(-j300) + e^{j240^\circ}j300] = 307 \text{ V},$$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C) = \frac{1}{3}[400 + e^{j240^\circ}(-j300) + e^{j120^\circ}j300] = -40,7 \text{ V}.$$

2. Toklar simmetrik tashkil etuvchilari Om qonuni yordamida quyidagicha aniqlanadi:

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_0} = \frac{133}{\infty} = 0, \quad \underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1} = \frac{307}{6 + j6} = 36,2e^{-j45^\circ} \text{ A},$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_2} = \frac{-40,7}{0,3 + j1,1} = -35,7e^{-j75^\circ} \text{ A}.$$

3. Liniya toklari:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = 36,2e^{-j45^\circ} - 35,7e^{-j75^\circ} = 19,2e^{-j29^\circ} \text{ A},$$

$$\underline{I}_B = a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 = 36,2e^{-j45^\circ} e^{j240^\circ} - 35,7e^{-j75^\circ} e^{j120^\circ} = 69e^{-j160^\circ} \text{ A},$$

$$\underline{I}_C = a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 = 36,2e^{-j45^\circ} e^{j120^\circ} + 35,7e^{-j75^\circ} e^{j240^\circ} = 51e^{j29^\circ} \text{ A}.$$

4. Aktiv quvvat:

$$P = \operatorname{Re} \left| 3\underline{U}_0^* \underline{I}_0 + 3\underline{U}_1^* \underline{I}_1 + 3\underline{U}_2^* \underline{I}_2 \right| = 3\underline{U}_1 \underline{I}_1 \cos \varphi_1 + 3\underline{U}_2 \underline{I}_2 \cos \varphi_2 =$$

$$= 3 \cdot 307 \cdot 36,2 \cos 45^\circ + 3 \cdot 40,7 \cdot 35,7 \cos 75^\circ = 24,7 \text{ kVt}.$$

5. Reaktiv quvvat:

$$Q = \operatorname{Im} \left| 3\underline{U}_1^* \underline{I}_1 + 3\underline{U}_2^* \underline{I}_2 \right| = 3\underline{U}_1 \underline{I}_1 \sin \varphi_1 + 3\underline{U}_2 \underline{I}_2 \sin \varphi_2 =$$

$$= 3 \cdot 307 \cdot 36,2 \sin 45^\circ + 3 \cdot 40,7 \cdot 35,7 \sin 75^\circ = 27,8 \text{ k var}.$$

6. To'la quvvat va quvvat koeffitsiyenti:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{24,7^2 + 27,8^2} = 37,2 \text{ kVA},$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{24,7}{37,2} = 0,68.$$

6.8.3. Simmetrik kuchlanishlar sistemasidan ta'minlanayotgan nosimmetrik uch fazali zanjirni hisoblash

Bunday turkumdagi zanjirlarda ham nosimmetrik toklar sistemasi hosil bo'ladi. Bu toklarni aniqlash uchun ko'pincha kompensatsiya prinsipi qo'llaniladi va natijada simmetrik zanjir va nosimmetrik EYK lar sistemasi hosil bo'ladi. Nosimmetrik EYK lar simmetrik tashkil etuvchilarga ajratiladi.

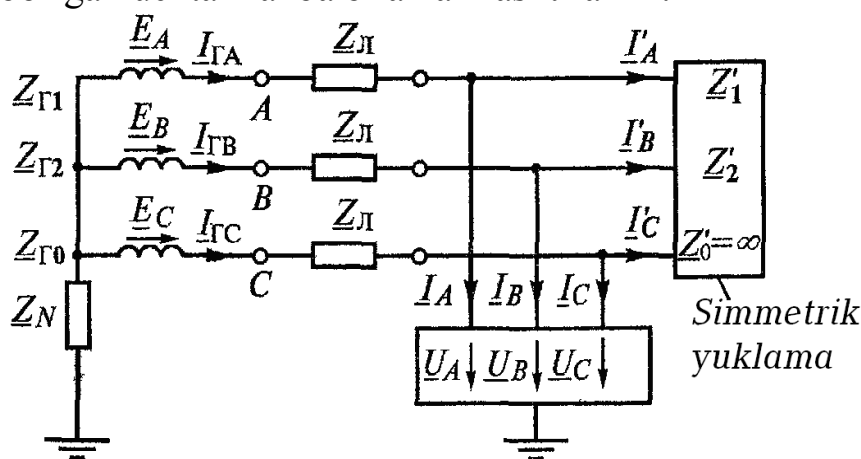
Uch fazali zanjirlarda ikki tur - bo'ylama va ko'ndalang nosimmetriya uchraydi. Ko'ndalang nosimmetriya simmetrik uch fazali zanjirga nosimmetrik yuklama ulanganda hosil bo'ladi. Bularga nosimmetrik qisqa tutashishlarning har xil turlari (fazalar o'rtasidagi qisqa tutashish, bitta yoki ikkita fazaning yerga ulanishi) kiradi.

Bo'ylama nosimmetriya fazalarga har xil qarshilikli yuklamalar ulanganda, bitta yoki ikkita fazada uzilish paydo bo'lganda yuzaga keladi.

Ko'ndalang nosimmetriyaga ega bo'lgan uch fazali zanjirni hisoblash.

6.39- rasmda keltirilgan uch fazali zanjirni hisoblaymiz. Ushbu zanjir simmetrik EYK lar sistemasini hosil qiluvchi uch fazali sinxron generator, liniya hamda bitta simmetrik va bitta nosimmetrik uch fazali yuklamadan tashkil topgan.

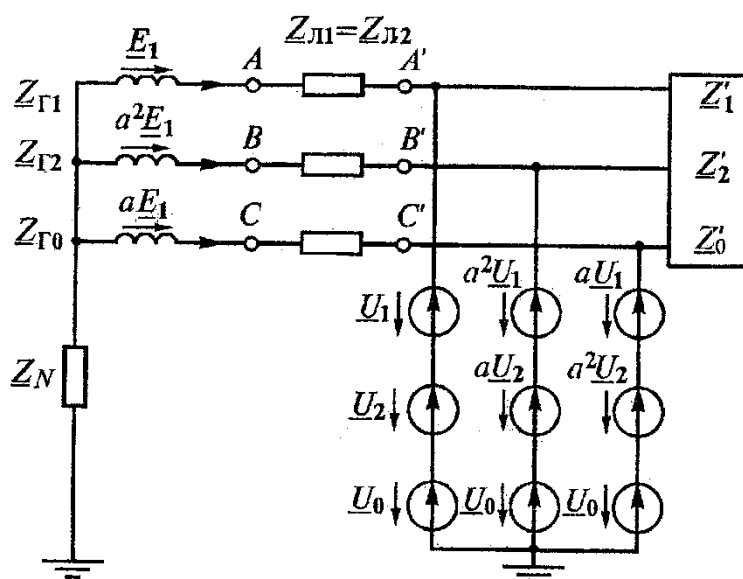
Sxemadagi nosimmetrik yuklamani kuchlanishlari $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ noma'lum bo'lgan uchta manba bilan almashtiramiz.



6.39- rasm

Natijada simmetrik EYK lar sistemasini va nosimmetrik kuchlanishlar sistemasidan iborat zanjir hosil bo'ladi (6.40- rasm).

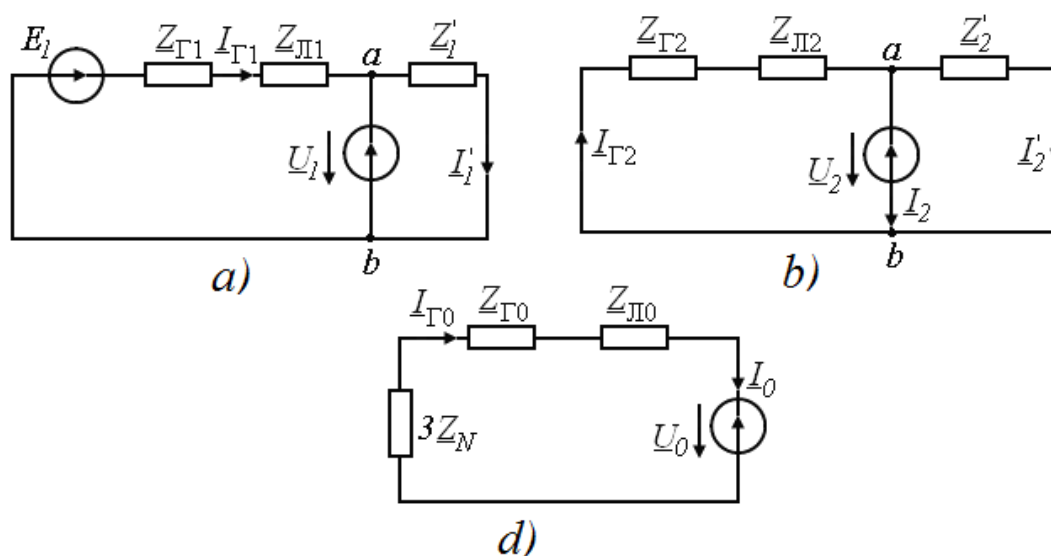
Bu zanjirda har bir ketma-ketlikli kuchlanishlardan ularga mos toklar yuzaga keladi. Shuning uchun ustma-ustlash prinsipiga asosan dastlabki



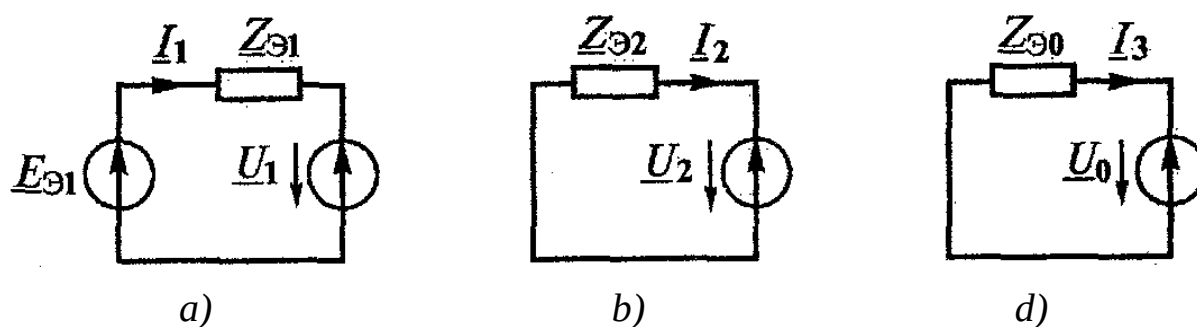
6.40- rasm

zanjirni uchta mustaqil zanjir ko'rinishida ajratish mumkin (6.41-rasm).

Bunda to'g'ri (6.41- rasm, *a*) va teskari (6.41-rasm, *b*) ketma-ketlikli tashkil etuvchilar uchun sxemalar konfiguratsiyasi bir xil. Nol ketma-ketlikli tashkil etuvchi uchun sxema (6.41-rasm, *d*) da neytral sim qarshiligi dastlabki sxema neytral simi qarshiligining uchlanganiga teng to'g'ri ketma-ketlikli sxemani ekvivalent generator usuli yordamida hisoblash mumkin. *ab* qismalarga nisbatan zanjirni E_{E1} va Z_{E1} hamda $E_1 = U_1$ bilan almashtiramiz (6.42- rasm, *a*).



6.41- rasm



6.42- rasm

Kirxgof ikkinchi qonuniga ko'ra

$$\underline{E}_{E1} = \underline{I}_1 \underline{Z}_{E1} + \underline{U}_1, \quad (6.11)$$

bu yerda $\underline{Z}_{E1} = \frac{(\underline{Z}_{G1} + \underline{Z}_{L1}) \underline{Z}'_1}{\underline{Z}_{G1} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}'_2}.$

Teskari ketma-ketlikli sxema uchun shunga o'xshash almashtirishlar bajarib (6.42- rasm, *b*), quyidagi tenglamani hosil qilamiz:

$$0 = \underline{I}_2 \underline{Z}_{E2} + \underline{U}_2, \quad (6.12)$$

bu yerda $\underline{Z}_{E2} = \frac{(\underline{Z}_{G2} + \underline{Z}_{L2}) \underline{Z}_2'}{\underline{Z}_{G2} + \underline{Z}_{L2} + \underline{Z}_2'}$.

Nol ketma-ketlikli sxemani ekvivalent nol ketma-ketlikli qarshilik va kuchlanishi $\underline{U}_0$ bo'lgan EYK bilan almashtiramiz (6.42- rasm, d):

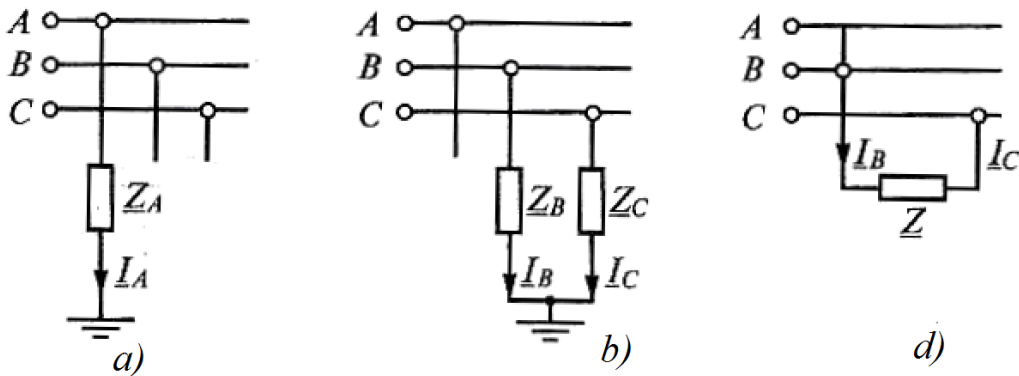
$$0 = \underline{I}_0 \underline{Z}_{E0} + \underline{U}_0, \quad (6.13)$$

bu yerda $\underline{Z}_{E0} = \underline{Z}_{G0} + \underline{Z}_{L0} + 3\underline{Z}_N$.

Dastlabki nosimmetrik rejim uchta simmetrik tashkil etuvchilarga ajratilishi natijasida oltita $(\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0, \underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_0)$ noma'lumli uchta (6.11), (6.12), (6.13) tenglamalar hosil qilindi. Yetishmayotgan uchta tenglamani tuzishda nosimmetriya xususiyatlaridan foydalaniladi. Misol tariqasida 6.43-rasmda keltirilgan nosimmetriyani ko'rib chiqamiz.

A fazadagi qarshilikning o'zgarishi nosimmetrliyani yuzaga keltiradi. Shuning uchun ham $\underline{U}_A = \underline{I}_A \underline{Z}_A$, $\underline{I}_B = 0$, $\underline{I}_C = 0$. Tok va kuchlanishlar o'rniga ularning simmetrik tashkil etuvchilarini qo'yib, yetishmayotgan uchta tenglamani hosil qilamiz:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0) \underline{Z}_A, \\ a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0 &= 0, \quad a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0. \end{aligned} \quad (6.14)$$



6.43- rasm

6.43-rasm, b da keltirilgan sxemada nosimmetriya B va C fazalar qarshiliklari hisobidan yuzaga keladi. Shuning uchun $\underline{I}_A = 0$, $\underline{U}_B = \underline{I}_B \underline{Z}_B$, $\underline{U}_C = \underline{I}_C \underline{Z}_C$. Bu tenglamalardagi tok va kuchlanishlarni ularning simmetrik tashkil etuvchilari bilan almashtirib, yetishmayotgan uchta tenglamani hosil qilamiz:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 &= 0, \\ a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= (a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0) \underline{Z}_B, \\ a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= (a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0) \underline{Z}_C. \end{aligned} \quad (6.15)$$

6.43- rasm, d dagi sxemada nosimmetrik rejim ikki fazali yuklama tufayli yuzaga keladi. Sxema yerlanmagan bo'lib, nol ketma-ketlikli tashkil etuvchi toklar mavjud bo'lmaydi. Shuning uchun ham faqat to'rt $(\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{U}_1, \underline{U}_2)$ noma'lumli ikkita tenglama qoladi. $\underline{I}_A = 0, \underline{U}_B - \underline{U}_C = \underline{I}_B \underline{Z}$ tengliklar asosida yetishmayotgan tenglamalarni tuzamiz:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 + \underline{I}_2 &= 0, \\ a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 - (a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2) &= \underline{Z}(a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2). \end{aligned} \quad (6.16)$$

Shunday qilib, tuzilgan asosiy (6.11), (6.12), (6.13) va (6.14), (6.15), (6.16) qo'shimcha tenglamalarni birgalikda yechib, nosimmetrik yuklama toklarining simmetrik tashkil etuvchilarini hosil qilamiz.

Nosimmetrik yuklamaning haqiqiy toklari quyidagicha topiladi:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0, \quad \underline{I}_B = a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0, \quad \underline{I}_C = a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0.$$

Ushbu toklar asosida to'g'ri, teskari va nol ketma-ketlikli sxema shoxobchalaridagi simmetrik tashkil etuvchilarni hisoblaymiz va ular asosida shoxobchalardagi haqiqiy toklar va zanjir qismlaridagi kuchlanishlar topiladi.

Bo'ylama nosimmetriyaga ega bo'lgan uch fazali zanjirni hisoblash.

Bu turdagi nosimmetriya liniya qarshiliklari har xil yoki liniya simlarida uzilish paydo bo'lgan uch fazali zanjirlarda yuzaga keladi. Misol tariqasida simmetrik EYKlar sistemasidan ta'minlanayotgan hamda nosimmetrik liniya qarshiliklariga va simmetrik yuklamaga ega bo'lgan uch fazali zanjirni hisoblashni ko'rib chiqamiz (6.44- rasm).

Bu zanjirda generator va yuklama (masalan, elektr motori) har birining qarshiliklari bir-biridan farq qiluvchi uchta qarshiliklardan, liniya simlari esa passiv element sifatida bir xil to'g'ri va teskari ketma-ketlikli qarshiliklardan iborat bo'ladi. Xuddi avvalgi masaladagi kabi bu zanjirdagi liniyaning nosimmetrik qismini uchta EYK manbalari sistemasi bilan almashtiramiz.

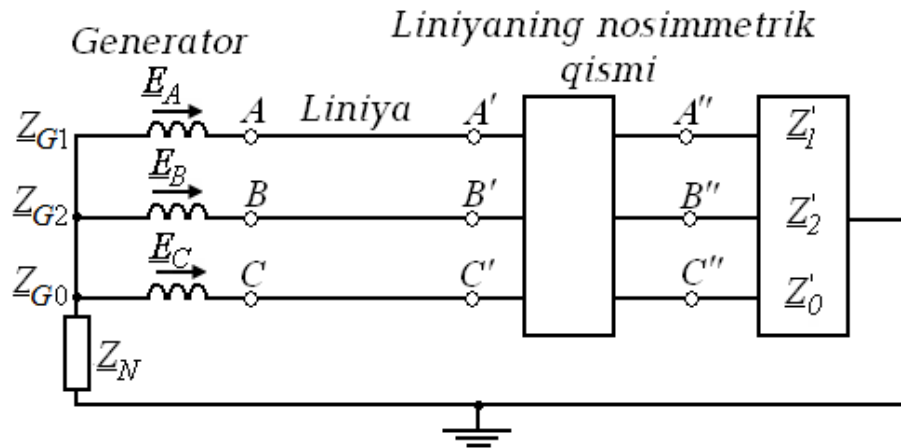
Bu manba kuchlanishlari quyidagicha simmetrik tashkil etuvchilarga ajratiladi:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A'A''} &= \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0, \quad \underline{U}_{B'B''} = a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 + \underline{U}_0, \\ \underline{U}_{C'C''} &= a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2 + \underline{U}_0. \end{aligned} \quad (6.16)$$

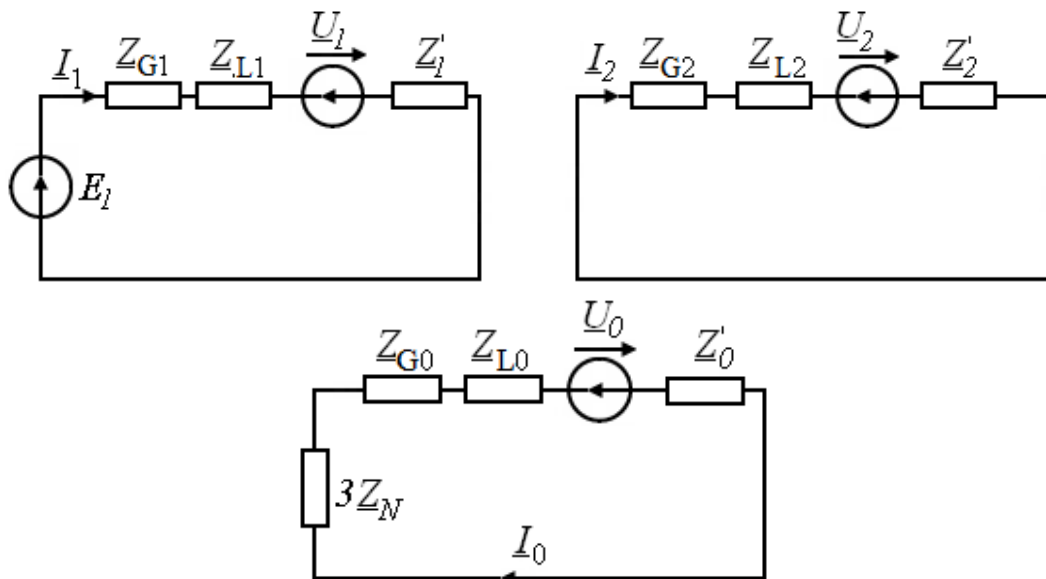
Har bir simmetrik tashkil etuvchi uchun alohida sxema ajratib (6.45- rasm), Kirxgof ikkinchi qonuni asosida tenglamalar tuzamiz:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_1 &= (\underline{Z}_{r1} + \underline{Z}_{j1} + \underline{Z}'_1) + \underline{U}_1 = \underline{E}_1, \\ \underline{I}_2 &= (\underline{Z}_{r2} + \underline{Z}_{j2} + \underline{Z}'_2) + \underline{U}_2 = 0, \\ \underline{I}_0 &= (\underline{Z}_{r0} + \underline{Z}_{j0} + \underline{Z}'_0 + 3\underline{Z}_N) + \underline{U}_0 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.18)$$

Bu tenglamalar sistemasida oltita $\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$, $\underline{I}_0$, $\underline{U}_1$, $\underline{U}_2$, $\underline{U}_0$ noma'lum had bo'lib, sistemani yechish uchun qo'shimcha uchta tenglama tuzish lozim. Bunda sxemadagi nosimmetriya xususiyatlari hisobga olinadi.



6.44- rasm



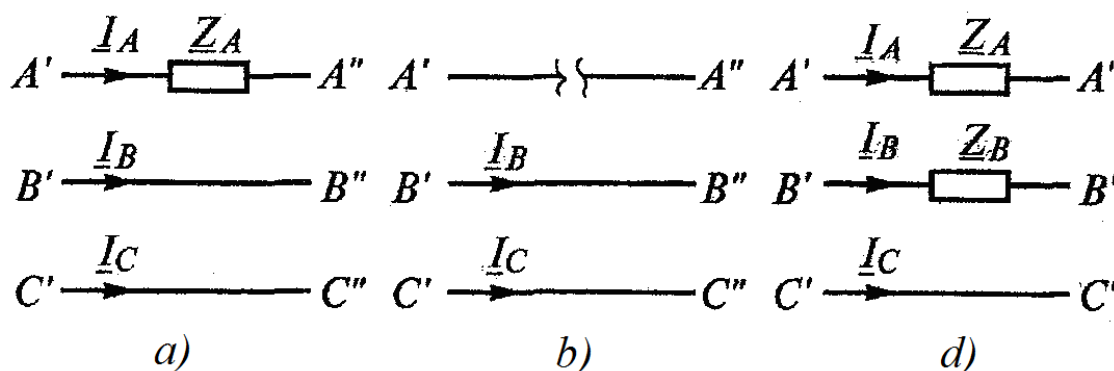
6.45- rasm

Masalan, 6.46-rasm, *a* da keltirilgan sxemada nosimmetriya A faza qarshiligi hisobiga yuzaga keladi. Zanjirning nosimmetriya qismidagi kuchlanishlar quyidagicha aniqlanadi:

$$\underline{U}_{A'A''} = \underline{I}_A \underline{Z}_A, \quad \underline{U}_{B'B''} = 0, \quad \underline{U}_{C'C''} = 0.$$

Bu tenglamalardagi tok va kuchlanishlarni ularning simmetrik tashkil etuvchilari bilan almashtirib, yetishmayotgan qo'shimcha tenglamalarni hosil qilamiz:

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0)\underline{Z}_A, \\ a^2\underline{U}_1 + a\underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= 0, \\ a\underline{U}_1 + a^2\underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= 0.\end{aligned}\quad (6.19)$$



6.46-rasm

6.46- rasm, *b* dagi sxemada nosimmetriya *A* fazadagi uzilish tufayli yuzaga keladi. Bunda $\underline{I}_A = 0$, $\underline{U}_{B'B''} = 0$, $\underline{U}_{C'C''} = 0$ yoki

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0, \quad a^2\underline{U}_1 + a\underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0, \quad a\underline{U}_1 + a^2\underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0. \quad (6.20)$$

6.46- rasm, *v* dagi sxemada nosimmetriya *A* va *B* faza qarshiliklari hisobidan paydo bo'ladi. Bunda $\underline{U}_{A'A''} = \underline{I}_A \underline{Z}_A$, $\underline{U}_{B'B''} = \underline{I}_B \underline{Z}_B$, $\underline{U}_{C'C''} = 0$ Qo'shimcha tenglamalar quyidagi ko'rinishga ega:

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0)\underline{Z}_A, \\ a^2\underline{U}_1 + a\underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= (a^2\underline{I}_1 + a\underline{I}_2 + \underline{I}_0)\underline{Z}_B, \\ a\underline{U}_1 + a^2\underline{U}_2 + \underline{U}_0 &= 0.\end{aligned}\quad (6.21)$$

Hosil qilingan (6.18), (6.19), (6.20) va (6.21) tenglamalar sistemasini birgalikda yechib, tok va kuchlanishlar simmetrik tashkil etuvchilari topiladi. Bu tashkil etuvchilar asosida liniya toklari va zanjir nosimmetrik qismdagi kuchlanishlar topiladi:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0, \quad \underline{I}_B = a^2\underline{I}_1 + a\underline{I}_2 + \underline{I}_0, \\ \underline{I}_C &= a\underline{I}_1 + a^2\underline{I}_2 + \underline{I}_0, \\ \underline{U}_{A'A''} &= \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0, \quad \underline{U}_{B'B''} = a^2\underline{U}_1 + a\underline{U}_2 + \underline{U}_0, \\ \underline{U}_{C'C''} &= a\underline{U}_1 + a^2\underline{U}_2 + \underline{U}_0.\end{aligned}$$

Shunday qilib, simmetrik tashkil etuvchilar usuli uch fazali chiziqli zanjirlarda yuzaga keladigan nosimmetrik rejimlarni hisoblashda ancha qulay va sodda usul bo‘lib, u zanjirlar tahlilini birmuncha yengillashtiradi.

Nazorat savollari

1. Bir fazaliga nisbatan uch fazali toklar sistemasining afzalliklarini sanab o‘ting!
2. Uch fazali zanjirlar ulanish sxemalarini ayting! 3. Liniya va faza kuchlanishlari va toklari orasidagi munosabat qanday? 4. Simmetrik uch fazali zanjir qanday hisoblanadi? 5. Nosimmetrik uch fazali zanjir qanday hisoblanadi? 6. Uch fazali zanjirlarda quvvatni o‘lchash sxemasini chizing va tushuntirib bering! 7. Qanday sharoitda aylanuvchi magnit maydon hosil bo‘ladi, uning amplitudasi nimaga teng va qanday tezlik bilan aylanadi? 8. Simmetrik tashkil etuvchilar usulining mohiyati nima? Zanjirlar bu usulda qanday hisoblanadi? 9. Uch fazali zanjirlarda yuqori garmonikalar xossalarini bayon eting!

7- BOB. CHIZIQLI ELEKTR ZANJIRLARIDA DAVRIY NOSINUSOIDAL TOKLAR

7.1. Umumiy ma'lumotlar

Biz shu vaqtgacha sinusoidal EYK, kuchlanish va tokli chiziqli elektr zanjirlarini o'rgangan edik. Ammo ba'zi hollarda tok va kuchlanishlar davriy o'zgarsa ham shakli sinusoidadan farq qiladi. Buning asosiy sabablaridan biri manba va iste'molchilar VAX sining noxiziqligidir (generatorlarning magnit sistemalari va transformatorlar o'zaklarining to'yinishi, noxiziq volt-amper tavsifga ega bo'lgan iste'molchilar, elektr yoyli qo'ralar, diodlar, to'g'rilagichlar, tranzistorlar, tiristorlar va h.k.).

Davriy signal (tok va kuchlanish)lar qiymatlari vaqt bo'yicha sinusoidadan farqli bo'lsa, bunday signallar nosinusoidal deb ataladi. Nosinusoidal signal shakli, davri va eng katta qiymati bilan aniqlanadi. Demak, davriy nosinusoidal tok va kuchlanishlar deb, vaqt bo'yicha davriy ravishda nosinusoidal qonun bilan o'zgaruvchi tok va kuchlanishlarga aytiladi. Nosinusoidal tok asosan elektr zanjirlarining quyidagi uch xil ishlash rejimlarida yuzaga keladi: a) agar chiziqli zanjir nosinusoidal EYK yoki tok manbayidan ta'minlanayotgan bo'lsa; b) agar EYK yoki tok manbayi sinusoidal bo'lib, zanjirdagi bir yoki bir nechta elementlar VAX lari noxiziq bo'lsa; v) agar noxiziq elementlarga ega bo'lgan zanjir nosinusoidal EYK yoki tok manbayidan ta'minlanayotgan bo'lsa.

7.2. Nosinusoidal tok va kuchlanishlarni Fure trigonometrik qatoriga yoyish

Matematikadan ma'lumki, har qanday davriy nosinusoidal funksiya $f(x)$ uchun davr oralig'ida Dirixle sharti bajarilsa, ya'ni maksimumlar va birinchi darajali uzilishlar soni chegaralangan bo'lsa, uni Fure qatoriga yoyish mumkin. Fure qatori tashkil etuvchilarining yig'indisi $f(t)$ funksiyaning barcha uzluksiz nuqtalari bilan ustma-ust tushadi, uzilish yoki sakrash nuqtalarida esa chap va o'ng chegara nuqtalari qiymatlarining o'rtacha arifmetik qiymatlari o'zaro teng bo'ladi.

Fure teoremasiga ko'ra davriy o'zgaruvchi signallar (EYK, kuchlanish, tok) doimiy va chastotasi asosiy chastotaga nisbatan butun songa farq qiluvchi bir qancha sinusoidal (garmonik) o'zgaruvchi tashkil etuvchilarning yig'indisidan iborat. Demak, nosinusoidal davriy funksiyaning asosiy garmonika deb ataluvchi birinchi garmonikasining chastotasi nosinusoidal funksiyaning davri bilan aniqlanadi, qolgan

garmonik tashkil etuvchilar esa asosiy garmonikadan chastotasi 2, 3, 4 va hokazo marta katta bo'lgan yuqori garmonikalar deb ataladi.

Shunday qilib, davri 2π ga yoki vaqt bo'yicha T ga teng bo'lgan $f(x)$ funksiya Fure qatoriga quyidagicha yoyiladi:

$$f(x) = A_0 + A'_{1m} \sin x + A'_{2m} \sin 2x + A'_{3m} \sin 3x + \dots + A'_{km} \sin kx + \dots + A''_{1m} \cos x + A''_{2m} \cos 2x + A''_{3m} \cos 3x + \dots + A''_{km} \cos kx + \dots$$

bu yerda

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx - \text{qatorning doimiy tashkil etuvchisi,}$$

$$A'_{km} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin kx dx - k - \text{garmonika sinus tashkil etuvchisining}$$

amplitudasi,

$$A''_{km} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos kx dx - k - \text{garmonika kosinus tashkil etuvchisining}$$

amplitudasi.

Bunda

$$f(x) = A_0 + A_{1m} \sin(x + \psi_1) + A_{2m} \sin(2x + \psi_2) + \dots = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{km} \sin(kx + \psi_k),$$

bu yerda $A_{km} = \sqrt{A'^2_{km} + A''^2_{km}}$ - Fure qatori k - garmonikasining amplitudasi.

Agar k - toq son bo'lsa, u holda u toq garmonikalarni, k - juft son bo'lsa, u

juft garmonikalarni belgilaydi. $\psi_k = \arctg \frac{A''_{km}}{A'_{km}}$ k - garmonikaning

boshlang'ich fazasi. ψ_k ni aniqlashda $tg \psi_k$ ning har bir qiymatiga farq qilishini eslatish joiz. Shuning uchun ψ_k ni aniqlashda, $\sin \psi_k$ va $\cos \psi_k$ larni qaysi chorakdaligini belgilashda A'_{km} va A''_{km} lar ishorasiga e'tibor berish kerak bo'ladi.

Nosinusoidal funksiyani Fure qatoriga yoyganda uning koeffitsiyentlarini aniqlashni osonlashtirish yo'llarini tavsiya etish mumkin. Bu tavsiyalar nosinusoidal funksiyalarning simmetriklik xossalariga asoslanadi.

7.3. Davriy egri chiziqlarning simmetriya xususiyatlari

Ma'lumki, sinusoidal funksiyaning bir davri mobaynidagi o'rtacha qiymati nolga teng, ya'ni:

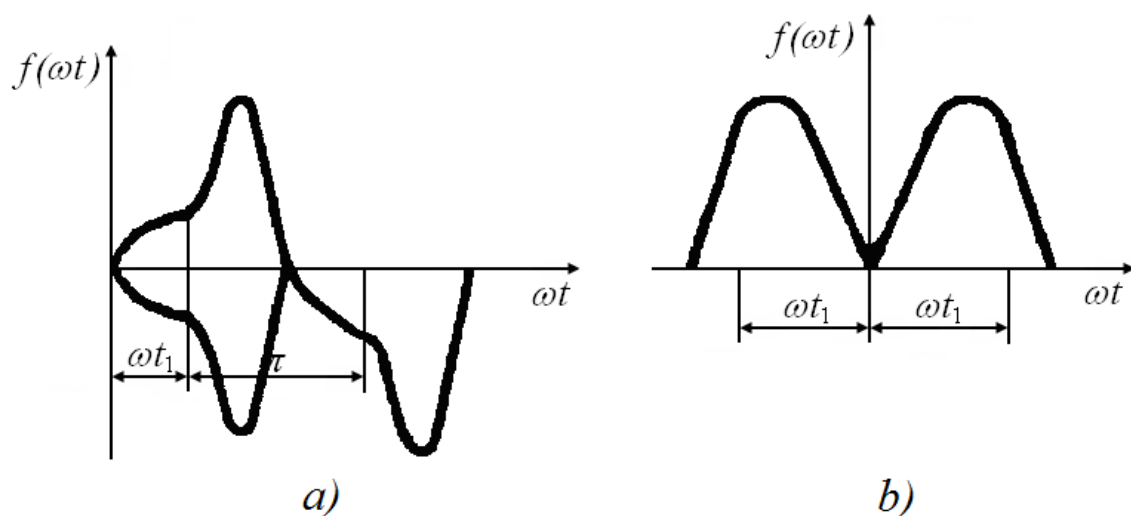
$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin x dx = \frac{1}{2} (\cos 0 - \cos 2\pi) = 0.$$

Demak, davriy nosinusoidal funksiyaning o'zgarmas tashkil etuvchisi bo'lmasa, uning sinus tashkil etuvchilarining bir davr mobaynidagi o'rtacha qiymati har doim nolga teng bo'ladi.

Agar davriy nosinusoidal funksiya doimiy va bir qancha sinus tashkil etuvchilarga yoyilsa, unda uning o'rtacha qiymati doimiy tashkil etuvchisiga teng bo'ladi, ya'ni:

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [A_0 + A_{1m} \sin(x + \psi_1) + A_{2m} \sin(2x + \psi_2) + \dots] dx = A_0.$$

7.1- va 7.2- rasmlarda uchta nosinusoidal egri chiziqlar ko'rsatilgan. Ular maxsus xususiyatlarga ega.



7.1- rasm

Agar 7.1- rasm, *a* da berilgan funksiya yarim davrini x o'qi bo'yicha chapga ko'chirilsa, unda x o'qiga nisbatan simmetrik funksiya ega bo'lamiz, chunki uzoq chiziq bilan chizilgan funksiyaning x o'qiga nisbatan aks tasvirini olsak, u $f(x)$ funksiya bilan ustma-ust tushadi, ya'ni $f(x) = -f(x + \pi)$ shart bajariladi.

Bunday funksiyalar toq va absissa o'qiga nisbatan simmetrik funksiyalar bo'lib, ular Fure qatoriga yoyilsa, unda doimiy tashkil etuvchi A_0 va juft garmonikalar bo'lmaydi, ya'ni: $A_0 = A_{2m}' = A_{2m}'' = A_{4m}' = A_{4m}'' = 0$.

Shu sababdan absissa o'qiga nisbatan simmetrik funksiyalar Fure qatoriga yoyilganda uning tarkibida quyidagi tashkil etuvchilar mavjud bo'ladi:

$$f(x) = A'_{1m} \sin x + A''_{1m} \cos x + A'_{3m} \sin 3x + A''_{3m} \cos 3x + \\ + A'_{5m} \sin 5x + A''_{5m} \cos 5x + \dots$$

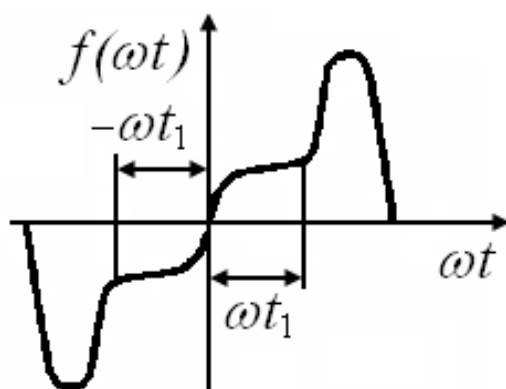
yoki

$$f(x) = A_{1m} \sin(x + \psi_1) + A_{3m} \sin(3x + \psi_3) + A_{5m} \sin(5x + \psi_5) + \dots$$

Absissa o'qiga nisbatan simmetrik nosinusoidal egri chiziqqa sinusoidal kuchlanish manbayiga ulangan ferromagnit o'zakli g'altakdan o'tayotgan tok egri chizig'i misol bo'la oladi.

7-asm, b da keltirilgan davriy egri chiziq esa ordinata o'qiga nisbatan simmetrik bo'lib, unda $f(-x)=f(x)$ shart bajariladi. Agar ordinata o'qidan chapda joylashgan funksiyaning aks tasvirini ordinata o'qiga nisbatan 180° ga siljitilsa, u holda u $f(x)$ funksiyaning o'ng qismiga butunlay ustma-ust tushadi va bunday funksiyalar juft va ordinata o'qiga nisbatan simmetrik funksiya deb ataladi. Bu funksiyalar Fure qatoriga yoyilganda, unda qatorning sinus tashkil etuvchilari bo'lmaydi ($A'_1 = A'_2 = A'_3 = 0$), faqat doimiy va boshlang'ich fazasi nolga teng bo'lgan kosinus tashkil etuvchilari bo'ladi, ya'ni:

$$f(x) = A_0 + A''_{1m} \cos x + A''_{2m} \cos 2x + A''_{3m} \cos 3x + \dots$$



7.2- rasm

7.2- rasmda keltirilgan funksiyada - $f(-x)=f(x)$ shart bajariladi, shu sababdan bunday funksiyalar koordinata boshiga nisbatan simmetrik funksiyalar deyiladi. Bunday funksiyalar toq funksiyalar bo'lib, ular Fure qatoriga yoyilsa, unda doimiy va kosinus tashkil etuvchilari bo'lmaydi, ya'ni:

$$\psi_k = 0; A_0 = 0; A''_{km} = 0; A_{km} = A'_{km}.$$

$$f(x) = A'_{1m} \sin x + A'_{2m} \sin 2x + A'_{3m} \sin 3x + \dots$$

Simmetriya holatlari mavjudligi funksiya Fure qatoriga yoyilganda uning tarkibida qaysi tashkil etuvchilar bo'lishini oldindan bilish imkonini beradi (7.1- jadval).

Elektrotexnikada uchraydigan nosimmetrik davriy egri chiziqlarni quyidagi ikki guruhga bo'lish mumkin:

1) geometrik to'g'ri shaklli davriy egri funksiyalar, masalan trapesiya, uchburchak va to'g'ri burchak shakldagi signallar. Bu funksiyalarni Fure

qatoriga yoyish nisbatan oson bo'lib, ular matematik ma'lumotnomalarda keltirilgan.

2) grafik ko'rinishda berilgan geometrik ixtiyoriy shakldagi funksiyalar. Ularni Fure qatoriga yoyishda grafoanalitik usuldan foydalaniladi.

Simmetriya shartlari va Fure qatori koeffitsiyentlari

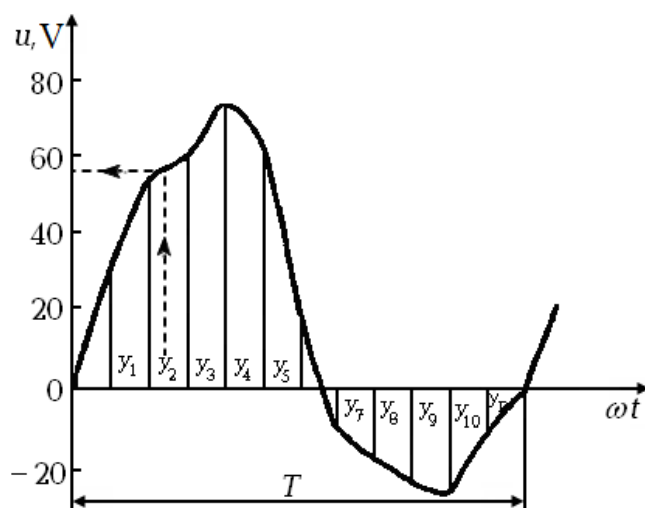
7.1-jadval

№	Simmetriya turi (nisbatan)	Matematik sharti	Koeffitsiyentlari		
			A_0	A'_k	A''_k
1	Ordinata o'qiga (juft funksiya)	$f(x) = f(-x)$	bor	bor	nol
2	Koordinata boshiga (toq funksiya)	$f(x) = -f(-x)$	nol	nol	bor
3	Absissa o'qiga (toq funksiya)	$f(x) = -f(x + \pi)$	nol	faqat toq hadlari bor	faqat toq hadlari bor
4	1 - va 2 - holatlar bir paytda	$f(x) = f(-x),$ $f(x) = -f(x + \pi)$	nol	faqat toq hadlari bor	nol
5	2 - va 3 - holatlar bir paytda	$f(x) = -f(-x),$ $f(x) = -f(x + \pi)$	nol	nol	faqat toq hadlari bor

7.4. Davriy funksiyalarni grafoanalitik usulda trigonometrik qatorlarga yoyish

Fure qatori garmonikalarini grafoanalitik usulda aniqlash, odatda, funksiya grafigi (masalan, tok yoki kuchlanish ossillogrammasi) berilganda qo'llaniladi. Bunda berilgan aniq integrallar cheklangan sonli yig'indilar bilan almashtiriladi. Avval ossillogrammadan nosinusoidal funksiyaning davri (T) ni aniqlaymiz va uni n ta bir xil kesmalarga bo'lamiz (7.3- rasm). $\Delta x = 2\pi/n$, bunda $n=12, 24$ yoki 36 ga teng qilib olinishi maqsadga muvofiq. Bo'linish nuqtalaridan $y_1, y_2, y_3, \dots, y_p$ (bu yerda p - ordinatalar tartib raqami) ordinatalar o'tkazamiz. Ta'rifga asosan doimiy tashkil etuvchi:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \approx \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^{p=n} f_p(x) \Delta x = \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^{p=n} f_p(x) \frac{2\pi}{n},$$



7.3- rasm

etuvchisining amplitudasi:

$$A'_{km} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin kx dx \approx \frac{2}{n} \sum_{p=1}^{p=n} f_p(x) \frac{2\pi}{n} \sin kx \frac{2\pi}{n},$$

yoki

$$A'_{km} = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^{p=n} f_p(x) \sin \left(kp \frac{2\pi}{n} \right).$$

k - garmonika kosinus tashkil etuvchisining amplitudasi:

$$A''_{km} = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^{p=n} f_p(x) \cos \left(kp \frac{2\pi}{n} \right),$$

bu yerda $\sin_p kx$ va $\cos_p kx$ lar $\sin kx$ va $\cos kx$ funksiyalarning $x = (p - 0,5)x$ dagi tegishli qiymatlaridir, ya'ni p - intervalning o'rtasiga to'g'ri keluvchi amplitudalar. Mazkur usul yordamida hisoblashda ko'pincha bir davrni 24 yoki 18 qismlarga bo'linadi, ba'zan boshqa sonlarga ham bo'lish mumkin. Har qanday funktsiyani Fure qatoriga grafoanalitik usulda yoyishda, albatta uning asosiy xususiyatlarini, ya'ni bu funktsiya qaysi o'qqa yoki koordinata boshiga nisbatan simmetrikligini aniqlab olishimiz kerak bo'ladi. Funktsiyada u yoki bu simmetriya xususiyatining bo'lishi bizga oldindan qanday tashkil etuvchilarni aniqlash lozimligini ko'rsatib beradi (7.1- jadval).

Masala. 7.4- rasmda keltirilgan $f(\omega t)$ funktsiyaning birinchi va uchinchi garmonikalari aniqlansin.

$f(\omega t)$ funktsiyaning davrini $n = 24$ teng bo'lakka bo'lamiz, unda uning birinchi yarim davrining ordinatalari quyidagi qiymatlarga ega:

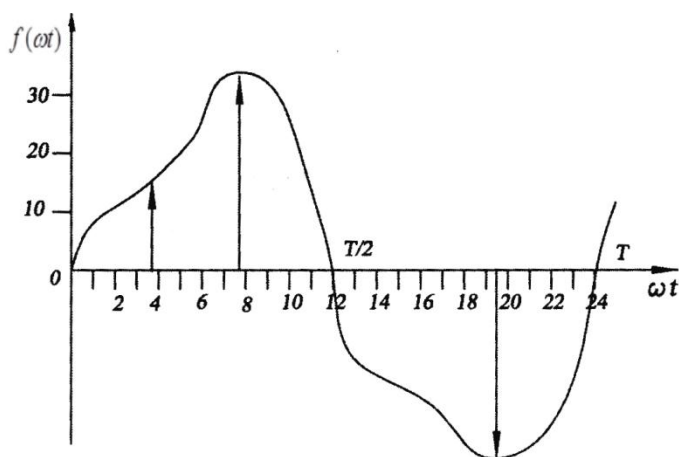
p : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
 $f(\omega t)$: 7; 11; 13,5; 15,4; 17,4; 20,5; 25,4; 32,5; 27,7; 19,2; 10; 5.

yoki $A_0 = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n f_p(x)$, bu yerda

p - har haddagi n sonining indeksi bo'lib, uning qiymati $(n-1)$ gacha o'zgaradi.

$f_p(x)$ berilgan funktsiyaning $x = (p - 0,5)\Delta x$ miqdordagi qiymati, ya'ni p - interval o'rtasiga to'g'ri keladigan qiymat.

k - garmonika sinus tashkil



7.4- rasm

Egri chiziq absissa o'qiga nisbatan simmetrik bo'lganligi uchun Fure qatorining tarkibida uning doimiy tashkil etuvchisi bo'lmaydi, ya'ni $A_0 = 0$ va qator faqat toq garmonikalardan iborat bo'ladi. Sinus va kosinus tashkil etuvchilari birinchi garmonikalarining

amplitudalari mos ravishda quyidagi formulalar bilan aniqlanadi:

$$A'_{1m} = \frac{4}{n} \sum_{p=1}^{n/2} f_p(\omega t) \sin p\omega t,$$

$$A'_{1m} = \frac{4}{24} (7 \cdot \sin 7^0 30' + 11 \cdot \sin 22^0 30' + 13,5 \cdot \sin 37^0 30' + 15,4 \cdot \sin 52^0 30' + \\ + 17,4 \cdot \sin 67^0 30' + 20,5 \cdot \sin 82^0 30' + 25,4 \cdot \sin 97^0 30' + 32,5 \cdot \sin 112^0 30' + \\ + 21,7 \cdot \sin 127^0 30' + 19,2 \cdot \sin 142^0 30' + 10 \sin 157^0 30' + 5 \sin 172^0 30') = 25,3.$$

$$A''_{1m} = \frac{4}{24} \sum_{p=1}^{n/2} f_p(\omega t) \cos p\omega t = -5,23.$$

Birinchi garmonikaning amplitudasi $A_{1m} = \sqrt{(A'_{1m})^2 + (A''_{1m})^2} = 25,83$,
boshlang'ich fazasi esa $\psi_1 = \arctg \frac{A''_{1m}}{A'_{1m}} = -11^0 10'$.

Uchinchi garmonika sinus tashkil etuvchisining amplitudasi:

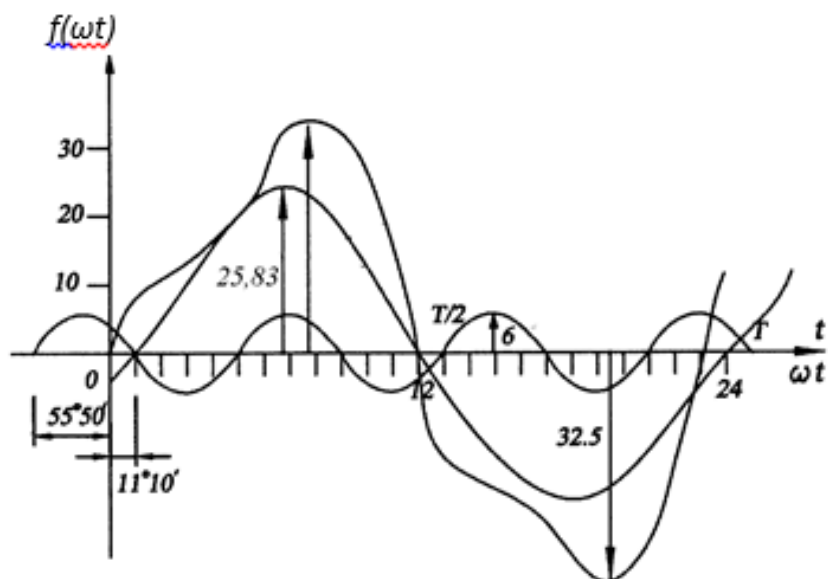
$$A'_{3m} = \frac{4}{24} \sum_{p=1}^{12} f_p(x) \sin_p 3x \approx 3,47.$$

Uchinchi garmonikaning amplitudasi va boshlang'ich fazasi:

$$A_{3m} = \sqrt{(A'_{3m})^2 + (A''_{3m})^2} = 6, \quad \psi_3 = \arctg \frac{A''_{3m}}{A'_{3m}} \approx 55^0 50'.$$

Demak, uchinchi garmonika bilan chegaralangan Fure qatorini quyidagicha yozamiz:

$$f(\omega t) = A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + A_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3) \approx \\ = 25,83 \sin(\omega t - 11^0 10') + 6 \sin(3\omega t + 55^0 50').$$



7.5- rasm

7.5- rasmda birinchi va uchinchi garmonikalarning grafigi va ularning yig'indisidan hosil bo'lgan umumiy nosinusoidal funksiya keltirilgan. Uni berilgan nosinusoidal egri chiziq bilan solishtirish mumkin. Garmonik tashkil etuvchilarni dasturli mikrokalkulyatorlar va shaxsiy kompyuterlarda standart programmalaridan foydalanib tez hisoblash mumkin.

7.5. Nosinusoidal tok va kuchlanishlar maksimal, effektiv (ta'sir etuvchi) va o'rtacha qiymatlari

Davriy o'zgaruvchan nosinusoidal kattalik (tok yoki kuchlanish) $f(\omega t)$ o'zining garmonik tashkil etuvchilaridan tashqari yana quyidagi uchta qiymatlari bilan tavsiflanadi:

1. Bir davr ichidagi eng katta, ya'ni maksimal qiymati A_m .
2. Davrdagi o'rta kvadratik qiymati, ya'ni effektiv (ta'sir etuvchi) qiymati:

$$A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(\omega t) dt}.$$

3. Modulining o'rtacha qiymati:

$$A_{o'r} = \frac{1}{T} \int_0^T |f(\omega t)| dt.$$

Agar $f(\omega t)$ egri chiziqli absissa o'qiga nisbatan simmetrik bo'lib, yarim davr ichida $f(\omega t)$ funksiya bir marta ham o'z ishorasini o'zgartirmasa, u holda modul jihatidan funksiyani o'rtacha qiymati yarim davr uchun hisoblangan o'rtacha qiymatiga teng bo'ladi, ya'ni:

$$A_{o'r} = \frac{1}{T} \int_0^T |f(\omega t)| dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(\omega t) dt.$$

Bu ifodada vaqt hisobining boshlanishida albatta $f(0) = 0$ bo'lishi kerak. Agar davr davomida funksiya o'z ishorasini o'zgartirmasa, u holda uning o'rtacha qiymati shu funksiyani doimiy tashkil etuvchisiga teng bo'ladi.

Faraz qilaylik, tok ifodasi quyidagi qator ko'rinishida berilgan bo'lsin:

$$i = I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k).$$

Ta'rif bo'yicha tok effektiv qiymati quyidagi formula bo'yicha hisoblanadi:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{k=0}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) \right]^2 dt}.$$

Kvadratga oshirishda integralning o'zgaras tashkil etuvchisining kvadrati va alohida sinusoidalar oniy qiymat kvadratlari o'rtacha qiymatini beradigan integrallar qatori bilan ifodalanadi. Bundan tashqari, u turli chastotali sinusoidalar oniy qiymati ikkilangan ko'paytmasining o'rtacha qiymatini ifodalaydigan integrallardan iborat:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=0}^{\infty} \int_0^T I_{km}^2 \sin^2(k\omega t + \psi_k) + \frac{2}{T} \sum_{k=0}^{\infty} \int_0^T I_{km} I_{im} \sin(k\omega t + \psi_k) \sin(i\omega t + \psi_i) dt}.$$

Bu ifodadagi ikkinchi yig'indining har bir integrali nolga teng, chunki har xil chastotali ikkita sinusoida ko'paytmasining o'rtacha qiymati nolga teng. Shuning uchun nosinusoidal tok effektiv qiymati:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=0}^{\infty} \int_0^T I_{km}^2 \sin^2(k\omega t + \psi_k) dt} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}.$$

Binobarin, davriy nosinusoidal tok effektiv qiymati barcha garmonikalar, shu jumladan doimiy tashkil etuvchi effektiv qiymatlari kvadratlari yig'indisidan olingan kvadrat ildizga teng va ular boshlang'ich fazalariga bog'liq emas.

Xuddi shunday ravishda davriy nosinusoidal kuchlanish effektiv qiymati:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}.$$

Masala. Tokning oniy qiymati:

$$i = 100 + 282 \sin \omega t + 141(3\omega t + 30^\circ) + 70,7 \sin(5\omega t - 20^\circ) A.$$

Tokning effektiv qiymati aniqlansin.

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{I_0^2 + \left(\frac{I_{m1}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{m2}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{m5}}{\sqrt{2}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{100^2 + \frac{282^2}{2} + \frac{141^2}{2} + \frac{70,7^2}{2}} = 250 A. \end{aligned}$$

Bir davr uchun tokning o'rtacha qiymati:

$$I_{or} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = \frac{1}{T} \int_0^T (I_0 + i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + \dots) dt.$$

Ma'lumki, sinusoidal tokning bir davrdagi o'rtacha qiymati nolga teng, shuning uchun $I_{or} = I_0$.

Elektron voltmترلarning ko'pchiligi o'lchanayotgan kattalik modulining o'rta qiymatini o'lchaydi:

$$U_{or} = \frac{1}{T} \int_0^T |u| dt = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} |u| dt.$$

Tok va EYK uchun:

$$I_{or} = \frac{1}{T} \int_0^T |i| dt; \quad E_{or} = \frac{1}{T} \int_0^T |e| dt.$$

7.6. Nosingoidal davriy funksiyalar shakllarini tavsiflovchi koeffitsiyentlar

Elektroenergetikada nosingoidal davriy tok va kuchlanishlarni baholashda uchta koeffitsiyentdan foydalaniladi.

1. Shakl koeffitsiyenti - funksiya effektiv qiymatini uning o'rtacha qiymatiga nisbati bilan aniqlanadi:

$$k_{sh} = A / A_{or}, \text{ sinusoidal uchun } k_{sh} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11.$$

2. Amplituda koeffitsiyenti - funksiya maksimal qiymatini uning effektiv qiymatiga nisbati bilan aniqlanadi:

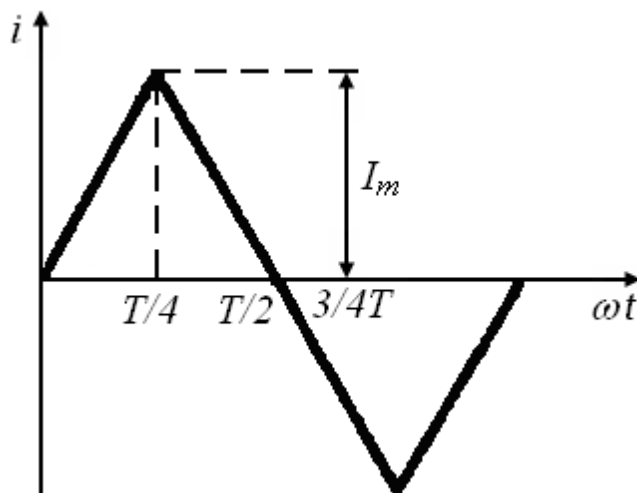
$$k_a = \frac{A_{max}}{A}, \text{ sinusoidal uchun } k_a = \sqrt{2} = 1,41.$$

3. Buzilish ko'effitsiyenti - nosinusoidal funksiya birinchi (asosiy) garmonikasi effektiv qiymatini funksiyaning effektiv qiymatiga nisbati bilan aniqlanadi:

$$k_b = \frac{A_1}{A}, \quad k_b < 1 \text{ sinusoidal uchun } k_b = 1.$$

Masalan, kuchlanish va tok uchun,

$$k_b = \frac{U_1}{\sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}}, \quad k_b = \frac{I_1}{\sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}}.$$



7.6- rasm

Buzilish ko'effitsiyenti 1 dan qancha kam farq qilsa, bu funksiya sinusoidaga shuncha yaqin. Bu ko'effitsiyent sanoat korxonalarida 5% dan oshmasligi kerak.

Masala. Nosinusoidal tok o'zgarish grafigi 7.6- rasmda tasvirlangan. Amplituda va shakl ko'effitsiyenti aniqlansin.

Yechish. Tok egri chizig'i absissa o'qiga

nisbatan simmetrik bo'lganligi sababli uning effektiv va modul bo'yicha o'rtacha qiymatlarini aniqlash uchun funksiyani 0 dan $t = T/4$ oraliqda integrallaymiz. Bu oraliqda tok $i = \frac{4I_m}{T}t$ qonuniyat bilan o'zgaradi va uning effektiv qiymati:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{4}{T} \int_0^{T/4} \left(I_m \frac{4t}{T} \right)^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{3}}.$$

Tok modulining o'rtacha qiymati:

$$I_{or} = \frac{1}{T} \int_0^T |i| dt = \frac{4}{T} \int_0^{T/4} \frac{I_m \cdot t}{T} dt = \frac{I_m}{8}.$$

Shakl ko'effitsiyenti:

$$k_{sh} = \frac{I}{I_{or}} = \frac{I_m \cdot 8}{\sqrt{3} I_m} = 4,62.$$

Amplituda ko'effitsiyenti:

$$k_a = \frac{I_m}{I} = \sqrt{3} = 1,73.$$

7.7. Davriy nosinusoidal tok zanjirlarida quvvatlar

Nosinusoidal tok aktiv quvvati deb, uning birinchi garmonikasi davri mobaynidagi oniy quvvatining o'rtacha qiymatiga aytiladi, ya'ni:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt.$$

Agar nosinusoidal kuchlanish va tok Fure qatorlariga yoyilgan bo'lsa, ya'ni:

$$\begin{aligned} u &= U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \\ &+ U_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3) + \dots \\ i &= I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \psi_1 - \varphi_1) + I_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2 - \varphi_2) + \\ &+ I_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3 - \varphi_3) + \dots, \end{aligned}$$

u holda ular ko'paytmalarini integrallab hamda tok va kuchlanishlar effektiv qiymatlarini hisobga olib, quyidagini hosil qilamiz:

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k,$$

ya'ni *nosinusoidal tok aktiv quvvati doimiy tashkil etuvchi va har bir garmonika aktiv quvvatlarining arifmetik yig'indisiga teng bo'ladi.*

Sinusoidal tok reaktiv quvvatining ta'rifiga o'xshash davriy nosinusoidal tok zanjiridagi reaktiv quvvat tushunchasini kiritishimiz mumkin. U ham har bir garmonika reaktiv quvvatlarining algebraik yig'indisi bilan aniqlanadi:

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k.$$

Nosinusoidal tok zanjirining to'liq quvvati S nosinusoidal kuchlanish va toklar effektiv qiymatlarining ko'paymasiga teng: $S = UI$, bunda:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots}, \quad I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}.$$

Sinusoidal rejimdan farqli ravishda davriy nosinusoidal tok zanjirlarida aktiv va reaktiv quvvatlar kvadratlarining yig'indisi to'liq quvvat kvadratiga teng bo'lmaydi, ya'ni T^2 ga farq qiladi:

$$P^2 + Q^2 = S^2 - T^2.$$

T kattalik buzilish quvvati deb ataladi va kuchlanish va tok egri chiziqlari shakllarining sinusoidadan chetlanish darajasi bilan tavsiflanadi.

Agar zanjir qarshiligi rezistiv bo'lsa, unda kuchlanish va tok egri chiziqlari bir-biriga o'xshash va $Q = 0$, $T = 0$ bo'ladi.

Sinusoidal tok zanjiridagiga o'xshash qilib nosinusoidal tok zanjiri uchun quvvat koeffitsiyenti ifodasini quyidagicha yozish mumkin:

$$\cos \varphi_3 = \frac{P}{UI} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u i dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}},$$

bu yerda φ_3 - nosinusoidal kuchlanish va tok ekvivalent sinusoidalari orasidagi shartli faza siljish burchagi. Ekvivalent sinusoida ta'sir etuvchi qiymati berilgan nosinusoidal funksiya ta'sir etuvchi qiymatiga teng qilib olinadi.

7.8. Davriy nosinusoidal tok chiziqli elektr zanjirlarini hisoblash

Davriy nosinusoidal tok chiziqli zanjirini hisoblash uchun unga ta'sir qiladigan nosinusoidal tok yoki kuchlanish Fure qatoriga yoyilib, ular garmonik tashkil etuvchilarga ajratiladi. Superpozitsiya prinsipiga asosan sxemaning har bir shoxobchasidagi tok oniy qiymati shu shoxobchadagi tok garmonikalari oniy qiymatlarining yig'indisiga teng. Xuddi shunday, zanjirning ayrim qismidagi kuchlanish oniy qiymati shu qismda ta'sir etuvchi kuchlanish garmonikalari oniy qiymatlarining yig'indisiga teng. Shu sababdan, zanjirni hisoblashda unga ta'sir qilayotgan EYK har bir garmonikasidan zanjir shoxobchalarida hosil bo'ladigan toklar aniqlanadi. Bunda ko'pincha bizga ma'lum bo'lgan kompleks usuldan foydalaniladi.

Avvalo, nosinusoidal EYK doimiy tashkil etuvchisi ta'siridan hosil bo'lgan tok va kuchlanishlarni hisoblaymiz. Bunda o'zgarmas tokda induktiv elementdagi kuchlanish pasayishi hamda sig'im elementidagi tok nolga tengligini unutmaslik lozim, ya'ni:

$$\omega_0 = 0; \omega_0 L = 0; U_L = \omega_0 L I_0 = 0; x_C = \frac{1}{\omega_0 C} = \infty; I_0 = \frac{U_C}{x_C} = 0.$$

Bundan keyin birinchi (asosiy) garmonika ta'siridan hosil bo'lgan tok va kuchlanishlarni hisoblaymiz, so'ngra ikkinchi, uchinchi va h.k. garmonikalar ta'siridan hosil bo'lgan tok va kuchlanishlar hisoblanadi. Albatta, hisoblashda induktiv qarshilik chastotaga to'g'ri proporsiyada o'sib borishini e'tiborga olish kerak. Masalan, k - garmonika uchun induktiv qarshilik $x_{L1} = k\omega L = kx_L$, ya'ni birinchi garmonikadagi x_{L1} qarshilikka qaraganda k marta katta bo'ladi.

Sig‘im qarshiligi esa chastota ortishi bilan kamayadi. k - garmonika uchun sig‘im qarshiligi x_{Ck} birinchi garmonikadagi x_{C1} qarshiligidan k marta kichikdir, ya'ni: $x_{Ck} = \frac{1}{k\omega C}$.

Har bir garmonika uchun zanjirdagi tok va kuchlanishlar vektor diagrammasini qurish mumkin. Ammo vektor diagrammada har xil chastotaga taalluqli tok va kuchlanishlarni joylashtirish va ular vektor yig‘indisini olish mumkin emas, chunki vektorlarning burchak aylanish tezligi har xil chastotalar uchun turlicha bo‘ladi.

Agar garmonikalar chastotalari bir-biridan katta farq qilmasa, u holda rezistiv elementda qarshilikni chastotaga bog‘liq emas, deb qarash mumkin. Zanjirni hisoblashda har bir garmonikaga tegishli tok yoki kuchlanishni kompleks son bilan ifodalash, bir xil garmonikali kompleks sonlarni va ularning vektorlarini kompleks tekislikda geometrik qo‘shish mumkin. Masalan, agar davriy nosinusoidal EYK zanjirga ta'sir etsa, u holda bir vaqtning o‘zida zanjirga har xil chastotali bir qator sinusoidal EYK manbalari ta'sir qilmoqda, deb qarash mumkin.

Har bir xususiy sinusoidal rejim uchun zanjirning elektrik muvozanati, ya'ni tugunlar uchun $\sum \underline{I}_k = 0$ va konturlar uchun $\sum \underline{Z}_k \underline{I}_k = \sum \underline{E}_k$ o‘rinli bo‘ladi.

Shuning uchun ham bunday zanjirlarni hisoblashda bizga ma'lum bo‘lgan kontur toklar, tugun potentsiallar, zanjirlarni almashlash va boshqa usullardan foydalanish mumkin bo‘ladi. Shunday qilib, chiziqli zanjirlar nosinusoidal rejimi karrali chastotali qator sinusoidal rejimlar ko‘rinishida alohida-alohida hisoblanadi, natija esa shu garmonikalar oniy qiymatlarining yig‘indisidan iborat bo‘ladi.

R, L, C elementlari ketma-ket ulangan zanjirda k - garmonika toki I_k kompleks shaklda quyidagicha yoziladi:

$$\underline{I}_k = \frac{\underline{U}_k}{R + jk\omega L + \frac{1}{jk\omega C}} = \frac{\underline{U}_k}{R + j\left(k\omega L - \frac{1}{k\omega C}\right)} = \frac{\underline{U}_k}{Z_k} = \frac{\underline{U}_k}{\underline{Z}_k e^{j\varphi_k}},$$

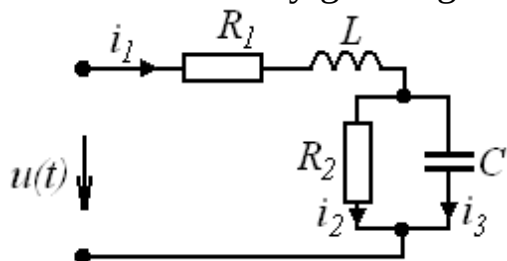
bu yerda

$$Z_k = \sqrt{R^2 + \left(k\omega L - \frac{1}{k\omega C}\right)^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi_k = \frac{k\omega L - \frac{1}{k\omega C}}{R}.$$

Doimiy tashkil etuvchi uchun ($k = 0$) to‘la qarshilik $Z(0) = \infty$, chunki zanjir elementlariga kondensator ketma-ket ulanganligi zanjirni o‘zgaras

tok uchun uzoq ekanligidan dalolat beradi, chunki o'zgaras tokda $Z_C = \infty$.

Masala. Elektr zanjiri $u(t) = 50 + 141\sin(\omega t + 30^\circ) + 70,7\sin(3\omega t - 60^\circ)$ V kuchlanish manbayiga ulangan (7.7- rasm).



7.7- rasm

Zanjir shoxobchalaridagi oniy toklar ifodalarini va ular effektiv qiymatlarini aniqlang.

$$R_1 = 20 \, \Omega; \quad R_2 = 5 \, \Omega;$$

$$\omega L = 3 \, \Omega; \quad \frac{1}{\omega C} = 9 \, \Omega.$$

Yechish. Manba kuchlanishining

doimiy tashkil etuvchisi $U_{(0)} = 50$ V

dan zanjirda hosil bo'lgan toklarni hisoblaymiz:

$$I_{1(0)} = I_{2(0)} = \frac{U_{(0)}}{R_1 + R_2} = \frac{50}{20 + 5} = 2 \, \text{A}, \quad I_{3(0)} = 0.$$

Zanjirni birinchi garmonika uchun hisoblaymiz:

$$u(t) = 141\sin(\omega t + 30^\circ), \, \text{V}, \quad \underline{U}_{(1)} = 100e^{j30^\circ} \, \text{V}.$$

Parallel uchastkaning kompleks qarshiligi:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{23(1)} &= \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_{3(1)}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{3(1)}} = \frac{R_2 \left(-j \frac{1}{\omega C} \right)}{R_2 - j \frac{1}{\omega C}} = \frac{5 \cdot (-j9)}{5 - j9} = 4,37e^{-j29^\circ} = \\ &= 3,83 - j2,12 \, \Omega. \end{aligned}$$

Birinchi garmonika uchun zanjir ekvivalent qarshiligi:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{(1)} &= \underline{Z}_{1(1)} + \underline{Z}_{23(1)} = R_1 + j\omega L + \underline{Z}_{23(1)} = 20 + j3 + 3,83 - j2,12 = \\ &= 23,83 + j0,88 = 23,9e^{j2^\circ} \, \Omega. \end{aligned}$$

Umumiy tok birinchi garmonikasi kompleks effektiv qiymati:

$$\underline{I}_{1(1)} = \frac{\underline{U}_{(1)}}{\underline{Z}_{(1)}} = \frac{100e^{j30^\circ}}{23,9e^{j2^\circ}} = 4,184e^{j28^\circ} \, \text{A}.$$

Parallel uchastkadagi kuchlanish:

$$\underline{U}_{23(1)} = \underline{I}_{1(1)} \underline{Z}_{23(1)} = 4,184e^{j28^\circ} \cdot 4,37e^{-j29^\circ} = 18,28e^{j1^\circ} \, \text{V}.$$

Ikkinchi va uchinchi shoxobchadagi toklar:

$$\underline{I}_{2(1)} = \frac{\underline{U}_{23(1)}}{R_2} = \frac{18,28e^{-j1^\circ}}{5} = 3,66e^{-j1^\circ} \, \text{A},$$

$$\underline{I}_{3(1)} = \frac{\underline{U}_{23(1)}}{-j \frac{1}{\omega C}} = \frac{18,28e^{-j1^0}}{-j9} = 2,03e^{j89^0} \text{ A.}$$

Birinchi garmonika toklarining oniy qiymatlari:

$$i_{1(1)} = 4,184\sqrt{2} \sin(\omega t + 28^0), \text{ A}; \quad i_{2(1)} = 3,66\sqrt{2} \sin(\omega t - 1^0) \text{ A};$$

$$i_{3(1)} = 2,03\sqrt{2} \sin(\omega t + 89^0) \text{ A.}$$

Manba kuchlanishining uchinchi garmonikasidan zanjirda hosil bo'lgan toklarni topamiz. Uchinchi garmonika kuchlanishi:

$$u_{(3)} = 70,7 \sin(3\omega t - 60^0) \text{ V}, \quad \underline{U}_{(3)} = 50e^{-j60^0} \text{ V.}$$

Uchinchi garmonika uchun zanjir ayrim qismlarining kompleks qarshiliklari:

$$\underline{Z}_{23(3)} = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_{3(3)}}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_{3(3)}} = \frac{R_2 \left(-j \frac{1}{3\omega C} \right)}{R_2 - j \frac{1}{3\omega C}} = \frac{5 \cdot (-j3)}{5 - j3} = 2,57e^{-j59^0} =$$

$$= 1,32 - j2,2 \quad \Omega,$$

$$\underline{Z}_{(3)} = R_1 + j3\omega L + \underline{Z}_{23(3)} = 20 + j9 + 1,32 - j2,2 = 21,32 + j6,8 =$$

$$= 22,38e^{j18^0} \quad \Omega.$$

Tok va kuchlanishlar:

$$\underline{I}_{1(3)} = \frac{\underline{U}_{(3)}}{\underline{Z}_{(3)}} = \frac{50e^{-j60^0}}{22,38e^{j18^0}} = 2,23e^{-j78^0} \text{ A},$$

$$\underline{U}_{23(3)} = \underline{I}_{1(3)} \cdot \underline{Z}_{23(3)} = 2,23e^{-j78^0} \cdot 2,57e^{-j59^0} = 5,73e^{-j137^0} \text{ V},$$

$$\underline{I}_{2(3)} = \frac{\underline{U}_{2(3)}}{R_2} = \frac{5,73e^{-j137^0}}{5} = 1,14e^{-j137^0} \text{ A},$$

$$\underline{I}_{3(3)} = \frac{\underline{U}_{23(3)}}{-j \frac{1}{3\omega C}} = \frac{5,73e^{-j137^0}}{-j3} = 1,91e^{-j47^0} \text{ A.}$$

Uchinchi garmonika toklarining oniy qiymatlari:

$$i_{1(3)} = 2,23\sqrt{2} \sin(3\omega t - 78^0) \text{ A},$$

$$i_{2(3)} = 1,14\sqrt{2} \sin(3\omega t - 137^0) \text{ A},$$

$$i_{3(3)} = 1,91\sqrt{2} \sin(3\omega t - 47^0) \text{ A.}$$

Shoxobchadagi oniy toklar:

$$\begin{aligned}
i_1 &= I_{1(0)} + i_{1(1)} + i_{1(3)} = 2 + 4,184\sqrt{2} \sin(\omega t + 28^\circ) + \\
&+ 2,23\sqrt{2} \sin(3\omega t - 78^\circ) \text{ A}, \\
i_2 &= I_{2(0)} + i_{2(1)} + i_{2(3)} = 2 + 3,66\sqrt{2} \sin(\omega t - 1^\circ) + \\
&+ 1,14\sqrt{2} \sin(3\omega t - 137^\circ) \text{ A}, \\
i_3 &= I_{3(0)} + i_{3(1)} + i_{3(3)} = 2,03\sqrt{2} \sin(\omega t + 89^\circ) + \\
&+ 1,91\sqrt{2} \sin(3\omega t - 47^\circ) \text{ A}.
\end{aligned}$$

Toklar effektiv qiymatlari:

$$\begin{aligned}
I_1 &= \sqrt{I_{1(0)}^2 + I_{1(1)}^2 + I_{1(3)}^2} = \sqrt{2^2 + 4,184^2 + 2,23^2} = 5,146 \text{ A}, \\
I_2 &= \sqrt{I_{2(0)}^2 + I_{2(1)}^2 + I_{2(3)}^2} = \sqrt{2^2 + 3,66^2 + 1,146^2} = 4,32 \text{ A}, \\
I_3 &= \sqrt{I_{3(1)}^2 + I_{3(3)}^2} = \sqrt{2,03^2 + 1,91^2} = 2,79 \text{ A}.
\end{aligned}$$

7.9. Nosinusoidal tok va kuchlanishlarni ekvivalent sinusoidalar bilan almashtirish

Nosinusoidal tok va kuchlanishlarni kompleks shaklda yozish va ular uchun vektor diagrammalardan foydalanish mumkin bo'lmaganligi sababli bunday tok va kuchlanishli zanjirlarni hisoblash ancha murakkab bo'ladi.

Tok va kuchlanish shakli bizni qiziqtirmagan hollarda nosinusoidal kuchlanish va toklarni ularga ekvivalent bo'lgan sinusoidalar bilan almashtirish usuli qo'llaniladi. Bu usul ekvivalent sinusoidalar usuli deyiladi.

Kompleks qarshiliklari kuchlanish yoki tokka bog'liq bo'lgan hollarda ham elektr zanjiri muvozanat tenglamalarini kompleks shaklda yozish hamda mos ravishda vektor diagrammalarini qurish imkoniyatini yaratish ekvivalent sinusoidalar usulining mohiyatidir. Ekvivalent tok va kuchlanishni, ya'ni ularni amplituda va boshlang'ich fazalarini tanlash masalaning qo'yililishiga qarab u yoki bu usulda yozilishi mumkin.

Misol uchun doimiy tashkil etuvchisi bo'lmagan nosinusoidal tok va kuchlanishli noxiziq elektr zanjirlar xossalarini o'rganishda ularni ekvivalent sinusoidalar bilan almashtiriladi. Bunda ekvivalent sinusoidal kuchlanish effektiv qiymati berilgan nosinusoidal kuchlanish effektiv qiymatiga tenglashtiriladi.

Ekvivalent kuchlanish va tok sinusoidalari orasidagi φ , burchak siljishi qiymati ekvivalent sinusoidal tok aktiv quvvati nosinusoidal tok aktiv quvvatiga tenglik shartidan aniqlanadi:

$$\cos \varphi_3 = \frac{P}{UI}.$$

Masala. Berilgan nosinusoidal tok va kuchlanish ekvivalent sinusoidalar bilan almashtirilsin va ular orasidagi φ_3 faza siljish burchagi topilsin.

$$U = 25,9 \sin(\omega t - 11^\circ 40') + 6 \sin(3\omega t + 53^\circ 50') \text{ V},$$

$$i = 3 \sin(\omega t - 40^\circ) + 0,9\sqrt{2} \sin(3\omega t + 125^\circ) \text{ A}.$$

Yechish.

$$U_1 = \frac{25,9}{\sqrt{2}} = 18,3 \text{ V}, \quad U_3 = \frac{6}{\sqrt{2}} = 4,26 \text{ V},$$

$$I_1 = \frac{3}{\sqrt{2}} = 2,13 \text{ A}, \quad I_3 = 0,9 \text{ A},$$

$$\varphi_1 = -11^\circ 40' - (-40^\circ) = 28^\circ 20', \quad \varphi_3 = -71^\circ 10'.$$

$$p = 18,3 \cdot 2,13 \cos 28^\circ 20' + 4,26 \cdot 0,9 \cos(-71^\circ 10') = 35,5 \text{ Vt},$$

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_3^2} = \sqrt{18,3^2 + 4,26^2} = 18,55 \text{ V},$$

$$I = \sqrt{2,13^2 + 0,9^2} = 2,31 \text{ A},$$

$$S = UI = 18,55 \cdot 2,31 = 42,8 \text{ VA}.$$

Kuchlanish ekvivalent sinusoidasining effektiv qiymati $U=18,55 \text{ V}$. Tok ekvivalent sinusoidasining effektiv qiymati esa $I=2,31 \text{ A}$.

$$\text{Quvvat koeffitsiyenti } \cos \varphi_3 = \frac{35,5}{18,55 \cdot 2,31} = 0,828.$$

$$\text{Faza siljish burchagi } \varphi_3 = \arccos 0,828 = 34^\circ.$$

7.10. Nosinusoidal tok zanjirlarida rezonans hodisalari

Nosinusoidal kuchlanish va tokli zanjirlarda rezonans hodisasi murakkablashadi, chunki har bir garmonik tashkil etuvchilar uchun alohida rezonans yuzago kelishi mumkin.

Elementlari ketma-ket ulangan tebranish konturi tarkibida uchta garmonika bo'lgan nosinusoidal kuchlanish manbayiga ulangan bo'lsin. Har bir garmonika toki:

$$I_k = \frac{U_k}{\sqrt{R^2 + \left(k\omega L - \frac{1}{k\omega C}\right)^2}}.$$

Induktivlik noldan cheksizgacha o'zgartirilganda, tok har bir tashkil etuvchisi effektiv qiymatini o'zgarishini tahlil etamiz. $L = 0$ da tok doimiy tashkil etuvchisi $I_0 = 0$. Rezonans rejimi uchun esa:

$$L = L_k = \frac{1}{k^2 \omega^2 C}, \quad I_k = \frac{U_k}{R}$$

va $L \rightarrow \infty$ da I_k tok qiymati nolgacha kamayib boradi. Rezonans holatida L induktivliklar qiymati garmonika tartib raqami kvadratiga teskari proporsional bo'ladi.

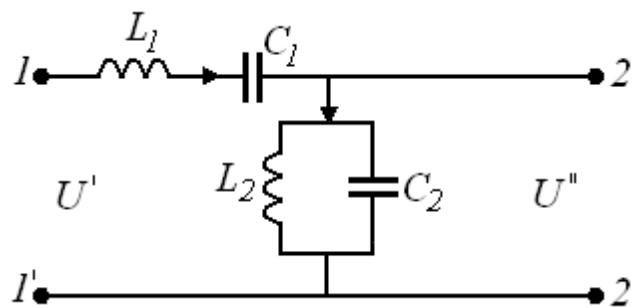
Umumiy tokning effektiv qiymati $I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2}$.

Aktiv qarshilikning nisbatan kichik qiymatlarida rezonans chastotalariga mos induktivlik ayon bo'lgan uchta maksimumga ega.

Manba kuchlanishining shakli o'zgarmagan holda xuddi shunday hodisa sig'im yoki chastota o'zgartirilganida ham kuzatiladi.

Nosinusoidal EYK va tok bo'lgan elektr zanjirlarida rezonans hodisalari kerakli chastotali signallarni ajratish yoki aksincha, nomaqbul chastotali signallarni istisno etish uchun amaliyotda keng qo'llanadi. Misol tariqasida quyidagi masalani ko'rib chiqamiz.

Masala. Ikki yarim davrli to'g'rilagich yordamida ω chastotali sinusoidal tokdan hosil bo'lgan nosinusoidal kuchlanish to'rt qutblik 1-1' qismlariga ulangan (7.8- rasm). $L_1 C_1$ - ketma-ket va $L_2 C_2$ - parallel konturlar ikkinchi garmonika chastotasi 2ω ga rezonansga sozlangan, ya'ni:



7.8- rasm

$$2\omega L_1 = \frac{1}{2\omega C_1} \quad \text{va} \quad 2\omega L_2 = \frac{1}{2\omega C_2}.$$

Agar

$$\omega L_1 = \omega L_2 = 10 \, \Omega, \quad U_m = 1000 \, \text{V}$$

bo'lsa, to'rtqutblik 2-2'

qismlarida paydo bo'ladigan kuchlanish effektiv qiymatini aniqlang.

Yechish. Chiqish kuchlanishida ikkinchi garmonika ajraladi, chunki bu garmonika uchun $L_1 C_1$ - ketma-ket kontur qarshiligi va $L_2 C_2$ - parallel kontur o'tkazuvchanligi nolga teng. Shuning bilan birga boshqa garmonikalar uchun mos qarshiliklar va o'tkazuvchanliklar ma'lum qiymatga ega bo'lib, garmonika tartib raqami oshishi bilan o'sib boradi. 7.8- rasmdan ko'rinib turibdiki, salt yurish rejimida

$$U_k'' = \frac{U_k' Z_2}{(Z_1 + Z_2)},$$

bu yerda $\underline{Z}_1 = j(k\omega L_1 - 1/k\omega C_1)$, $\underline{Z}_2 = \frac{L_2 / C_2}{j(k\omega L_2 - 1/k\omega C_2)}$.

Ushbu darslik ilovasida keltirilganlarga ko'ra to'g'rilagich chiqishidagi u' kuchlanishni quyidagi formula bo'yicha yozish mumkin:

$$u'(\omega t) = \frac{4U_m}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \dots \right).$$

Chiqish u''_1 kuchlanish tarkibida doimiy tashkil etuvchisi bo'lmaydi, ya'ni $U''_{(0)} = 0$, chunki $L_1 C_1$ - ketma-ket konturda kondensator mavjud. Shu bilan birga u'' kuchlanish tarkibida birinchi va yuqori toq garmonikalar ham bo'lmaydi, chunki bu garmonikalar kirish kuchlanishi u' tarkibida ham mavjud emas.

Ikkinchi garmonika uchun $\underline{Z}_{1(2)} = 0$ va $\underline{Z}_{2(2)} = \infty$ bo'lganligi sababli, to'rtqutblik kirish va chiqish qismlaridagi kuchlanish $U''_{(2)} = U'_{(2)m} = 4U_m / 3\pi \approx 425 \text{ V}$ ga teng bo'ladi.

To'rtinchi garmonika uchun:

$$\underline{Z}_{1(4)} = j30 \Omega, \underline{Z}_{2(4)} = -j13 \Omega, U''_{1m(4)} = 4U_m / 15\pi \approx 85 \text{ V}.$$

Shuning uchun

$$U''_{4m} = 85 \cdot (13/17) = 65 \text{ V}.$$

Oltinchi garmonika uchun:

$$\underline{Z}_{1(6)} = j53 \Omega, \underline{Z}_{2(6)} = -j7,5 \Omega, U''_{6m} = 4U_m / 35 = 36 \text{ V}, U''_{6m} = 36 \cdot (7,5/45,5) = 6 \text{ V}.$$

Sakkizinchi va undan yuqori bo'lgan garmonikalarni e'tiborga olmasa ham bo'ladi, chunki ularning maksimal qiymatlari juda kichik. Shunday qilib, to'rtqutblik 2-2' qismlaridagi kuchlanish:

$$U'' = \sqrt{(425^2 + 65^2 + 6^2)} / 2 = 320 \text{ V}.$$

Ikkinchi garmonika effektiv qiymati:

$$U''_{(2)} = 425 / \sqrt{2} = 300 \text{ V}.$$

7.11. Uch fazali elektr zanjirlarida yuqori garmonikalar

Uch fazali zanjirlarda nosinusoidal tok va kuchlanishlar generator va transformatorlar magnitlanish egri chizig'ining noxiziq zonalarida ishlashi tufayli vujudga keladi. Odatda ikkinchi va uchinchi fazadagi kuchlanishlar shakli birinchi fazadagi kuchlanish shaklini to'la qaytaradi.

Masalan, agar A fazadagi U_A kuchlanish qandaydir $U_A = f(t)$ qonuniyat bo'yicha davriy o'zgarsa, unda $U_B = f(t - T/3)$, $U_C = f(t + T/3)$ bo'ladi, T - asosiy chastota davri.

Har uch fazada $f(t)$ funksiyaning k - garmonikasini ko'rib chiqamiz. A fazadagi kuchlanish $U_{Ak} = U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k)$ bo'lsin. $\omega T = 2\pi$ ligini inobatga olib va t ning o'rniga mos ravishda $t - T/3$ va $t + T/3$ ni qo'yib, quyidagini yozish mumkin:

$$U_{Bk} = U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k - 2\pi/3),$$

$$U_{Ck} = U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k + 2\pi/3).$$

Hosil bo'lgan ifodalarni k ning turli qiymatlari uchun solishtirib ko'rilsa, uchga karrali ($k = 3n$) garmonikalar kuchlanishlari har qanday vaqtda bir xil qiymatga va bir xil yo'nalishga ega. $k = 3n + 1$ da esa, uchala faza garmonikalari kuchlanishning simmetrik sistemasini hosil qiladi. Ular ketma-ketligi birinchi garmonika fazalar ketma-ketligi bilan bir xil bo'ladi. $k = 3n + 2$ bo'lganda garmonikalar kuchlanishning teskari ketma-ketlik simmetrik sistemasini hosil qiladi.

Shunday qilib, 1, 4, 7, 10, 13 va hokazo garmonikalar to'g'ri ketma-ketlik simmetrik kuchlanishlar sistemasini, 2, 5, 8, 11, 14 va h.k. garmonikalar teskari ketma-ketlik simmetrik kuchlanishlar sistemasini va nihoyat, 3, 6, 9, 12 va h.k. nol ketma-ketlik kuchlanishlar sistemasini hosil qiladi.

Amaldagi ko'p hollarda kuchlanishlar tarkibida doimiy tashkil etuvchi va juft tashkil etuvchilar bo'lmaydi. Shuning uchun uch fazali zanjirlar turli sxemalaridagi toq garmonikalar tahlili bilan chegaralanamiz.

Agar generator fazalari yulduz usulida ulangan bo'lsa, u holda fazalar kuchlanishlari nosinusoidal bo'lgan holda ikki qo'shni faza kuchlanishlari ayirmasiga teng liniya kuchlanishlari tarkibida tartibi uchga karrali garmonikalar bo'lmaydi, chunki ular nol tartibli ketma-ketlikni hosil qiladi.

Liniya kuchlanishlarida tartibi uchga karrali garmonikalar bo'lmasligi, nosinusoidal kuchlanishlarda liniya kuchlanishining qiymati faza kuchlanishidan $\sqrt{3}$ dan kamroq marta katta bo'lishiga olib keladi, ya'ni:

$$U_F = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + U_7^2 + U_9^2 + \dots}$$

liniya kuchlanishi esa:

$$U_L = \sqrt{3} \sqrt{U_1^2 + U_5^2 + U_7^2 + U_{11}^2 + \dots}.$$

Binobarin, $U_L < \sqrt{3}U_F$ ligi kelib chiqadi.

Simmetrik yuklamada faza toklari tarkibida asosiy chastotali va barcha uchga karrali bo'lgan yuqori garmonikalardan tashqari to'g'ri hamda teskari ketma-ketlik sistemalari mavjud bo'ladi. Natijada faza toklarining yig'indisi nolga teng. Tartibi uchga karrali bo'lgan garmonikalar esa, nol ketma-ketlik sistemasini hosil qiladi, ya'ni har qanday vaqtda bir xil qiymatga va yo'nalishga ega bo'ladi. Shuning uchun neytral simdagi tok nol ketma-ketlik garmonikalarining uchlangan yig'indisiga teng bo'ladi, ya'ni:

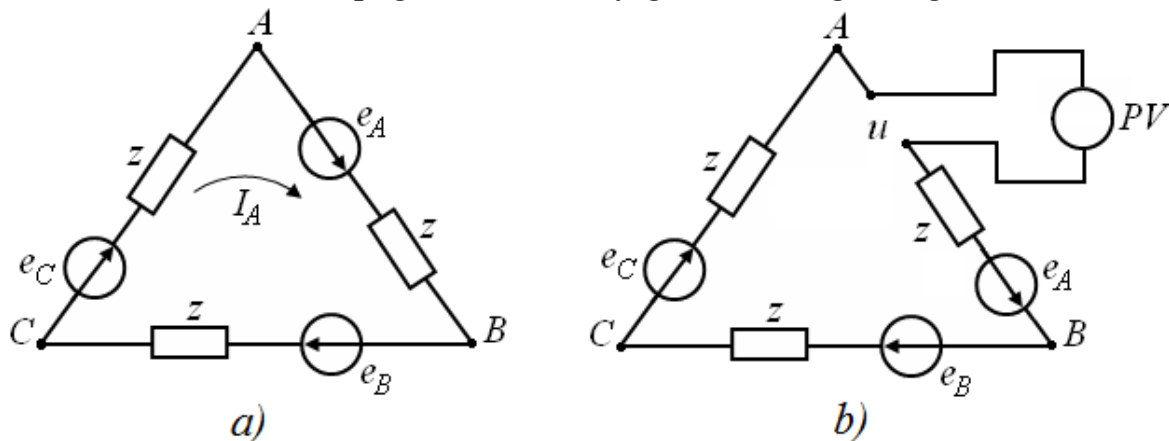
$$I_N = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2}.$$

Neytral sim bo'lmagan holda har bir fazadagi toklar tarkibida tartibi uchga karrali toklar bo'la olmasligi sababli generator va simmetrik yuklamaning neytral nuqtalari orasida garmonikalar tartibi uchga karrali bo'lgan katta kuchlanish paydo bo'ladi.

Agar generator fazalari uchburchak usulida ulansa va fazalardagi EYK nosinusoidal bo'lsa, u holda generator fazalaridan tashkil topgan berk konturidagi EYKlar yig'indisi nolga teng emas, ya'ni generator ochiq uchburchagiga voltmeter ulansa (7.9- rasm), u tartibi uchga karrali bo'lgan EYK garmonikalarini o'lchaydi:

$$U = 3\sqrt{E_3^2 + E_9^2 + E_{15}^2 + \dots}.$$

Bu sxemada boshqa garmonikalar yig'indisi nolga teng bo'ladi.



7.9- rasm

Yuqori garmonikali EYKlarning ochiq uchburchagidan amalda uchlangan chastota(masalan, 150 Hz)li signal olish uchun foydalaniladi. Generator fazalari berk uchburchak sxemasida ulanganda, tartibi uchga karrali garmonikalar EYK lari generatorni qizdiradi. Mazkur tok generator salt ish rejimida ham noldan farqli bo'ladi. Umuman bu holda faza kuchlanishi liniya kuchlanishiga teng:

$$U_F = \sqrt{E_1^2 + E_5^2 + E_7^2 + \dots}.$$

Shuning uchun chulgʻamlari uchburchak usulida ulangan generatorga tashqi tomondan ulangan zanjirda tartibi uchga karrali tok garmonikalari boʻlmaydi. Simmetrik yuklamada generator faza toki:

$$I_F = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots},$$

tashqi zanjirda liniya toki esa

$$I_L = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots} < \sqrt{3}I_F \text{ boʻladi.}$$

Shuni aytish joizki, amalda uchraydigan neytral simi boʻlmagan generator (yoki transformator) va simmetrik yuklama zanjirining liniya simlaridan uchga karrali toklar oʻtmaydi. Lekin neytralning kuchlanish siljishida uchga karrali kuchlanishlar paydo boʻladi:

$$u_N = e_3 + e_9 + e_{15} + e_{21} + \dots,$$

bu kuchlanish ta'sir etuvchi qiymati:

$$U_N = \sqrt{E_3^2 + E_9^2 + E_{15}^2 + \dots}.$$

Neytral simi boʻlgan yulduzcha-yulduzcha ulangan generator va simmetrik yuklama zanjirlarining liniya simlarida barcha ketma-ketliklardagi toklar oʻtadi, neytral simda esa faqat garmonikalari uchga karrali boʻlgan toklar oʻtadi:

$$i_L = i_1 + i_3 + i_5 + i_7 + i_9 + i_{11}; \quad i_N = 3(i_3 + i_9 + i_{15} + \dots).$$

Shu toklar effektiv qiymatlari:

$$I_L = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + \dots}; \quad I_N = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots}.$$

Uch fazali zanjirlardagi yuqori garmonikalar elektr mashinalaridan foydalanish samarasini kamaytiradi va oʻta kuchlanishlar paydo boʻlishiga sababchi boʻladi. Teskari ketma-ketlikdagi toklar hosil qiladigan magnit maydonlari tormozlovchi momentni yuzaga keltiradi va natijada elektr motorlarida qoʻshimcha isroflar paydo boʻladi.

Nazorat savollari

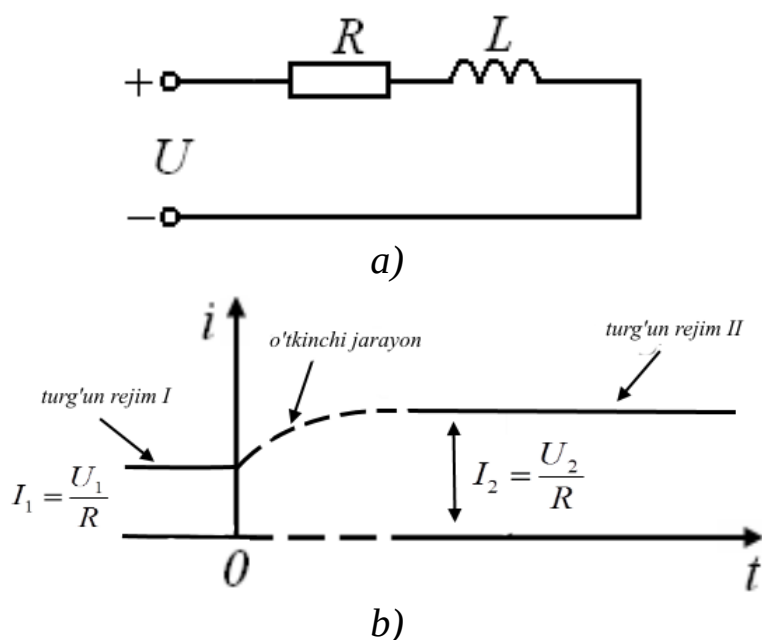
1. Nosinusoidal toklar hosil boʻlishini sabablarini aytib oʻting! 2. Davriy funksiyani Fure qatoriga yoyish formulasini yozing. 3. Simmetrik egri chiziqlarning oʻziga xos xususiyatlari nimalardan iborat? 4. Nosinusoidal tok va kuchlanishli zanjirlar qanday hisoblanadi? 5. Tok egri chizigʻiga induktivlik va sigʻim qanday ta'sir qiladi va u qanday izohlanadi? 6. Nosinusoidal tok zanjirlarida aktiv, reaktiv va toʻla quvvat qanday hisoblanadi? 7. Nosinusoidal tok zanjirida quvvat koeffitsiyenti nima? 8. Nosinusoidal tok zanjirlaridagi rezonans qanday oʻziga xos xususiyatlarga ega? 9. Uch fazali elektr zanjirlaridagi tok va kuchlanishlar tarkibidagi yuqori garmonikalar qanday oʻziga xos xususiyatlarga ega?

8-BOB. CHIZIQLI ELEKTR ZANJIRLARIDA O'TKINCHI JARAYONLAR

8.1. Umumiy ma'lumotlar

Avvalgi boblarda yig'iq parametrlı chiziqli elektr zanjirlarida turg'un, ya'ni kuchlanishi va toki o'zgarmas (o'zgarmas tok zanjirlari) yoki sinusoidal tok va kuchlanishli (sinusoidal tok zanjirlari) jarayonlar o'rganilgan edi.

Aytaylik, o'zgarmas kuchlanish manbayiga ketma-ket rezistor va induktiv g'altak ulangan bo'lsin (8.1- rasm, a).



8.1- rasm

Nazariy jihatdan bunday zanjirda tok cheksiz katta vaqt davomida, amalda esa cheklangan vaqtda turg'un qiymatga ega bo'ladi (8.1- rasm, b). Agar zanjirdagi tok turg'un qiymatga ega bo'lganidan so'ng kuchlanish o'zgartirilsa, u holda tok mos ravishda yana o'zgaradi. Bir turg'un rejimdan boshqa turg'un rejimga o'tish ma'lum vaqt davomida sodir bo'ladi.

Elektr zanjirlarida bir turg'un holatdan ikkinchi turg'un holatga o'tishda paydo bo'ladigan elektromagnit jarayon o'tkinchi jarayon deb ataladi. O'tkinchi jarayon tugashi bilan elektr zanjiri holati oldingi holatidan, masalan, sxemaga ta'sir etuvchi EYK, sxema parametrlarining qiymati, kuchlanish yoki tok amplitudasi, fazasi, shakli yoki chastotasi o'zgarishi bilan farq qiladi. Elektr zanjirlarida o'tkinchi jarayonlar kommutatsiya natijasida sodir bo'ladi. *Kommutatsiya - bu elektr zanjirida ulash (8.2- rasm, a) yoki uzish (8.2- rasm, b) jarayonidir.*

Kommutatsiya oniy ($t = 0$) vaqt davomida sodir bo‘ladi.



8.2- rasm

Fizik jihatdan o‘tkinchi jarayon zanjirning kommutatsiyagacha bo‘lgan energetik holatidan kommutatsiyadan keyingi energetik holatiga o‘tishdir. Agar zanjirda energiya yig‘uvchi elementlar, ya’ni induktiv g‘altak va kondensator bo‘lsa, o‘tkinchi jarayon ma’lum vaqt davom etadi. Zanjirning har bir ishchi holatiga uning elektr va magnit maydonlarida ma’lum energiya zahirasi mos keladi. Zanjirning bir holat(rejim)dan ikkinchi holat(rejim)ga o‘tishi unda to‘plangan energiyalar o‘zgarishi (ortishi yoki kamayishi) ga olib keladi. Zanjir induktiv g‘altagida

to‘plangan magnit maydoni energiyasi $W_L = \frac{Li_L^2}{2}$ va kondensatorda

to‘plangan elektr maydoni energiyasi $W_C = \frac{Cu_C^2}{2}$ o‘z qiymatlarini sakrab

o‘zgartira olmaydi, chunki bunday o‘zgartirish $\left(\frac{dW_L}{dt} \rightarrow \infty, \frac{dW_C}{dt} \rightarrow \infty \right)$

uchun manbadan cheksiz katta quvvat iste’mol qilish talab qilinar edi. Bu esa fizik nuqtai nazaridan mumkin emas. Shuning uchun ham induktiv elementga ega bo‘lgan shoxobcha uzilganida uzilish joyida elektr yoyi hosil bo‘ladi va unda induktiv elementda to‘plangan magnit maydoni energiyasi sarf bo‘ladi. Xuddi shunga o‘xshash zaryadlangan kondensator qismalari o‘zaro qisqa tutashsa, shu joyda elektr yoyi hosil bo‘ladi va unda ham kondensator elektr maydonida to‘plangan energiya sarf bo‘ladi. Amalda o‘tkinchi jarayon vaqti elektrotexnik zanjirlarda soniyalar ulushini tashkil etsa, nazariy jihatdan o‘tkinchi jarayon vaqti $t = \infty$ gacha davom etadi.

Elektr zanjirining kommutatsiya (boshlang‘ich) ondagi rejimi boshlang‘ich holati deyiladi va shu holatga nisbatan o‘tkinchi jarayon odatda analitik yoki ossillografik tahlil etiladi. O‘tkinchi tok, kuchlanish, EYK va h.k. lar kichik harflar bilan, ularning aniq t vaqtdagi qiymatlari esa $i(t)$, $u(t)$, $e(t)$ shaklda ko‘rsatiladi. Tokning kommutatsiyadan bevosita avvalgi qiymati $i(0_-)$, kommutatsiya paytidagi qiymati $i(0)$ va o‘tkinchi

jarayon tamom bo'lishidagi qiymat esa $i(\infty)$ shaklda ko'rsatiladi. Elektr zanjirlaridagi o'tkinchi jarayonlar ma'lum bir foydali maqsadlarda qo'llanishi (masalan, radiotexnika qurilmalari, avtomatik boshqarish tizimlari va boshqa zanjirlarda) yoki zararli oqibatlarga olib kelishi mumkin (masalan, katta induktivlikka ega zanjirlar uzilishida izolyasiya uchun xavfli bo'lgan o'ta kuchlanishlar paydo bo'ladi, kondensatorli zanjirlarda, transformatorlar va elektr mashinalardagi qisqa tutashishda toklar qiymati bir necha barobar sakrashi mumkin). Shunday qilib, o'tkinchi jarayonlar oqibatini tahlil etish muhandislik muammolarini yechishni taqozo etadi.

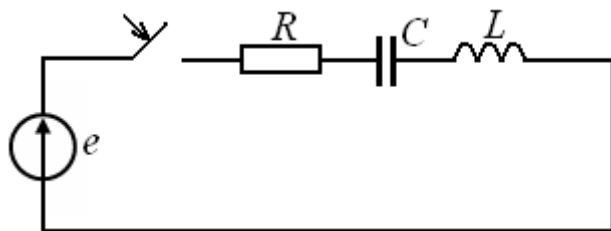
8.2. O'tkinchi jarayon masalasini o'zgarmas koeffitsiyentli chiziqli differensial tenglamalar yechimiga keltirish

8.3- rasmda keltirilgan sxemadagi kalit ulanganda Kirxgof ikkinchi qonuniga asosan kontur uchun muvozanat tenglamasini tuzamiz. Unga ko'ra zanjirga ulangan EYK manbayi ta'sirida o'tadigan tokdan R, L va C elementlarida hosil bo'lgan kuchlanishlar pasayishining yig'indisi shu EYK kattaligiga teng:

$$u_R + u_L + u_C = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = e(t). \quad (8.1)$$

(8.1) tenglamani differensiallasak:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = \frac{de(t)}{dt}. \quad (8.2)$$



8.3- rasm

Matematika kursidan ma'lumki, noma'lum funksiya (i) va uning hosilalari $\left(\frac{di}{dt}\right)$ va $\left(\frac{d^2 i}{dt^2}\right)$ dan tarkib topgan (8.2) tenglama ikkinchi tartibli differensial

tenglamadir. Shunday qilib, tokning vaqt bo'yicha o'zgarishini aniqlash uchun differensial tenglamani yechish, ya'ni uni integrallash kerak bo'ladi.

8.3. Tok va kuchlanishlarning turg'un va erkin tashkil etuvchilari

Ma'lumki, chiziqli differensial tenglamaning umumiy integrali bir jinsli differensial tenglamaning umumiy va bir jinsli bo'lmagan differensial tenglamaning xususiy yechimlari yig'indisidan iborat. Agar (8.2) tenglama

o'ng tomonini nolga tenglasak, u holda bir jinsli ikkinchi tartibli differensial tenglamaga ega bo'lamiz:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0. \quad (8.3)$$

Ma'lumki, (8.3) differensial tenglamaga mos keluvchi xarakteristik tenglama quyidagicha yoziladi:

$$Lp^2 + Rp + \frac{1}{C} = 0. \quad (8.4)$$

Agar (8.4) xarakteristik tenglama ildizlarini t_1 va t_2 deb belgilasak, u holda (5.4) tenglamaning umumiy yechimi quyidagiga teng bo'ladi:

$$i_{erk}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (8.5)$$

bu yerda A_1 va A_2 - integrallash doimiylari bo'lib, ularning qiymatlari boshlang'ich shartlar asosida topiladi.

Elektr zanjirlaridagi o'tkinchi jarayonlarda $i_{erk}(t)$ tok erkin tok deb ataladi va u zanjirni ta'minlovchi manbaga bog'liq bo'lmay, faqat zanjir parametrlari bilan tavsiflanadi.

(8.2) tenglamaning xususiy yechimi elektr zanjirining turg'un rejimini xarakterlaydi va u uni ta'minlab turuvchi manba parametrlariga bog'liq bo'ladi. Turg'un rejimni hisoblash oldingi boblarda keltirilgan o'zgarma va sinusoidal tok zanjirlarini hisoblash usullari yordamida olib boriladi.

Zanjirdagi o'tkinchi tok turg'un va erkin toklar yig'indisiga teng bo'ladi, ya'ni:

$$i(t) = i_T(t) + i_{erk}(t). \quad (8.6)$$

O'tkinchi tok amalda zanjirdan yoki uning shoxobchasidan o'tkinchi jarayon mobaynida o'tayotgan haqiqiy tokdir. Uni o'lchab va ossillografda yozib olish mumkin. Xuddi shunday o'tkinchi kuchlanish ham zanjir ikki nuqtasi (yoki tuguni) orasidagi o'tkinchi jarayon vaqtidagi kuchlanish bo'lib, uni ham o'lchab yoki yozib olish mumkin. O'tkinchi jarayonlarni o'rganishda tok va kuchlanishlarni turg'un va erkin tashkil etuvchilarga ajratib yozish esa matematik ifodalashda yordamchi vazifani bajaradi hamda hisoblashni osonlashtiradi.

8.4. Kommutatsiya qonunlari va boshlang'ich shartlar

Yuqorida bayon etilgan elektr yoki magnit maydonining energiyasi o'z qiymatini sakrab o'zgartira olmasligi to'g'risidagi mulohazalar induktivlikdagi ilashish oqimining va sig'imdagi elektr zaryadning uzluksizlik prinsipini ifodalaydi va kommutatsiya qonunlari deb ataladi.

Ilashish magnit oqimining sakrab o'zgara olmasligi $u_L = \frac{d\psi}{dt} = \infty$ tenglik bajarilmasligidan kelib chiqadi, chunki aks holda induktivlikda cheksiz katta kuchlanish paydo bo'lishi lozim edi, bu esa fizik ma'noga ega emas. Bu prinsip asosida kommutatsiyaning birinchi qonuni quyidagicha ta'riflanadi:

Tarkibida induktiv g'altak bo'lgan har qanday shoxobchada tok va magnit oqimi kommutatsiya paytida undan bevosita oldingi qiymatlarini saqlaydi va kommutatsiyadan keyin ana shu qiymatlaridan boshlab o'zgaradi yoki boshqacha aytganda induktivlikdagi tok va magnit oqimi o'z qiymatini sakrab o'zgartira olmaydi. Bu qonun matematik jihatdan quyidagicha yoziladi:

$$i_L(0_-) = i_L(0), \quad \Phi(0_-) = \Phi(0) \quad (8.7)$$

bu yerda $i_L(0_-)$, $i_L(0)$, $\Phi(0_-)$, $\Phi(0)$ - mos ravishda induktivlikdagi tok va magnit oqimining kommutatsiyadan oldingi va kommutatsiya paytidagi qiymatlari.

Xuddi shu kabi elektr zaryadining sakrab o'zgara olmasligi $i_C = \frac{dq}{dt} = \infty$ tenglik bajarilmasligidan kelib chiqadi, chunki aks holda kondensatordan cheksiz katta tok o'tishi lozim edi, bu esa fizik ma'noga ega emas. Bu prinsipdan kommutatsiyaning quyidagi ikkinchi qonuni kelib chiqadi:

Kondensatorli har qanday shoxobchada kuchlanish va zaryad kommutatsiya paytida undan bevosita oldingi qiymatlarini saqlaydi va kommutatsiyadan keyin ana shu qiymatlaridan boshlab o'zgaradi yoki boshqacha aytganda sig'imdagi kuchlanish va zaryad kommutatsiya paytida o'z qiymatini sakrab o'zgartira olmaydi.

$$u_C(0_-) = u_C(0), \quad q(0_-) = q(0), \quad (8.8)$$

bu yerda $u_C(0_-)$, $u_C(0)$, $q(0_-)$, $q(0)$ - kondensatordagi kuchlanish va zaryadning mos ravishda kommutatsiyadan avvalgi va kommutatsiya paytidagi qiymatlari. Shuning bilan birga qayd etib o'tish lozimki, ideal parametrli zanjirlarda qarshilik va sig'imdagi toklar, qarshilik va induktivlikdagi kuchlanishlar qiymatlari sakrab o'zgarishi mumkin.

Kattalik (i , u , e , B , Φ va h.k.) lar va ular hosilalarining kommutatsiya ($t=0$) paytidagi qiymatlari ularning boshlang'ich qiymatlari yoki boshlang'ich shartlari deb ataladi.

Agar bevosita kommutatsiyadan (o'tkinchi jarayon boshlanishidan) avval $i_L(0_-) = 0$ va $u_C(0_-) = 0$ (nol boshlang'ich shartlar) bo'lsa, u holda

kommutatsiyadan keyingi boshlang'ich paytda induktivlik uzoq shoxobchaga, sig'im esa qisqa tutashgan shoxobchaga teng kuchli bo'ladi. Agar kommutatsiyadan avval $i_L(0_-) \neq 0$ va $u_C(0_-) \neq 0$ (nol bo'lmagan boshlang'ich shartlar) bo'lsa, u holda $t=0$ paytda induktivlik $i_L(0)$ tok manbayiga, sig'im esa $u_C(0)$ EYK manbayiga teng kuchli bo'ladi.

Bog'liq bo'lmagan boshlang'ich shartlar kommutatsiya momentiga qadar zanjirda to'plangan elektr va magnit maydonlari energiyalarini xarakterlaydi va o'tkinchi jarayonlarni hisoblash uchun ularni albatta inobatga olish lozim bo'ladi.

Shoxobchalangan elektr zanjirlaridagi o'tkinchi jarayonlarni hisoblashda bog'liq bo'lmagan boshlang'ich shartlardan tashqari bog'liq boshlang'ich shartlardan foydalaniladi. Bu shartlarga tok, kuchlanish va ular hosilalarining $t=0$ paytdagi qiymatlari kiradi.

8.5. O'tkinchi jarayonlarni hisoblash usullarining xususiyatlari

Elektr zanjirlardagi o'tkinchi jarayonlarni hisoblash uchun klassik, operator, chastotaviy va Dyumel integrali usullaridan foydalaniladi.

Klassik usulning mohiyati - tok va kuchlanishlar oniy qiymatlari uchun Kirxgof birinchi va ikkinchi qonunlari asosida tuzilgan differensial tenglamalarni yechishdan iborat. Masalani yechish xarakteristik tenglamalar ildizlarini, o'tkinchi jarayon erkin va turg'un tashkil etuvchilarini, integrallash doimiylarini va nihoyat o'tkinchi tok va kuchlanishlarni aniqlashdan iborat. Klassik usulning o'ziga xos xususiyati shundan iboratki, yechimda real vaqtdagi real kattaliklardan foydalaniladi. Hisoblash natijalari odatda grafiklar bilan tasvirlanadi, lekin bu hisoblashlar murakkab va ko'p vaqt talab qilganligi sababli ko'pincha hisoblash texnikasi qo'llashni talab etadi.

Operator usulida original deb nomlanadigan vaqtning real funksiyasi uning kompleks tekislikdagi tasviri bilan almashtiriladi. Bunday almashtirish Laplasning to'g'ri o'zgartirish funksiyasi yordamida matematik yo'l bilan bajariladi. Bunda tasvir vaqt funksiyasi emas, kompleks o'zgaruvchi funksiya bo'ladi. Uni grafik usulda tasvirlab bo'lmaydi. Lekin klassik usulga nisbatan bo'lgan bu kamchilik vaqt bo'yicha differensiallash va integrallash operatsiyalarini ko'paytirish va bo'lish kabi algebraik operatsiyalar bilan almashtirish afzalligi bilan kompensatsiyalanadi. Algebraik tenglamalar sistemasini yechish natijasida izlanayotgan funksiyaning tasviri topiladi va uning originaliga o'tiladi. Bu usulda integrallash doimiylarini alohida hisoblab topishga ehtiyoj

qolmaydi. Ushbu afzalliklari sababli operator usuli muhandislik amaliyotida keng qo'llanadi.

Chastotaviy usul operator usulga juda o'xshash. Farqi shundaki, taqribiy hisoblashlarda zanjirning kirish qarshiliklari yoki o'tkazuvchanliklarining eksperimental xarakteristikalaridan foydalanish mumkin. Bu usul chiziqli avtomatik rostdash sistemalarining analizi va sintezida, xususan, sistemadagi o'tkinchi jarayonlar sifatini baholashda keng foydalaniladi.

Dyuamel integrali usuli passiv ikkiqutblikning kirish qismiga berilayotgan kuchlanish vaqtga nisbatan murakkab qonun bilan o'zgarayotganda qo'llaniladi.

Bundan tashqari, o'tkinchi jarayonlarni hisoblash uchun o'zgaruvchan holat usuli, avtomatikada keng qo'llanadigan trapesiya ko'rinishidagi chastotaviy xarakteristika usuli va boshqa usullar mavjud.

8.6. O'tkinchi jarayonlarni hisoblashning klassik usuli

Klassik usul chiziqli elektr zanjirlaridagi o'tkinchi jarayonlarni hisoblashga oid bo'lib, unda quyidagi amallar ketma-ket bajariladi:

1) Kirxgof qonunlari asosida tok va kuchlanishlar uchun differensial tenglamalar tuziladi;

2) hosil bo'lgan tenglamalardan izlanayotgan kattaliklarni aniqlash uchun o'zgarmas koeffitsiyentli bir jinsli bo'lmagan differensial tenglama hosil qilinadi. Bu tenglamaning umumiy yechimi turg'un rejimni belgilaydigan bir jinsli bo'lmagan tenglamaning xususiy yechimi i_T yoki u_T va erkin rejimni belgilaydigan bir jinsli tenglamaning umumiy yechimi i_{erk} yoki u_{erk} yig'indisidan iborat:

$$i = i_T + i_{erk}; \quad u = u_T + u_{erk}.$$

3) turg'un tashkil etuvchilar elektr zanjirining kommutatsiyadan keyingi rejimidan aniqlanadi;

4) erkin tashkil etuvchi xarakteristik tenglamaning ildizlari ko'rinishidan aniqlanadi. Jarayonning erkin tashkil etuvchisi uchun umumiy yechim:

$$i_{erk} = A_k e^{p_k t},$$

bunda A_k - integrallash doimiysi.

Agar xarakteristik tenglama ikkita haqiqiy va har xil ildizga ega bo'lsa, unda:

$$i_{erk} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

Agar xarakteristik tenglama haqiqiy va bir xil ildizlarga ega bo'lsa, u holda yechim:

$$i_{erk} = e^{pt}(A_1 + A_2 t).$$

Xarakteristik tenglama qo'shma kompleksli $p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_0$ ildizga ega bo'lsa, unda:

$$i_{erk} = Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi),$$

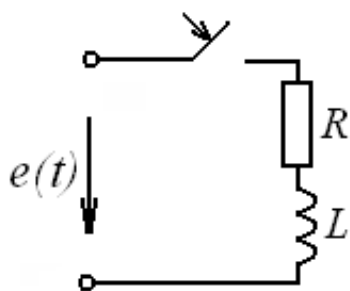
bunda α - konturning so'nish koeffitsiyenti; ω_0 - erkin tebranishlarning burchak chastotasi.

5) integrallash doimiylari boshlang'ich shartlardan foydalanib aniqlanadi. Bunda induktiv g'altakli shoxobchadagi tokning boshlang'ich qiymati kommutatsiyaning birinchi qonuni, kondensatordagi kuchlanishning boshlang'ich qiymati esa kommutatsiyaning ikkinchi qonuni asosida aniqlanadi. Induktiv g'altagi bo'lmagan boshqa shoxobchalardagi toklar va kondensatori bo'lmagan boshqa shoxobchalardagi kuchlanish boshlang'ich qiymatlari Kirxgof qonunlari asosida aniqlanadi;

6) o'tkinchi tok yoki kuchlanish turg'un va erkin tashkil etuvchilarning yig'indisi ko'rinishida aniqlanadi;

7) topilgan o'tkinchi tok yoki kuchlanish ifodalarining to'g'riligi o'tkinchi jarayon parametrlari boshlang'ich va turg'un qiymatlarini hisoblab tekshiriladi.

8.7. R, L zanjirida o'tkinchi jarayonlar



8.4- rasm

Aktiv qarshilik (R) va induktiv (L) elementlari ketma-ket ulangan zanjir $t = 0$ paytda $e(t)$ EYK manbayiga ulanayotgan bo'lsin (8.4 - rasm).

$t \geq 0$ payt uchun zanjir muvozanatini tavsiflovchi differensial tenglama quyidagicha yoziladi:

$$e = Ri + L \frac{di}{dt}. \quad (8.9)$$

(8.9) ga mos xarakteristik tenglama $R + pL = 0$ ko'rinishda, uning ildizi esa $p = -\frac{R}{L}$ ga teng bo'ladi.

Zanjirdagi erkin tok:

$$i_{erk} = Ae^{pt} = Ae^{-\frac{R}{L}t}. \quad (8.10)$$

Zanjirdagi o'tkinchi tok turg'un va erkin toklarning yig'indisidan iborat bo'ladi, ya'ni:

$$i = i_T + i_{erk} = i_T + Ae^{-\frac{R}{L}t}. \quad (8.11)$$

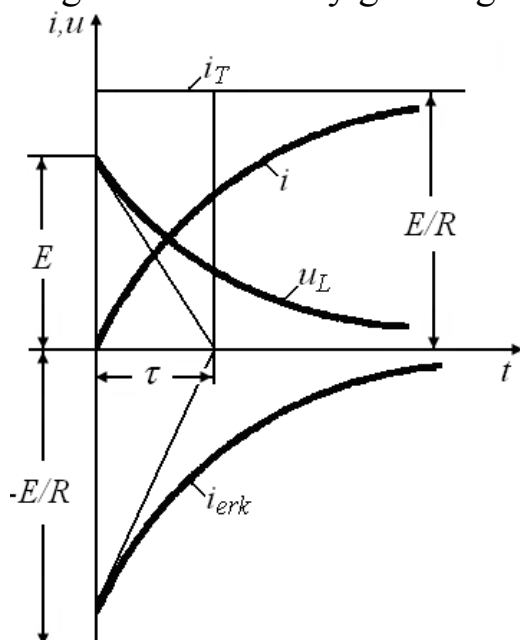
O'tkinchi tokning turg'un tashkil etuvchisi $e(t)$ EYK ning o'zgarish qonuniyatiga bog'liq bo'ladi. Uchta holatni ko'rib chiqamiz:

1. R, L zanjirning o'zgarmas EYK manbayiga ulanishi.

2. R, L zanjirda qisqa tutashuv.

3. R, L zanjirning sinusoidal EYK manbayiga ulanishi.

1. R, L zanjirning o'zgarmas EYK manbayiga ulanishi. R, L zanjir o'zgarmas E manbayiga ulanganida turg'un tok



8.5- rasm

$i_T = \frac{E}{R}$ ga teng bo'ladi. Unda (8.11) ifoda quyidagiga teng bo'ladi:

$$i = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t}. \quad (8.12)$$

Integrallash doimiysi A boshlang'ich shartdan, ya'ni kommutatsiyaning birinchi qonuni yordamida topiladi: $i(0_-) = i(0) = 0$.

(8.12) tenglamadan $t=0$ payt uchun, $0 = \frac{E}{R} + A$ yoki $A = -\frac{E}{R}$.

O'tkinchi tok

$$i = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t}) = I(1 - e^{-\frac{R}{L}t}).$$

Bu yerda $I = \frac{E}{R}$ - turg'un tok bo'lib, o'tkinchi jarayon davomida (nazariy jihatdan $0 \leq t < \infty$) zanjirdagi tok shu qiymatga erishishga harakat qiladi.

Zanjirdagi boshqa kattaliklarni aniqlaymiz.

R qarshilikdagi o'tkinchi kuchlanish: $u_R = Ri = E(1 - e^{-\frac{R}{L}t})$.

L induktivlikdagi kuchlanish: $u_L = -e_L = L \frac{di}{dt} = Ee^{-\frac{R}{L}t}$.

8.5- rasmda zanjirdagi o'tkinchi tok va kuchlanishlar diagrammalari keltirilgan. Matematik analiz kursidan ma'lumki, $y = f(x)$ funksiya grafigiga o'tkazilgan urinma $\left| \frac{y}{y'} \right|$ ga teng. Ko'rilayotgan holat uchun

$$\left| \frac{u_L}{u_L'} \right| = \left| \frac{i_{erk}}{i_{erk}'} \right| = \tau. \quad (8.13)$$

$\tau = \frac{L}{R}$ kattalik vaqt doimiysi deb ataladi. U soniyalarda o'lchanadi:

$$\left[\frac{L}{R} \right] = \frac{H}{\Omega} = \frac{\Omega \cdot s}{\Omega} = s.$$

Vaqt doimiysi shunday vaqt oralig'iga tengki, bu vaqt mobaynida tok erkin tashkil etuvchisi $e = 2,718$ marta kamayadi va o'zgarmas EYK manbayiga ulangan zanjirdagi tok turg'un qiymatining 63,2% iga erishadi. Grafikdan τ qiymati i_{erk} yoki u_L egri chizig'iga urinma o'tkazib aniqlanadi. 8.5- rasmdagi tok va kuchlanish egri chiziqlaridan ko'rinib turibdiki, i_{erk} tok o'tkinchi jarayon vaqti ($0 \leq t < \infty$) mobaynida $I = -\frac{E}{R} \cdot$ qiymatdan nolgacha eksponensial qonun bilan kamayadi. Zanjirdagi o'tkinchi tok i esa bu vaqt mobaynida kommutatsiyaning birinchi qonuniga binoan sakrab o'zgarmasdan, balki noldan o'zining turg'un qiymati E/R gacha eksponensial qonun bilan ortib boradi. Induktivlikdagi kuchlanish u_L kommutatsiya payti ($t=0$) da o'z qiymatini sakrab E ga o'zgartiradi, ya'ni manba EYK to'laligicha induktivlikda pasayadi va keyin eksponensial qonun bilan nolgacha kamayib boradi. i va u_L egri chiziqlarining o'zgarishidan ko'rinib turibdiki, zanjirda o'tkinchi jarayon nazariy jihatdan cheksiz davom etsa-da, ammo amalda u $t = (4 \div 5)\tau$ vaqtda tugaydi.

2. *R, L zanjirda qisqa tutashuv.* O'zgarmas yoki sinusoidal EYK manbayiga ulangan R, L zanjir $t=0$ paytda qisqa tutashgan holatni ko'rib chiqamiz (8.6- rasm, a). Bunday rejimlar transformatorlar, uzatish liniyalarida va boshqa elektrotexnik qurilmalarda ko'p uchraydi. Bu holatda induktivlikda to'plangan magnit maydoni hisobiga undagi tok sakrab o'zgara olmaydi: elektromagnit inersiya prinsipi (Lens qonuni)ga ko'ra magnit maydonining kamayishi hisobiga hosil bo'ladigan o'zinduksiya EYKi zanjirdagi tokning kamayishiga to'sqinlik qiladi.

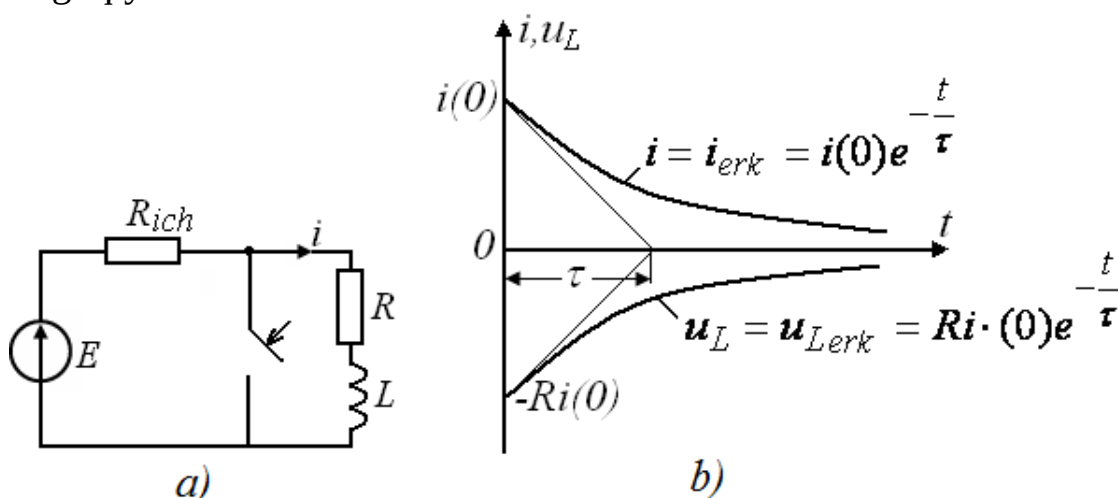
Qisqa tutashgan konturdagi jarayon erkin rejim bo'lib, bu holatda undagi turg'un tok nolga teng, ya'ni $i_T = 0$. (8.11) tenglamaga $i_T = 0$ ni qo'yib, erkin tashkil etuvchisi uchun quyidagini hosil qilamiz:

$$i = Ae^{-\frac{R}{L}t}.$$

Integrallash doimiysi A boshlang'ich shart $i(0_-) = i(0)$ dan topiladi. Undan $A = i(0_-)$. Buni hisobga olib:

$$i(t) = i(0_-)e^{-\frac{t}{\tau}},$$

bu yerda $i(0_-)$ - induktivlikdagi tokning bevosita kommutatsiyadan avvalgi qiymati.



8.6- rasm

8.6- rasm, b da o'tkinchi jarayon mobaynida tok va kuchlanish egri chiziqlari keltirilgan. Induktivlikdagi kuchlanish:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = -Ri(0)e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Qisqa tutashgan zanjirda o'tkinchi jarayon nazariy jihatdan $t = \infty$ da tugaydi. Bu vaqt oralig'i mobaynida induktivlik magnit maydonida to'plangan energiya qarshilik R da issiqlikka aylanadi:

$$W = \int_0^{\infty} Ri^2 dt = R[i(0)]^2 \int_0^{\infty} e^{-2\frac{t}{\tau}} dt = \frac{L[i(0)]^2}{2}.$$

Bu energiya kommutatsiyaga qadar induktivlikda to'plangan magnit maydoni energiyasiga teng.

3. R, L zanjirning sinusoidal EYK manbayiga ulanishi. RL elementli zanjir (8.4- rasm) sinusoidal EYK $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$ manbayiga ulansa, berk zanjirdan o'tadigan turg'un tok quyidagicha aniqlanadi:

$$i_T = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi).$$

Shu tokning mos ravishda amplituda qiymati hamda tok va EYK o'rtasidagi faza siljish burchagi:

$$I_m = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad \varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}.$$

(8.11) tenglamaga ko'ra o'tkinchi jarayondagi tok:

$$i(t) = i_T + i_{erk} = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) + A e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Integrallash doimiysi quyidagi bog'liq bo'lmagan boshlang'ich shartdan topiladi: $t=0$ da $i(0_-) = i(0) = 0$ bo'lganligi uchun $0 = I_m \sin(\omega \cdot 0 + \psi - \varphi) + A$ bo'ladi. Demak, $A = -I_m \sin(\psi - \varphi)$.

$$\text{O'tkinchi tok esa: } i(t) = I_m \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \right].$$

8.7 - rasmda i_T, i_{erk} va i larning vaqt bo'yicha o'zgarish grafigi keltirilgan.

Turg'un va erkin toklar boshlang'ich ordinatalari $i_T(0)$, $i_{erk}(0)$ bir-biriga teng va ishoralari o'zaro teskari bo'lganligi uchun o'tkinchi tok $i(t)$ ni $t=0$ dagi qiymati nolga teng. Erkin tok $i_{erk}(t)$ esa vaqt bo'yicha eksponensial kamayib boradi. $t=\tau$ vaqtda tok $i_{erk}(t)$ $i_{erk}(0)$ ga nisbatan $e = 2,718$ marta kamayadi: RL zanjirda vaqt doimiysi kontur aslligi Q ga to'g'ri proporsional, ω burchak chastotasiga esa teskari proporsional, ya'ni:

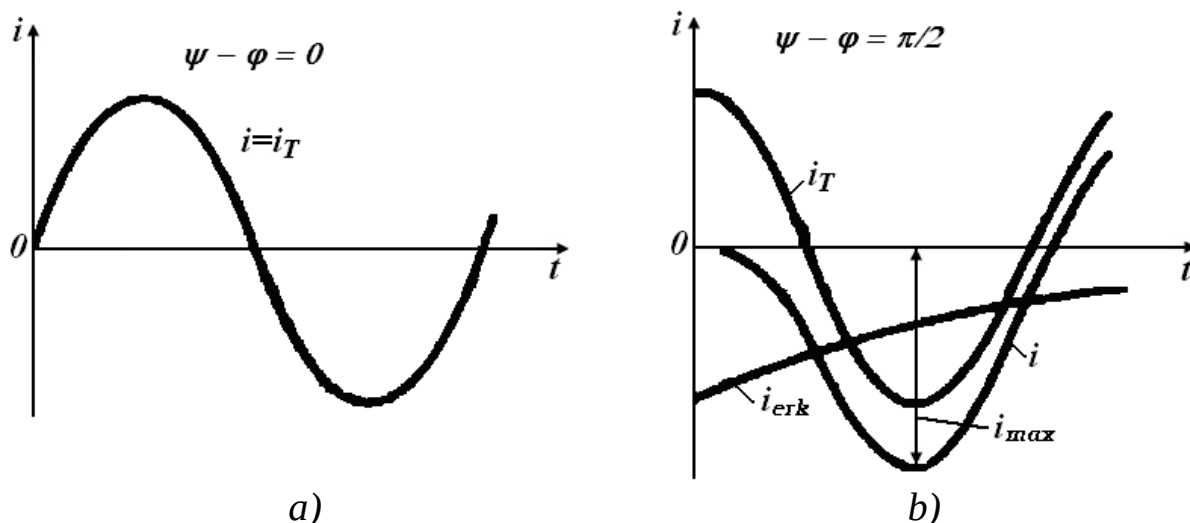
$$\tau = \frac{\omega L}{\omega R} = \frac{Q}{\omega}.$$

Agar $t=0$ da o'tkinchi tok $i(t)$ noldan o'tsa va shu vaqtda kommutatsiya sodir etilsa, ya'ni kalit ulansa, $\psi = \varphi$ yoki $\psi = \varphi \pm \pi$ sharti bajariladi. Bu holatda erkin tok yuzaga kelmaydi va zanjirda o'tkinchi jarayonsiz faqat turg'un tok hosil bo'ladi (8.7- rasm, a):

$$i_{erk}(\tau) = \frac{i(0)}{2,718}.$$

Agar kalit $\psi - \varphi = \pm \frac{\pi}{2}$ bo'lganida ulansa, u holda erkin tokning boshlang'ich qiymati maksimal bo'lib, o'tkinchi tok yarim davrga teng vaqt o'tganida ekstremal qiymatga ega bo'ladi (8.7- rasm, a). Agar vaqt

doimiysi juda katta ($\tau = \frac{L}{R} \rightarrow \infty$) bo'lsa, u holda zanjirning muvozanat tenglamasidagi iR qiymati ta'sirini e'tiborga olmasa ham bo'ladi.



8.7- rasm

Haqiqatdan, $e = iR + L \frac{di}{dt} \approx L \frac{di}{dt}$ bo'lganligi uchun:

$$i = \frac{1}{L} \int_0^t e dt \text{ va } u_R = Ri \approx \frac{R}{L} \int_0^t e dt .$$

Demak, RL zanjirning vaqt doimiysi juda katta bo'lganda uni integrallovchi zveno, deb qarash mumkin.

Agar τ juda kichik bo'lsa, u holda $L \frac{di}{dt}$ ham juda kichik va $e \approx Ri$, $u_L \approx L \frac{di}{dt} = \frac{L}{R} \frac{de}{dt}$. Bu holda RL zanjirni differensiallovchi zveno, deb qarash mumkin. Bu zanjirlar integrallovchi va differensiyallovcchi zvenolar ko'rinishida avtomatik rostdash sistemalarining tarkibiy elementlari sifatida qo'llaniladi. Quyida RL zanjirning sinusoidal EYK manbayiga ulanishini bir misolda ko'rib chiqamiz.

Masala: Parametrlari $R=100 \Omega$ va $L=1\text{H}$ bo'lgan zanjir sinusoidal kuchlanish ($U=220\text{ V}$, $f=50\text{ Hz}$) manbayiga ulangan (8.4- rasm). Kuchlanishning boshlang'ich fazalari $\psi_1=0$ va $\psi_2=72^\circ 20'$ bo'lgan onda ulangan ikki holat (rejim) uchun o'tkinchi tok ifodalarini toping.

Yechish: Turg'un tok amplituda qiymati ifodasini kompleks usulda aniqlaymiz:

$$\underline{I}_m = \frac{\underline{U}_m}{\underline{Z}} = \frac{220\sqrt{2}}{100 + j314 \cdot 1} = 0,94e^{-72^\circ 20'}.$$

Uning oniy qiymati:

$$i_T = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) = 0,94 \sin(\omega t + \psi - 72^\circ 20') \text{ A}.$$

Ulanishning birinchi rejimi uchun ($\psi_1 = 0$):

$$i_{T1} = 0,94 \sin(\omega t - 72^\circ 20') \text{ A}$$

va ikkinchi rejim uchun ($\psi_2 = 72^\circ 30'$)

$$i_{T2} = 0,94 \sin \omega t \text{ A}.$$

Tokning erkin tashkil etuvchisi quyidagicha aniqlanadi:

$$i_{erk} = Ae^{\frac{t}{\tau}}.$$

Integrallash doimiysi A ni kommutatsiyaning birinchi qonunidan aniqlaymiz:

$$i(0) = 0 = i_T + i_{erk} = I_m \sin(0 + \psi - \varphi) + Ae^{\frac{0}{\tau}} = I_m \sin(\psi - \varphi) + A,$$

binobarin $A = -I_m \sin(\psi - \varphi)$, $i_{erk} = -I_m \sin(\psi - \varphi)e^{\frac{t}{\tau}}$, bunda

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ s}.$$

Mos ravishda ikkala rejim uchun:

$$i_{erk1} = -0,94 \sin(-72^\circ 20')e^{-100t} = 0,896e^{-100t},$$

$$i_{erk2} = -0,94 \sin 0^\circ e^{-100t} = 0.$$

Demak, ko'rilayotgan ikki holat uchun o'tkinchi toklar quyidagiga teng:

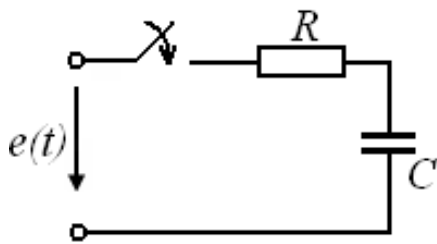
$$i_1 = 0,94 \sin(\omega t - 72^\circ 20') + 0,86e^{-100t},$$

$$i_2 = 0,94 \sin \omega t.$$

Ikkinchi rejimda erkin tok yo'qligi zanjirda o'tkinchi jarayon bo'lmasligini ko'rsatadi va o'tkinchi tok faqat turg'un tokdan iborat bo'ladi.

8.8. R, C zanjirida o'tkinchi jarayonlar

8.8- rasmda R, C elementlari o'zaro ketma-ket ulangan zanjirni $t = 0$ da $e(t)$ EYK manbayiga ulash sxemasi keltirilgan. $t \geq 0$ vaqt uchun zanjirning muvozanat tenglamasini Kirxgof ikkinchi qonuni asosida tuzamiz: $Ri + u_C = e$,



8.8- rasm

bu yerda u_C - sig'imdagi kuchlanish bo'lib, izlanayotgan kattalik hisoblanadi.

$i = C \frac{du_C}{dt}$ ekanligini hisobga olsak, yuqoridagi tenglama quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = e.$$

Uning xarakteristik tenglamasi $1 + RCp = 0$, ildizi esa $p = -\frac{1}{RC}$ bo'ladi.

Sig'imdagi kuchlanish erkin tashkil etuvchisi:

$$u_{Cerk} = Ae^{pt} = Ae^{-\frac{t}{RC}} = Ae^{-\frac{t}{\tau}},$$

bu yerda $\tau = RC$ - vaqt doimiysi, $\left[\Omega \cdot F = \Omega \cdot \frac{A}{V} \cdot s = s \right]$.

Sig'imdagi o'tkinchi kuchlanish turg'un va erkin tashkil etuvchilarning yig'indisidan iborat:

$$u_C = u_{CT} + u_{Cerk} = u_{CT} + Ae^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (8.14)$$

O'z navbatida konturdagi tok

$$i = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{du_{CT}}{dt} - \frac{A}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (8.15)$$

Amaliyotda ko'p uchraydigan quyidagi uchta holatni ko'rib chiqamiz:

1. R, C zanjirning o'zgaras EYK manbayiga ulanishi.

2. R, C zanjirda qisqa tutashuv.

3. R, C zanjirning sinusoidal EYK manbayiga ulanishi.

1. R, C zanjirning o'zgaras EYK manbayiga ulanishi. R, C elementlari o'zaro ketma-ket ulangan zanjir E o'zgaras EYK manbayiga $t=0$ da ulanayotgan paytda sig'imda $u_C(0_-) = U$ kuchlanish mavjud bo'lgan bo'lsin. Sig'imdagi turg'un kuchlanish E ga teng, shuning uchun (8.14) tenglama quyidagicha yoziladi:

$$u_C = E + Ae^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (8.16)$$

Integrallash doimiysini topish uchun kommutatsiyaning ikkinchi qonunidan foydalanamiz:

$$u_C(0_-) = u_C(0) = E + A \text{ yoki } U = E + A, \text{ bundan } A = U - E.$$

Kondensatordagi o'tkinchi kuchlanish:

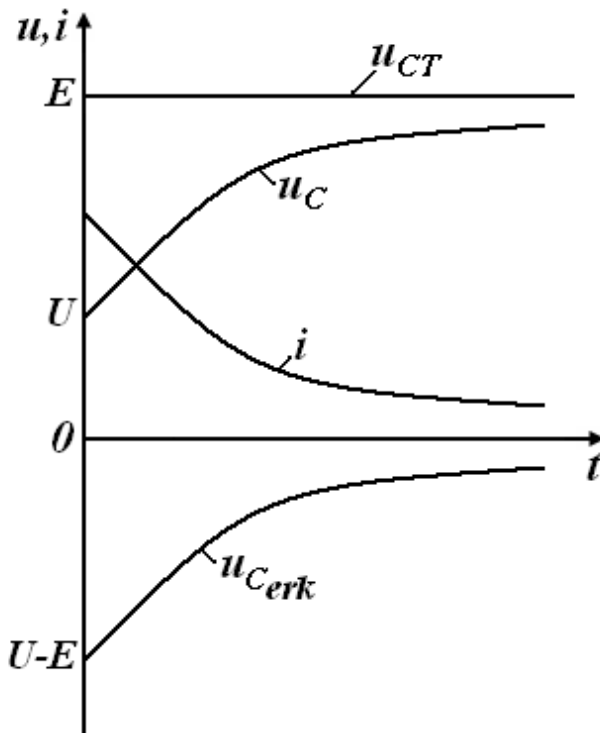
$$u_C = E + (U - E)e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (8.17)$$

(8.15) tenglamaga ko'ra konturdagi o'tkinchi tok:

$$i_C = \frac{E - U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

R qarshilikdagi kuchlanish esa:

$$u_R = Ri = (E - U)e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (8.18)$$



8.9- rasm

Kommutatsiyadan keyin vaqt o'tishi bilan sig'imdagi kuchlanish $u_C(0_-) = U$ boshlang'ich qiymatdan turg'un E qiymatgacha ortib boradi, R qarshilikda esa kuchlanish $t = 0$ da noldan $(E - U)$ qiymatga sakrab o'zgarib, vaqt o'tishi bilan nol qiymatgacha kamayib boradi. Konturdagi tok $t = 0$ da noldan $\left(\frac{E - U}{R}\right)$ qiymatga sakrab o'zgarib, $t \rightarrow \infty$ da nolgacha kamayadi (8.9- rasm).

O'tkinchi tok va kuchlanishlar egri chiziqlarining tahlili shuni ko'rsatdiki, vaqt

doimiysi τ qancha katta bo'lsa, o'tkinchi jarayon shuncha sekin o'tadi. Vaqt doimiysi τ ni grafik usulda o'tkinchi jarayon (tok, kuchlanish) grafigining istalgan nuqtasiga urinma o'tkazish yo'li bilan hisoblab topish mumkin. R, C zanjiridagi o'tkinchi jarayon nazariy jihatdan cheksiz vaqt davom etsa-da, amalda u $t = (4 \div 5)\tau$ vaqtda deyarli tugaydi, masalan $t = 4\tau$ da $u_C(t) = 0,98u_T$ ga teng bo'ladi.

2. R, C zanjirda qisqa tutashuv. R, C zanjirda qisqa tutashuv rejimida (8.10- rasm, a) $t = 0$ da konturda EYK manbayining ta'siri nolga teng bo'ladi. (8.14) tenglamada $u_{CT} = 0$ bo'lganligi sababli u quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$u_C = Ae^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Kommutatsiyaning ikkinchi qonunidan $u_C(0_-) = E = A$ ni hosil qilamiz. U holda sig‘imdagi o‘tkinchi kuchlanish:

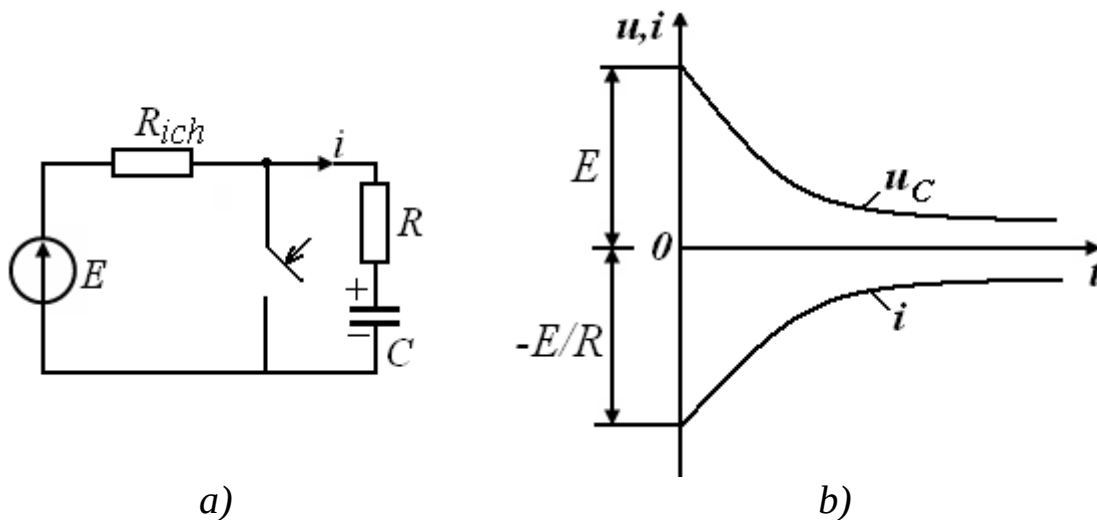
$$u_C = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}).$$

R , C konturdagi tok esa:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} = -I e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

R qarshilikdagi kuchlanish:

$$u_R = Ri_C = -E e^{-\frac{t}{\tau}}.$$



8.10- rasm

Bu rejimda kondensator razryadlanishi natijasida hosil bo‘lgan va kommutatsiyaga qadar tok yo‘nalishiga qarama-qarshi yo‘nalishda o‘tkinchi tok o‘tadi. Shuning uchun ham o‘tkinchi tok ifodasida "-" ishora olingan.

Sig‘imdagi kuchlanishdan farqli ravishda R, C konturdagi tok kommutatsiya payti ($t = 0$) da o‘z qiymatini sakrab o‘zgartiradi (8.10- rasm, b).

Kommutatsiyaga qadar sig‘im elementida to‘plangan elektr maydoni energiyasi o‘tkinchi jarayon mobaynida aktiv qarshilik R da to‘liq issiqlik energiyasiga aylanadi:

$$\int_0^{\infty} Ri^2 dt = \frac{E^2}{R} \int_0^{\infty} e^{-\frac{2t}{\tau}} dt = \frac{CE^2}{2}.$$

3. R , C zanjirning sinusoidal EYK manbayiga ulanishi. R , C zanjir sinusoidal EYK $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$ manbayiga $t = 0$ vaqtda ulanganida (8.8-rasm) kondensatordagi kuchlanish $u_C(t)$ ni aniqlaymiz. Matematik

nuqtayi nazardan bu kuchlanish ikkita tashkil etuvchilar yig'indisi ($u_{CT} + u_{Cerk}$) dan iborat. Ulardan u_{CT} zanjir turg'un rejimiga taalluqli bo'lib, uni o'zgaruvchan tok zanjirini hisoblashning kompleks usulidan foydalanib topamiz.

u_{Cerk} - kuchlanishning erkin tashkil etuvchisi xarakteristik tenglama ildiziga ko'ra $u_{Cerk} = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$ ko'rinishda bo'lib, vaqt o'tishi bilan u nolga intiladi. Zanjirdagi turg'un tok: $i_T = \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi)$ ga teng.

bu yerda $Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$ - zanjirning to'la qarshiligi, $\varphi = \arctg\left(\frac{-1}{\omega CR}\right)$ - zanjirda o'tkinchi jarayon tugagandan keyingi kuchlanish bilan tok orasidagi faza siljish burchagi. Kondensatordagi turg'un kuchlanish:

$$u_{CT} = \frac{E_m}{Z\omega C} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right),$$

chunki u tokdan $\pi/2$ burchakka orqada qoladi. Shunday qilib, o'tkinchi u_C kuchlanish vaqt bo'yicha quyidagi qonun bilan o'zgaradi:

$$u_C(t) = \frac{E_m}{Z\omega C} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) + Ae^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Integrallash doimiysi A ni aniqlash uchun boshlang'ich shartlardan foydalanamiz:

$$u_C(0) = 0 = \frac{E_m}{Z\omega C} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) + A \text{ ifodadan}$$

$$A = -\frac{E_m}{Z\omega C} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right).$$

Shularga ko'ra, kuchlanish $u_C(t)$ uchun quyidagi tenglamaga ega bo'lamiz:

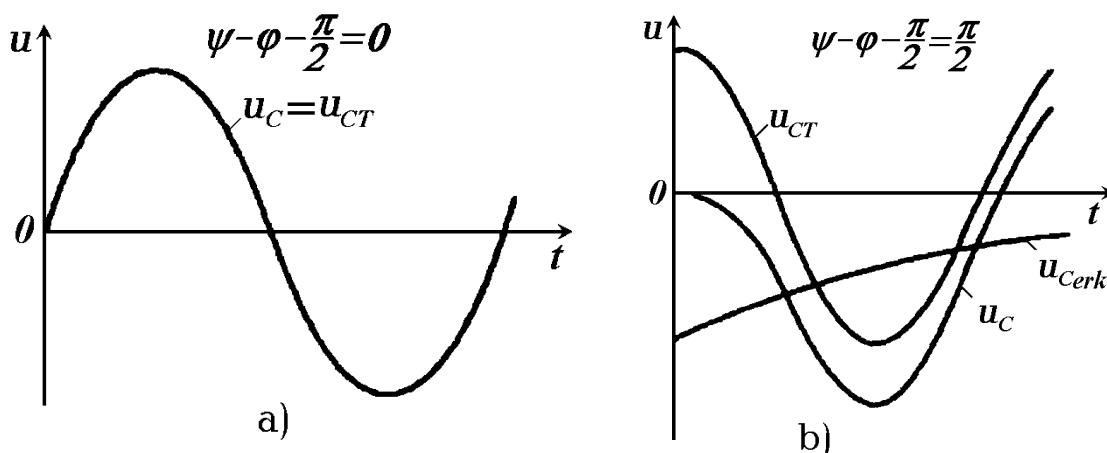
$$u_C(t) = \frac{E_m}{Z\omega C} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{E_m}{Z\omega C} \sin\left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

va o'tkinchi tokni topamiz:

$$i(t) = C \frac{du_C}{dt} = \frac{E_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) + \frac{E_m}{RZ\omega C} \sin\left(\psi - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

8.11- rasmda o'tkinchi kuchlanish $u_C(t)$ grafigi tasvirlangan. O'tkinchi jarayon davomida kuchlanishning oniy qiymati turg'un

kuchlanish amplitudasi manba EYK sining ikkilangan amplitudasidan kamligicha qoladi.

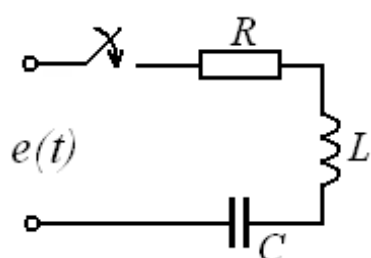


8.11- rasm.

Ammo kommutatsiya paytida kondensatordagi turg'un kuchlanish nolga teng bo'lsa, u holda zanjirda o'tkinchi jarayon umuman paydo bo'lmasligi mumkin (8.11- rasm, a).

Agar kommutatsiya paytida kondensatordagi turg'un kuchlanish maksimal qiymatga ega bo'lsa (8.11- rasm, b), u holda o'tkinchi kuchlanish o'zining maksimal qiymatiga yarim davrdan keyin erishadi va turg'un kuchlanish amplitudasining ikkilangan qiymatiga teng bo'lishi mumkin.

8.9. R , L va C elementlar ketma-ket ulangan zanjirda o'tkinchi jarayonlar



8.12- rasm

R , L va C elementlarini ketma-ket ulab, hosil bo'lgan kontur EYK manbayiga ulanganida (8.12- rasm) ro'y beruvchi o'tkinchi jarayonni tahlil qilaylik. Elektr zanjirining differensial tenglamasini Kirxgof ikkinchi qonuniga asosan tuzamiz:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = e(t).$$

Binobarin, bunga xos xarakteristik tenglama

$$Lp^2 + Rp + \frac{1}{C} = 0; \quad LCp^2 + RCp + 1 = 0$$

quyidagi ildizlarga ega:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2},$$

bunda $\delta = \frac{R}{2L}$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Bularni hisobga olib, xarakteristik tenglamani

$$p^2 + 2\delta p + \omega_0^2 = 0 \text{ ko'rinishida yozamiz.}$$

O'tkinchi tokning erkin tashkil etuvchisi quyidagiga teng bo'ladi:

$$i_{erk} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

O'tkinchi tok esa (8.6) ifodaga ko'ra:

$$i = i_T + i_{erk} = i_T + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}. \quad (8.19)$$

Turg'un tok zanjirni ta'minlab turgan EYK manbayi $e(t)$ bilan aniqlanadi. Erkin tokning o'zgarish qonuniyati esa xarakteristik tenglama ildizlariga bog'liq bo'ladi.

1. R , L va C elementlari ketma-ket ulangan zanjirning o'zgaras EYK manbayiga ulanishi. Zanjir $e(t) = E = \text{const}$ EYK manbayiga $t = 0$ paytda ulangan va sig'imdagi kuchlanish kommutatsiyagacha $u_C(0_-) = U$ bo'lgan holatni ko'rib chiqaylik. Zanjirda induktivlik mavjudligi sababli undagi tok kommutatsiya paytida $i(0) = 0$ ga teng bo'ladi.

A_1 va A_2 integrallash doimiylarini topish uchun bog'liq boshlang'ich shart $\frac{di(0)}{dt}$ ni aniqlash lozim bo'ladi. Bu shartni $t = 0$ payt uchun zanjir muvozanat tenglamasidan aniqlaymiz, ya'ni:

$$L \frac{di(0)}{dt} + Ri(0) + u_C(0) = E,$$

$$\text{bundan} \quad \frac{di(0)}{dt} = \frac{E - u_C(0) - Ri(0)}{L} = \frac{E - U}{L}, \quad (8.20)$$

chunki $i(0) = 0$.

Kommutatsiyadan keyingi turg'un rejimda konturdagi tok nolga teng, chunki sig'im o'zgaras tokni o'zidan o'tkazmaydi. Bu (8.20) differensial tenglamaning mohiyatidan ham kelib chiqadi.

(5.19) tenglamani differensiallab va $i_T = 0$ ekanligini inobatga olib, quyidagini hosil qilamiz:

$$\frac{di}{dt} = A_1 p_1 e^{p_1 t} + A_2 p_2 e^{p_2 t}. \quad (8.21)$$

(8.19) va (8.21) tenglamalarni $i = 0$ payt uchun (8.20) ni hisobga olib, birgalikda A_1 va A_2 larga nisbatan yechib quyidagini topamiz:

$$A_1 = -A_2 = \frac{E - U}{L(p_1 - p_2)} = \frac{E - U}{2L\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}}.$$

Buni hisobga olib, (8.19) ni quyidagicha yozishimiz mumkin:

$$i = \frac{E - U}{2L\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (8.22)$$

Bu yerda zanjir parametrlari uchun quyidagi uchta rejimni ko'rib chiqamiz:

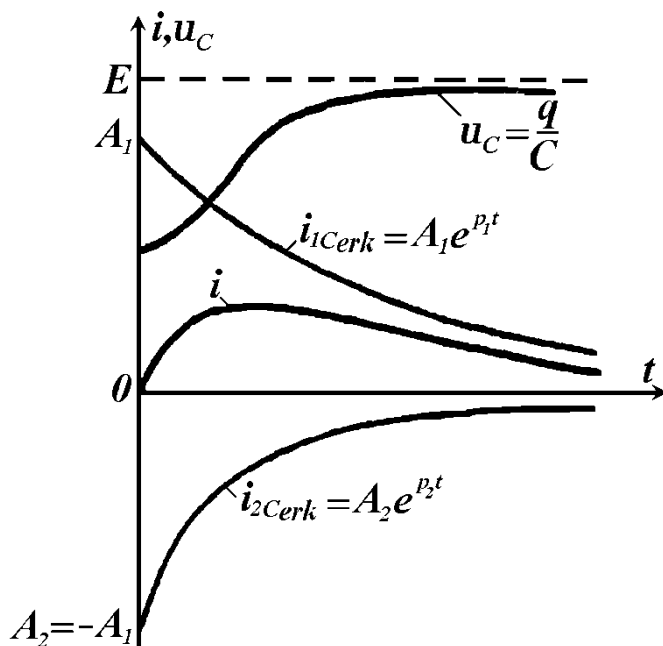
1. $\delta > \omega_0$, 2. $\delta = \omega_0$, 3. $\delta < \omega_0$. 1-rejim. $\delta > \omega_0$ bo'lganida r_1 va r_2 ildizlar haqiqiy, manfiy va har xil. Zanjirni ulash onida tok kommutatsiyaning birinchi qonuniga asosan $i(0) = 0$, kondensatorda kuchlanish esa kommutatsiyaning ikkinchi qonuniga asosan $u_C(0) = U$, ammo kuchlanish $u_L(0) = E - U$, chunki Kirxgof ikkinchi qonuniga binoan vaqtning istalgan onida $u_R + u_L + u_C = E$. Demak,

$$u_L(0) = \left[L \frac{di}{dt} \right]_{t=0} = LA[p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}]_{t=0} = E - U \quad \text{bo'ladi.}$$

Kandensator u_C va induktivlik u_L dagi kuchlanishlar va tok esa quyidagicha aniqlanadi:

$$u_C = E - Ri - U_L = (E - U) \left(1 - \frac{p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}}{p_1 - p_2} \right).$$

$$u_L = \frac{U}{p_1 - p_2} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}) \quad i = \frac{U}{L(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t})$$



8.13- rasm

8.13-rasmda E , u_C kuchlanishlar va i tokning vaqt bo'yicha grafiklari keltirilgan. $|p_1| < |p_2|$ deb hisoblansa, $e^{p_1 t}$ egri chiziq $e^{p_2 t}$ egri chiziqqa nisbatan sekinroq kamayishining guvohi bo'lamiz.

2- rejim, ya'ni $\delta = \omega_0$ bo'lgan holat. $p_1 = p_2 = -\delta$ bo'lganida yuqoridagi jarayon qaytariladi (chegaraviy holat).

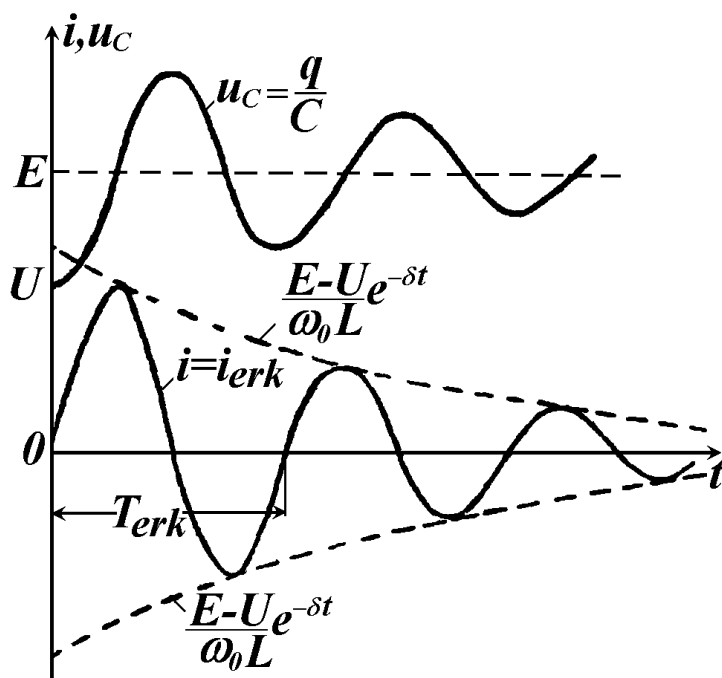
Bunda $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$.

3- rejim, $\delta < \omega_0$ da xarakteristik tenglama ildizlari kompleks va qo'shma sonlar,

ya'ni: $p_1 = -\delta + j\omega_0$, $p_2 = -\delta - j\omega_0$. Bu holda

$$i = \frac{E - U}{\omega_0 L} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t. \quad (8.23)$$

O'tkinchi va erkin kattaliklarning (8.23) ga mos egri chiziqli tavsiflari 8.14- rasmda tasvirlangan.



8.14- rasm

Agar erkin tok i_{erk} noldan boshlanib, so'nuvchi sinusoidal qonun bilan o'zgarsa va $t = \infty$ da yana nolga yaqinlashsa, ya'ni so'nuvchi bo'lsa, o'tkinchi kuchlanish u_C o'zining turg'un qiymati $u_{CT} = E$ atrofida tebranadi va $t = \infty$ da uning egrichizig'i to'g'ri chiziq bilan qo'shilib ketadi. Bu rejimda tebranish konturi sig'imidagi elektr maydoni energiyasi induktivlikdagi magnit maydoni

energiyasiga va aksincha davriy almashib turadi. Bu energiyaning bir qismi R qarshilikda issiqlik energiyasiga davriy aylanib turishi hisobiga tebranish so'nuvchi xarakterga ega bo'ladi. $t = \frac{1}{\delta}$ da so'nuvchi egri chiziq ordinatasi o'zining boshlang'ich qiymatidan $e = 2,718$ martaga kamayadi.

8.10 O'tkinchi jarayonlarni klassik usulda hisoblashning umumiy tartibi

Chiziqli elektr zanjirlardagi o'tkinchi jarayonlarni klassik usulda hisoblashning bosqichlari quyidagilardan iborat:

1. Zanjirning kommutatsiyagacha bo'lgan holati tahlil qilinadi. Bunda induktiv g'altakdan o'tayotgan tok va kondensatordagi kuchlanish $t = 0_-$ bo'lgan vaqt uchun aniqlanadi.

2. Bog'liq bo'lmagan boshlang'ich shartlar kommutatsiya qonunlari yordamida topiladi. Kommutatsiyaning birinchi qonuni yordamida induktiv g'altakdagi tok, ikkinchi qonundan foydalanib esa sig'im elementidagi kuchlanish aniqlanadi.

3. Elektr zanjirining kommutatsiyadan keyingi holati uchun Kirxgof qonunlariga asoslanib, uning differensial tenglamalari tuziladi. Differensial tenglamalar konturlar va tugunlar uchun tuzilgan elektrik muvozanat tenglamalaridan foydalanib tuziladi.

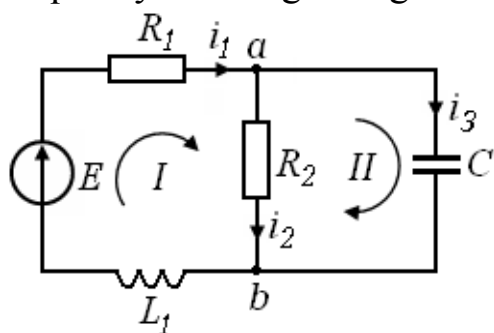
4. Kommutatsiyadan keyingi holat ($t = \infty$) uchun zanjirdagi turg'un jarayon tahlil qilinadi. Bu maqsadda elektr zanjirining kommutatsiyadan keyingi holati uchun majburiy rejimdagi tok va kuchlanishlar aniqlanadi (differensial tenglamaning xususiy yechimi).

5. Zanjirdagi tok va kuchlanishlarning erkin tashkil etuvchilari aniqlanadi. Buning uchun zanjirning xarakteristik tenglamasi tuziladi va uning ildizlari aniqlanadi. So'ngra erkin tashkil etuvchilar ifodalari yoziladi (bir jinsli differensial tenglamaning umumiy yechimi).

6. Zanjirdagi tok va kuchlanishlar turg'un va erkin tashkil etuvchilar yig'indisi ko'rinishida yoziladi (differensial tenglamaning to'liq yechimi).

7. Integrallash doimiylari topiladi. Buning uchun bog'liq bo'lgan boshlang'ich shartlar aniqlanadi. Tok va kuchlanishlar va ular $(n-1)$ hosilalarining $t = 0$ dagi qiymatlari hisoblanadi. Bunda tuzilgan muvozanat tenglamalar va kommutatsiyadan keyingi $t = 0$ payt uchun bog'liq bo'lmagan boshlang'ich shartlar va elektr zanjirining kommutatsiyadan keyingi holatidan foydalaniladi.

8. Boshlang'ich shartlarga asoslanib zanjirning to'la reaksiyasi aniqlanadi. Integrallash doimiylarini izlanayotgan kattaliklar tenglamasiga qo'yib, $t > 0$ uchun to'liq yechim topiladi va izlanayotgan kattaliklarning vaqt bo'yicha o'zgarish grafiklari quriladi.



8.15- rasm

Erkin tok va kuchlanishlar uchun tenglamalar tuzish.

Buning uchun dastlab shoxobchalardagi toklarga ixtiyoriy ravishda yo'nalishlari belgilanadi. So'ngra Kirxgof qonunlariga asoslanib tenglamalar tuziladi. Masalan, 8.15- rasmda keltirilgan

elektr zanjirining kommutatsiyadan keyingi holati uchun quyidagi tenglamalarni yozamiz

$$a \text{ tugun uchun: } i_1 - i_2 - i_3 = 0,$$

$$\text{I- kontur uchun: } L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + R_2 i_2 = E, \quad (8.24)$$

$$\text{II - kontur uchun: } -R_2 i_2 + \frac{1}{C} \int i_3 dt = 0.$$

Bu tenglamalarda i_1, i_2 va i_3 - izlanayotgan o'tkinchi toklar. Ularning har biri turg'un va erkin toklar yig'indisidan iborat. Bu tenglamalar sistemasidan erkin toklar uchun tenglamalar sistemasiga o'tish uchun zanjirni majburiy kuchdan-manbadan ozod etamiz (bizning misolda EYK manbayi E) va har bir tokni erkin tok bilan almashtiramiz (masalan, i_1 o'rniga i_{1erk} , i_2 o'rniga i_{2erk} va i_3 o'rniga i_{3erk}). Natijada ushbu tenglamalar sistemasi hosil bo'ladi:

$$\left. \begin{aligned} i_{1erk} - i_{2erk} - i_{3erk} &= 0, \\ L_1 \frac{di_{1erk}}{dt} + R_1 i_{1erk} + R_2 i_{2erk} &= 0, \\ -R_2 i_{2erk} + \frac{1}{C} \int i_{3erk} dt &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8.25)$$

Erkin toklar uchun tuzilgan tenglamalar sistemasini algebraik shaklga keltirish. Ma'lumki, o'ng tomoni nolga teng bo'lgan differensial tenglama bir jinsli differensial tenglama deb ataladi. Matematika kursidan bizga ma'lumki, bir jinsli differensial tenglamalarning umumiy yechimi ko'rsatkichli funksiya Ae^{pt} ko'rinishida yoziladi. Demak, har bir erkin tokni $i_{erk} = A_i e^{pt}$ ko'rinishida aniqlaymiz. Har bir tok uchun integrallash doimiysi A_i har xil, so'nish koeffitsiyenti esa shoxobchaldagi erkin toklar uchun bir xil. Demak, tahlil etilayotgan zanjir yagona o'tkinchi jarayon bilan ifodalanadi.

Erkin tok hosilasini topamiz:

$$\frac{di_{erk}}{dt} = \frac{d}{dt} (Ae^{pt}) = pAe^{pt} = pi_{erk}.$$

Demak, erkin tok hosilasini topish uchun uni p ga ko'paytirishning o'zi yetarli. Masalan, induktiv elementdagi kuchlanishni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$L \frac{di_{erk}}{dt} \rightarrow pLi_{erk}.$$

Endi erkin tok integralini aniqlaymiz:

$$\int i_{erk} dt = \int Ae^{pt} dt = A \frac{e^{pt}}{p} = \frac{i_{erk}}{p}.$$

Demak, erkin tok integralini i_{erk}/p bilan almashtirish mumkin. Kondensatordagi kuchlanishni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_{erk} dt = \frac{i_{erk}}{pC}.$$

Shunday qilib, (8.25) differensial tenglamalar sistemasidagi $L \frac{di_{erk}}{dt}$ o'rniga pLi_{erk} va $\frac{1}{C} \int i_{erk} dt$ o'rniga $\frac{i_{erk}}{pC}$ ni qo'yib, quyidagi tenglamalarni yozamiz:

$$\left. \begin{aligned} i_{1erk} - i_{2erk} - i_{3erk} &= 0, \\ (pL + R_1)i_{1erk} + R_2i_{2erk} &= 0, \\ -R_2i_{2erk} + \frac{1}{pC}i_{3erk} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8.26)$$

(8.26) tenglamalar algebraik tenglamalar sistemasi bo'lib, i_{1erk} , i_{2erk} va i_{3erk} - izlanayotgan noma'lumlar. Bu sistemada hosila va integral amallari yo'q. Shunday qilib, chiziqli differensial tenglamalardan algebraik tenglamalar sistemasiga o'tish algebraik shaklga keltirish deyiladi.

Tenglamalar sistemasining xarakteristik tenglamasini tuzish. Algebraik shakldagi tenglamalar soni izlanayotgan erkin toklar soniga teng. Faraz qilaylik, (8.26) sistemaning i_{1erk} , i_{2erk} va i_{3erk} larga nisbatan yechimi quyidagicha aniqlanadi:

$$i_{1erk} = \frac{\Delta_{1erk}}{\Delta}; i_{2erk} = \frac{\Delta_{2erk}}{\Delta}; i_{3erk} = \frac{\Delta_{3erk}}{\Delta},$$

bu yerda Δ - sistemaning determinanti, ya'ni aniqlovchisi:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 \\ pL + R_1 & R_2 & 0 \\ 0 & R_2 & -\frac{1}{pC} \end{vmatrix}.$$

To'ldiruvchi aniqlovchi Δ_{1erk} (8.26) tenglamalar sistemasining o'ng tomoni bilan determinant Δ ning birinchi ustunini, Δ_{2erk} - faqat ikkinchi ustunini va Δ_{3erk} - esa faqat uchinchi ustunini almashtirib topiladi.

(8.26) tenglamalar sistemasida o'ng tomon faqat noldan iborat bo'lganligi uchun determinant Δ_{1erk} , Δ_{2erk} va Δ_{3erk} larda bittadan ustun nollardan iborat bo'ladi. Matematikadan ma'lumki, agar determinantda biror ustun faqat noldan iborat bo'lsa, determinant nolga teng bo'ladi. Demak, $\Delta_{1erk} = 0$, $\Delta_{2erk} = 0$, $\Delta_{3erk} = 0$. Erkin toklarning fizik ma'nosiga asosan ular nolga teng bo'lishi mumkin emas, chunki u holda kommutatsiya qonunlari bajarilmaydi. Yuqoridagi ko'rilganlardan ma'lumki:

$$i_{1erk} = \frac{0}{\Delta}; i_{2erk} = \frac{0}{\Delta}; i_{3erk} = \frac{0}{\Delta}.$$

Shunday qilib, algebraik sistemaning bosh determinanti nolga teng ($\Delta = 0$) bo'lishi kerak. $\Delta = 0$ tenglama xarakteristik tenglama deb ataladi.

Zanjirning o'zgaruvchan tokdagi kirish qarshiligi yordamida sistemaning xarakteristik tenglamasini tuzish. Noma'lum p ni topish uchun xarakteristik tenglamani boshqa usul bilan ham tuzish mumkin. Buning uchun zanjirning kirish qarshiligi murakkab ikki qutblikning o'zgaruvchan tokdagi kompleks qarshiligi yordamida aniqlanadi. Uni $\underline{Z}(j\omega)$ deb belgilaymiz, $j\omega$ ni p bilan almashtirib, $\underline{Z}(p)$ ni hosil qilamiz. $\underline{Z}(p) = 0$ tenglama xarakteristik tenglamaning o'zginasidir. Xarakteristik tenglama tuzishning bunday usuli ko'rilayotgan zanjirda induktiv bog'langan shoxobchalar bo'lmagan sxemalar uchun taalluqlidir.

8.11 Ikki qutblikni uzluksiz o'zgaruvchan kuchlanish manbayiga ulash (Dyuamel integrali)

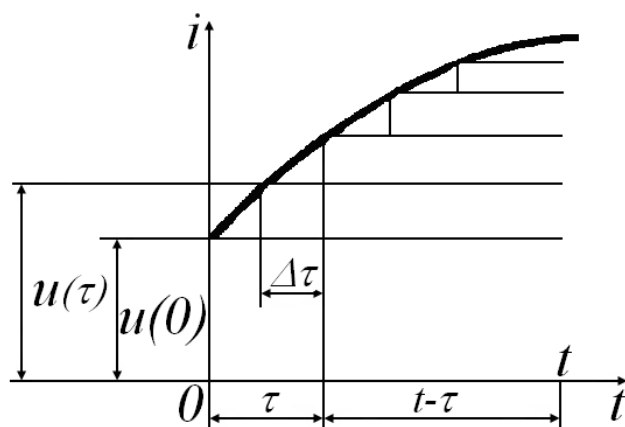
Ixtiyoriy passiv ikki qutblik $t = 0$ ondan boshlab uzluksiz o'zgaruvchan u kuchlanish manbayiga ulangan bo'lsin (8.16- rasm).

Ikki qutblikning biror bir shoxobchasidagi i tok (yoki kuchlanish)ni kalit ulangandan keyingi o'zgarish qonuni topilsin.

Masalani ikki bosqichda yechamiz:

Avval birlik kuchlanish (qiymati birga teng o'zgarmas kuchlanish)ga ulangan ikki qutblik shoxobchasidagi tokni topamiz. Birlik sakrash (pog'onali birlik sakrash) funksiyasi Xevisayd funksiyasi bilan ifodalanadi. Bu funksiya elektr zanjirlari nazariyasida $t = 0$ dan boshlab zanjir kirish

qismalariga beriladigan birlik qiymatga ega o'zgarmas kuchlanishdir (8.17-rasm). Uni quyidagicha ifodalash mumkin: $t < 0$ da $1(t) = 0$, $t \geq 0$ da $1(t) = 1$.



8.16- rasm

Misol uchun, RL – zanjir tokining o'tkinchi xarakteristikasi:

$$h(t) = \frac{1}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

RC – zanjir kuchlanishining o'tkinchi xarakteristikasi:

$$h(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

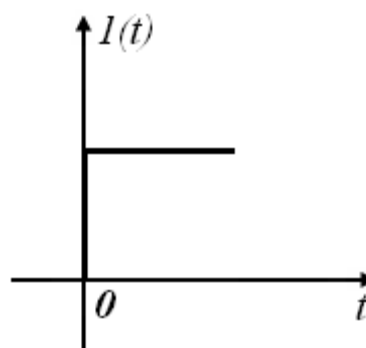
Agar bir paytda tok va kuchlanish izlanayotgan bo'lsa, u holda mos ravishda $h_i(t)$ va $h_u(t)$ deb belgilash mumkin. Ikki qutblik istalgan sxemasining o'tkinchi funksiyasini klassik, operator yoki Fure integrali usullari yordamida aniqlash mumkin. Shunday qilib, bundan keyingi hisoblashlarda $h(t)$ ni ma'lum, deb olamiz.

Kuchlanish manbayiga passiv ikki qutblik ulanayotganligi uchun $t < 0$ da uning har qanday shoxobchasidagi tok yoki kuchlanish nolga tengdir. Shuning uchun $t < 0$ da $h(t) = 0$, deb qabul qilamiz.

Uzluksiz o'zgarayotgan $u(t)$ kuchlanish egri chizig'ini to'g'ri burchakli elementar o'zgarmas Δu kuchlanishlar bilan almashtiramiz (8.16- rasm).

Bu holda uzluksiz o'zgarayotgan kuchlanishni $t = 0$ vaqtda $u(0)$ o'zgarmas kuchlanishga va keyin $\Delta \tau$ vaqt intervali bilan ketma-ket elementar o'zgarmas Δu kuchlanishlarga ulashlar bilan almashtiramiz. Bunda o'suvchi funksiya uchun Δu ning ishorasi "+", kamayuvchi funksiya uchun esa "-" qo'yiladi.

Pog'onali birlamchi sakrash ta'sirida zanjirda hosil bo'lgan tok (yoki kuchlanish) ga teng bo'lgan funksiya $h(t)$ o'tkinchi funksiya yoki o'tkinchi xarakteristika deyiladi. Bu zanjirning birlamchi sakrashga reaksiyasidir.



8.17- rasm

U_0 o'zgaras kuchlanish ta'sirida t onda shoxobchanning toki $u(0)h(t)$ ga teng bo'lib, τ vaqt oralig'ida qo'shiladigan elementar Δu kuchlanish sakrashidan hosil bo'ladigan tokning tashkil etuvchisi $\Delta u \cdot h(t-\tau)$ ga teng. Bu yerda o'tkinchi funksiya argumenti $(t-\tau)$ bo'ladi, chunki Δu kuchlanish kalit ulangandan keyin τ vaqtdan keyin ta'sir qila boshlaydi.

Kuchlanishning elementar sakrashi:

$$\Delta u = \Delta \tau \left. \frac{du}{dt} \right|_{t=\tau} = \Delta u'(\tau).$$

Shuning uchun izlanayotgan tokning tashkil etuvchisi:

$$\Delta u \cdot h(t-\tau) = u'(\tau) \Delta \tau h(t-\tau).$$

Kuchlanishning elementar sakrashlari $t=0$ dan to t gacha bo'lgan vaqt intervallarida ta'sir etib turadi. Shuning uchun sakrashlarning barcha tashkil etuvchilarini qo'shib va $\Delta \tau \rightarrow 0$ ga intilishini hamda boshlang'ich $u(0)$ kuchlanish sakrashidan hosil bo'ladigan tokni hisobga olib, tokning quyidagi ifodasini yozishimiz mumkin:

$$i(t) = u(0)h(t) + \int_0^t u'(\tau)h(t-\tau)d\tau. \quad (8.27)$$

(8.27) ifoda uzluksiz o'zgaradigan kuchlanish ta'sirida o'tadigan tokni aniqlovchi Dyumel integrali yoki formulasi deyiladi.

Zanjir tok manbayiga ulangan holat ham yuqorida aytilgan mulohazalar yordamida hal etiladi.

$f_1(t)$ va $f_2(t)$ dan iborat ikkita funksiya uchun o'ralish teoremasi (teorema svertki) ga ko'ra:

$$\int_0^t f_1(t-\tau)f_2(\tau)d\tau = \int_0^t f_1(\tau)f_2(t-\tau)d\tau. \quad (8.28)$$

(8.28) ifodaga tegishli o'zgartirishlar kiritib, Dyumel integralining boshqa shakllarini hosil qilish mumkin.

8.12 O'tkinchi jarayonlarni hisoblashning operator usuli

Laplas o'zgartirishining mohiyati. O'tkinchi jarayonlarni klassik usul bilan hisoblashning asosiy qiyinchiligi shundaki, zanjir murakkablashgan sari uning muvozanat holatini belgilovchi differensial tenglamaning tartibi orta boradi, bu esa integrallash doimiylarini aniqlash bilan bog'liq bo'lgan hisoblash ishlarining qiyinlashishiga olib keladi. Bu holatni bartaraf etish uchun chiziqli differensial tenglamalarni yechishning simvolik usulidan

foydalanish mumkin. Bu usulni 1862 yilda rus olimi M.E. Vashenko-Zaxarchenko "Simvolik usul va uni chiziqli differensial tenglamalarni integrallashdagi tatbiqi" nomli monografiyasida birinchi bo'lib taklif etgan. Chiziqli elektr zanjirlardagi o'tkinchi jarayonlarni hisoblashga bu usulni qo'llashni XIX asrning oxirida ingliz muhandisi O. Xevisayd taklif etgan. Hozirgi vaqtga kelib Xevisaydning operatsion hisoblash usuli undan ko'ra umumiyroq va to'laroq usul - Laplas o'zgartirishlari usuliga o'rnini bo'shatib bergan. Bu usulning asosiy mohiyati shundan iboratki, vaqt sohasi(oblasti)da berilgan funksiya $f(t)$ ni integrallash va differensiallash o'rniga uning operator tasviri deb ataladigan $F(p)$ bilan almashtirib, algebraik muvozanat tenglamasiga o'tiladi va u algebraik amallar asosida yechiladi. Agar $f(t)$ ning vaqt sohasidagi ifodasi berilgan bo'lsa, u holda uning operator tasviri kompleks sohada topiladi. So'ngra algebraik amallarni qo'llab, kompleks sohada yechim topiladi, keyin yana funksiyaning vaqt sohasiga qaytiladi. Bunda Laplasning to'g'ri va teskari o'zgartirishlaridan foydalaniladi.

Shunday qilib, original deb ataluvchi har qanday vaqt funksiyasi $f(t)$ ni unga mos (ekvivalent) bo'lgan kompleks o'zgaruvchi $p = \delta + j\omega$ argumentli $F(p)$ funksiyasiga almashtirish mumkin. Shu bilan birga haqiqiy (original) funksiya $f(t)$ o'zining tasvir funksiyasi $F(p)$ ga teng emas, balki unga mos bo'lishini esda tutish zarur. Bu moslik matematikada quyidagicha ifodalanadi:

$f(t) \stackrel{.}{=} F(p)$ yoki $F(p) \stackrel{.}{=} f(t)$ bu yerda $\stackrel{.}{=}$ - moslik belgisi.

Masalan, logarifm - sonning tasviri. Algebradan ma'lumki, ko'paytirish, bo'lish, darajaga ko'tarish, ildizdan chiqarishda logarifmdan foydalaniladi. Haqiqatdan, ko'paytirishni logarifmda qo'shish bilan almashtiramiz, bo'lishni esa - logarifmlarning ayirmasi bilan almashtirib, murakkab masalalarni oddiy masalaga aylantirishimiz mumkin. Shunday qilib, logarifmlashni sonning tasviri deb qarash mumkin.

Original va tasvir. Sinusoidal funksiyaning kompleks tasviri. Vaqt sohasida berilgan funksiya (original) $I_m \sin(\omega t + \psi) \stackrel{.}{=} I_m e^{j\psi}$ (tasvir). Vaqt bo'yicha sinusoidal o'zgaruvchi funksiyaning uning tasviri bilan almashtirish matematik amallarni ancha soddalashtiradi.

Operator usul - vaqt sohasida berilgan funksiyaning kompleks $p = \delta + j\omega$ sohasida tasvirga aylantirishga asoslangan. Operator usulda o'zgaruvchan vaqt t , yangi o'zgaruvchi $p = \delta \pm j\omega$ kompleksi bilan almashtiriladi, bu yerda p - operator t vaqt funksiyasidan p kompleks

o'zgaruvchili funksiyaga o'tish Laplas o'zgartirishi, ya'ni Laplas integrali orqali bajariladi. Shunday qilib, operator usuli yordamida o'tkinchi jarayonlarni hisoblash Laplas o'zgartirishlariga asoslangan.

Operator usulida hosila ko'paytmaga, integrallash amali esa bo'linmaga keltiriladi. Bu esa differensial tenglamalarni integrallash masalasini osonlashtiradi.

Laplas o'zgartirishida $f(t)$ funksiya original, $F(p)$ funksiya esa uning tasviri deyiladi. Ular o'zaro quyidagi integrallar bilan bog'langan:

$$F(p) \circ == \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt \quad \text{va} \quad f(t) \circ == \frac{1}{2\pi j} \int_{\nu-j\infty}^{\nu+j\infty} F(p) e^{pt} dp.$$

Oxirgi ifoda *Riman-Mellin formulasi* deb ataladi.

Nazariy elektrotexnika kursida o'rganiladigan $f(t)$ funksiyalardan ularning tasvir funksiyalarini Laplas integrali yordamida topish mumkin.

Tasvirni operator p ga ko'paytirsak, ya'ni $\xi(p) = pF(p)$ - Karson-Xevisayd o'zgartirishiga ega bo'lamiz.

Quyida misol tariqasida elektrotexnikada ko'p uchraydigan orginal funksiyalarni Laplas o'zgartirishlari bo'yicha operator shakllari keltirilgan.

Oddiy funksiyalarni Laplas formulasi bo'yicha o'zgartirish. Berilgan oddiy funksiya $f(t) = U_0$ bo'lganida, uning tasviri $F(p)$ Laplas integraliga asosan:

$$F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} U_0 dt = -\frac{U_0}{p} e^{-pt} \Big|_0^{\infty} = \frac{U_0}{p},$$

ya'ni o'zgarmas kattalikning tasviri shu kattalikni operator p ga bo'linganiga teng:

$$U_0 \circ == \frac{U_0}{p}.$$

Ko'rsatkichli (eksponensial) funksiya $f(t) = e^{\alpha t}$ ning tasviri:

$$\begin{aligned} F(p) \circ == \int_0^{\infty} e^{-pt} e^{\alpha t} dt &= \int_0^{\infty} e^{-t(p-\alpha)} dt = \left(-\frac{1}{p-\alpha} \right) \cdot e^{-t(p-\alpha)} \Big|_0^{\infty} = \\ &= -\frac{1}{p-\alpha} (0-1) = \frac{1}{p-\alpha}, \end{aligned}$$

$$\text{ya'ni } e^{\alpha t} \circ == \frac{1}{p-\alpha}.$$

Agar $\alpha = j\omega$ bo'lsa, unda I_m yoki U_m ga ko'paytirib, quyidagilarni hosil qilamiz:

$$I_m e^{j\omega t} \circ \equiv \circ I_m \frac{1}{p - j\omega}; \quad U_m e^{j\omega t} = U_m \frac{1}{p - j\omega}.$$

Quyida elektrotexnikada keng qo'llanadigan funksiyalar tasvirlari berilgan:

$$1. e^{j\omega t} \circ \equiv \circ \frac{1}{p - j\omega} \quad \text{yoki} \quad e^{at} \circ \equiv \circ \frac{1}{p - a}$$

$$2. 1 - e^{-j\omega t} \circ \equiv \circ \frac{1}{p} - \frac{1}{p + \alpha} = \frac{\alpha}{p(p + \alpha)},$$

$$3. e^{j(\omega t + \psi)} \circ \equiv \circ e^{j\psi} e^{j\omega t} = \frac{e^{j\psi}}{p - j\omega},$$

$$4. \sin \omega t = \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j} \circ \equiv \circ \frac{1}{2j} \left[\frac{1}{p - j\omega} - \frac{1}{p + j\omega} \right] = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2},$$

$$5. \cos \omega t = \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} \circ \equiv \circ \frac{1}{2} \left[\frac{p}{p - j\omega} + \frac{1}{p + j\omega} \right] = \frac{p}{p^2 + \omega^2} \quad \text{va h.k.}$$

Shunday qilib, o'tkinchi jarayonlarni hisoblashda ko'p uchrab turadigan vaqt funksiyasi va uning tasvirini jadval tarzida ko'rsatish mumkin. Tasvirlar bilan tegishli amallar bajarilganidan keyin ularning originallariga Laplasning teskari o'zgartirishi, aniqrogi Riman-Mellin formulasi orqali qayta o'tiladi. Unga ko'ra:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\nu - j\infty}^{\nu + j\infty} F(p) e^{pt} dp.$$

Funksiya hosilasining tasviri. Vaqt sohasida berilgan funksiya $f(t)$ va uning kompleks sohadagi tasviri $F(p)$ ma'lum bo'lsin. Funksiya hosilasi $\frac{df(t)}{dt}$ ning tasvirini berilgan $t=0$ boshlang'ich shartda aniqlaymiz.

Laplas o'zgartirishini quyidagicha yozish mumkin:

$$\int_0^\infty \frac{df(t)}{dt} e^{-pt} dt = \int_0^\infty e^{-pt} d[f(t)].$$

Bu integralni hisoblash uchun uni bo'laklarga ajratamiz, ya'ni bo'laklab integrallaymiz:

$$\int u dV = uV - \int V du \quad e^{-pt} = u \quad \text{va} \quad d[f(t)] = dV \quad \text{deb belgilab:}$$

$$\int_0^\infty e^{-pt} d[f(t)] = e^{-pt} f(t) \Big|_0^\infty - \int_0^\infty f(t) d[e^{-pt}].$$

Agar $e^{-pt} f(t) \Big|_0^\infty = 0 - f(0) = -f(0)$ bo'lsa, u holda

$$-\int_0^\infty f(t)de^{-pt} = p \int_0^\infty f(t)e^{-pt} dt = pF(p) \text{ bo'ladi.}$$

Shunday qilib:

$$\int_0^\infty \frac{df(t)}{dt} e^{-pt} dt = pF(p) - f(0) \text{ yoki } \frac{df(t)}{dt} \circ \circ pF(p) - f(0).$$

Induktiv elementdagi kuchlanishning tasviri. Induktiv elementdan o'tayotgan $i(t)$ tokning tasviri $I(p)$ bo'lsin. Induktiv elementdagi

kuchlanish: $u_L = L \frac{di}{dt}$. Funksiya hosilasining tasviriga asosan

$\frac{di(t)}{dt} \circ \circ p(I)p - i(0)$, bu yerda $i(0)$ - tokning $t = 0$ paytdagi qiymati.

$L \frac{di(t)}{dt} \circ \circ LpI(p)$, agar $i(0) = 0$ bo'lsa, u holda $L \frac{di}{dt} \circ \circ LpI(p)$ bo'ladi.

Funksiya ikkinchi hosilasining tasviri. Xuddi shunga o'xshash, original $f(t)$ ning ikkinchi hosilasi quyidagi tasvirga ega ekanligini ko'rsatish mumkin:

$$\begin{aligned} f''(t) &= \frac{d^2[f(t)]}{dt^2} \circ \circ p^2 F(p) - pf(0) - \left[\frac{df(t)}{dt} \right]_{t=0} = \\ &= p^2 \left[F(p) - \frac{f(0)}{p} - \frac{f'(0)}{p^2} \right]. \end{aligned}$$

Funksiya $f(t)$ n tartibli hosilasi tasviri:

$$f^n(t) \circ \circ p^n \left[F(p) - \frac{f(0)}{p} - \frac{f'(0)}{p^2} - \frac{f''(0)}{p^3} - \dots - \frac{f^{n-1}(0)}{p^n} \right] \text{ bo'ladi.}$$

Integralning tasviri. Umumiy holda integralning tasviri:

$$\int_0^t f(t)dt \circ \circ \frac{F(p)}{p}.$$

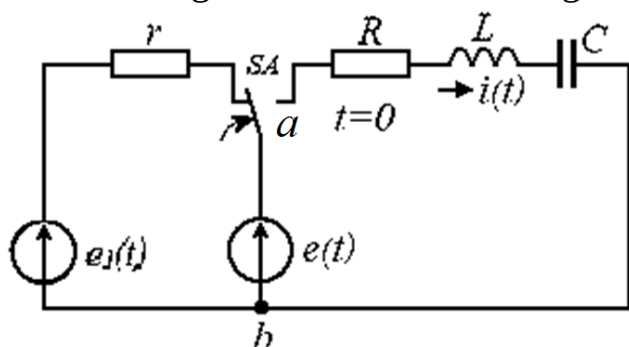
Sig'im elementidagi kuchlanishning tasviri. Kondensator qoplamalari orasidagi kuchlanish $u_C = \frac{1}{C} \int idt$. Umumiy holda esa: $u_C = u_C(0) + \frac{1}{C} \int idt$,

bu yerda $u_C(0)$ - kondensatordagi kuchlanishning $t=0$ dagi qiymati, ya'ni boshlang'ich shart ham hisobga olingan. Yuqoridagi formulaga asosan:

$$\frac{1}{C} \int idt \stackrel{\circ}{=} \frac{I(p)}{pC}.$$

$U_C(0)$ - doimiy kuchlanish tasviri esa: $U_C(0) = \frac{U_C(0)}{p}$.

Shuning uchun kondensatordagi kuchlanishning tasviri:



8.18- rasm

$$u_C(t) \stackrel{\circ}{=} \frac{I(p)}{pC} + \frac{U_C(0)}{p}.$$

Om va Kirxgof qonunlarining operator shakli.

8.18- rasmda keltirilgan zanjir a va b tugunlar orasidagi R, L, C elementlari SA kalit orqali avval EYK $e_1(t)$ manbaga, keyin esa $t=0$ paytida EYK $e(t)$ ga

ulangandagi o'tkinchi $i(t)$ tokni aniqlaymiz. SA kalit ulanganda sxemada o'tkinchi jarayon sodir bo'ladi va tok $i(t)$ ma'lum qonun bilan o'zgaradi. Shoxobchadagi kommutatsiyagacha bo'lgan tok $i = i(0_-)$ va kondensatordagi kuchlanish $u_C = u_C(0_-)$.

Kommutatsiyadan keyingi holat uchun a tugunning potensialini b tugunning potentsiali orqali aniqlasak:

$$\phi_a = \phi_b + u_C + u_L + u_R - e(t),$$

$$u_{ab} = \phi_a - \phi_b = u_R + u_L + u_C - e(t),$$

Agar $u_L = L \frac{di}{dt}$; $u_C = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t idt$ bo'lsa, u holda

$$u_{ab} = Ri + L \frac{di}{dt} + u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t idt - e(t) \text{ bo'ladi.}$$

Bu tenglamaga Laplas o'zgartirishini qo'llaymiz. Laplas o'zgartirishi chiziqli amal bo'lganligi uchun yig'indining tasviri tasvirlar yig'indisiga teng bo'ladi, ya'ni:

$$iR \stackrel{\circ}{=} I(p)R; u_{ab} \stackrel{\circ}{=} u_{ab}(p); L \frac{di}{dt} \stackrel{\circ}{=} LpI(p) - Li(0);$$

$$u_C(0) \stackrel{\circ}{=} \frac{u_C(0)}{p}; \quad \frac{1}{C} \int_0^t i dt \stackrel{\circ}{=} \frac{I(p)}{pC}; \quad e(t) \stackrel{\circ}{=} E(p).$$

Shunday qilib,

$$u_{ab}(p) = I(p) \left(R + pL + \frac{1}{pC} \right) - Li(0) + \frac{u_C(0)}{p} - E(p).$$

Bu tasvirdan ko‘rinib turibdiki, integro-differensial tenglama algebraik tenglama bilan almashtiriladi. Bu tenglamadan tok tasviri $I(p)$ ni topamiz:

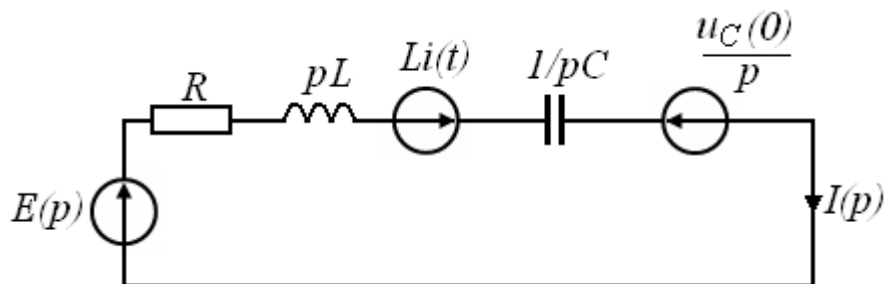
$$I(p) = \frac{u_{ab}(p) + Li(0) - \frac{u_C(0)}{p} + E(p)}{Z(p)},$$

bu yerda $Z(p) = R + pL + \frac{1}{pC}$ -zanjir a va b tugunlari orasidagi to‘la qarshiligining operator shakli.

Bu qarshilik tarkibi kompleks qarshilik ifodasi bo‘lib, u faqat $j\omega$ ni operator p bilan almashtirishdan hosil bo‘ladi.

Yuqoridagi tenglama zanjirning bir qismi uchun operator shaklidagi Om qonunidir. Bu tenglama nol bo‘lmagan boshlang‘ich shart uchun yozilgan. Bunda $Li(0)$ had kommutatsiyagacha bo‘lgan davrda induktiv g‘altakda to‘plangan magnit maydonining energiyasi hisobidan hosil bo‘lgan kuchlanish manbayi sifatida qaraladi. $\frac{u_C(0)}{p}$ - had kondensatorda

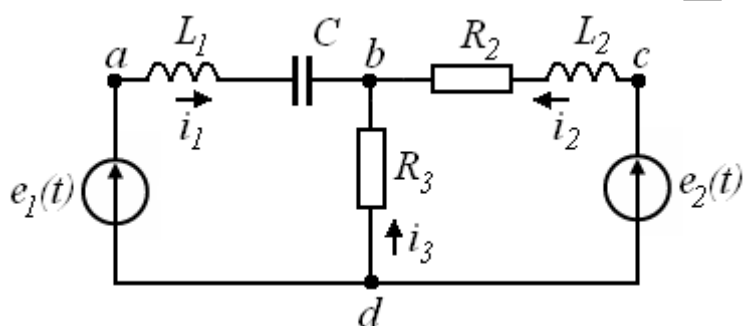
kommutatsiyagacha to‘plangan elektr maydonining energiyasi hisobidan hosil bo‘lgan kuchlanish manbayi sifatida qaraladi. Shunday qilib, 8.19-rasmda a va b tugunlar orasidagi zanjir qismining ekvivalent operator sxemasi keltirilgan. Bunda R , pL , $\frac{1}{pC}$ - operator qarshiliklar, qiymati



8.19- rasm

$Li(0)$ ga teng bo'lgan EYK manbayi tokning yo'nalishi bilan mos, qiymati $\frac{u_C(0)}{p}$ ga teng bo'lgan EYK manbayi – tokning yo'nalishiga teskari.

Kirxgof birinchi qonunining operator shakli. Toklarning oniy qiymatlari uchun Kirxgof birinchi qonunining ifodasi misol uchun 8.20-rasmdagi sxema uchun $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ bo'lsa, uning operator ko'rinishdagi ifodasi esa $I_1(p) + I_2(p) + I_3(p) = 0$ yoki $\sum I(p) = 0$ bo'ladi.



8.20- rasm

Kirxgof ikkinchi qonunining operator shakli. Har qanday berk kontur uchun Kirxgof ikkinchi qonunini yozish mumkin. Oniy qiymatlar uchun muvozanat tenglamasini yozish maqsadida konturni

aylanib chiqish yo'nalishini soat mili harakati yo'nalishida belgilaymiz. 8.20- rasmda berilgan berk $abcd$ konturi uchun ikkinchi qonun bo'yicha tenglama tuzamiz. Kuchlanishning L_1 g'altakdagi pasayisi: $u_{L1} = L_1 \frac{di_1}{dt}$,

L_2 g'altakdagi esa: $u_{L2} = L_2 \frac{di_2}{dt}$.

Zanjirning qismi uchun tuzilgan tenglamada kondensatordagi boshlang'ich kuchlanish $u_C(0)$, toklar $i_1 = i_1(0)$ va $i_2 = i_2(0)$ larni e'tiborga olamiz. Unda:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_3 dt - i_2 R_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} = e_1(t) - e_2(t).$$

Yig'indidagi har bir qo'shiluvchining tasvirini topamiz:

$$L_1 \frac{di_1}{dt} \circ \circ \circ L_1 p I_1(p) - L_1 i_1(0); \quad \frac{1}{C} \int_0^t i_3 dt \circ \circ \circ \frac{I_3(p)}{pC};$$

$$L_2 \frac{di_2}{dt} \circ \circ \circ L_2 p I_2(p) - L_2 i_2(0); \quad u_C(0) \circ \circ \circ \frac{u_C(0)}{p};$$

$$e_1(t) \circ \circ \circ E_1(p); \quad e_2(t) \circ \circ \circ E_2(p).$$

Tasvirlarni tenglamaga qo'yib va boshlang'ich shartlarni o'ng tarafga o'tkazib, quyidagi algebraik tenglamani hosil qilamiz:

$$I_1(p)Z_1(p) + I_2(p)Z_2(p) + I_3(p)Z_3(p) = \\ = E_1(p) - E_2(p) + E_{kir}(p),$$

$$Z_1(p) = pL_1; \quad Z_2(p) = -pL_2 - R_2; \quad Z_3(p) = \frac{1}{pC};$$

$E_{kir}(p) = L_1 i_1(0) - L_2 i_2(0) - \frac{u_C(0)}{p}$. - induktivlikdagi va sig'imdagi kuchlanishlar boshlang'ich qiymatlarining operatorlari.

$i_{Li}(0) = 0$ va $u_C(0) = 0$ bo'lganda tenglama umumiy ko'rinishda quyidagicha yoziladi:

$$\sum_{k=1}^n I_k(p)Z_k(p) = \sum_{j=1}^m E_j(p).$$

Bu muvozanat tenglama - Kirxgof ikkinchi qonunining operator shaklidagi tenglamasidir.

O'tkinchi jarayonlarni operator usulida hisoblashning umumiy tartibi.

Hisoblashning asosiy bosqichlari quyidagilardan iborat:

1) zanjirning kommutatsiyagacha bo'lgan holati hisoblanib, kommutatsiya qonunlari asosida bog'liq bo'lmagan boshlang'ich shartlar aniqlanadi;

2) zanjirning kommutatsiyadan keyingi holati uchun ekvivalent operator sxemasi tuziladi;

3) operator shakldagi sxema uchun elektr muvozanat tenglamalari tuziladi;

4) elektr muvozanat tenglamalari noma'lum tok yoki kuchlanishlarga nisbatan yechiladi.

5) tasvirlarga mos originallarni topib, tok va kuchlanishlar vaqt bo'yicha o'zgarishi aniqlanadi. Buning uchun Laplas formulasidan foydalaniladi.

Agar izlanayotgan tok yoki kuchlanish ifodasi ratsional kasr ko'rinishida bo'lsa, u holda uni *yoyish (formulasi)teoremasiga* asosan oddiy kasrlarga ajratib, originallarini jadvaldan topib olish mumkin.

Operator usuli asosan quyidagi ikki banddan iborat:

1) tasvirlarni izlanayotgan qiymatlarga nisbatan aniqlab, muvozanat tenglamalarini tuzish;

2) tasvirdan originalga o'tib, vaqt bo'yicha o'zgaruvchi funksiyani aniqlash.

Tasvirdan vaqt funksiyasiga o'tish. Operator usuli yordamida o'tkinchi jarayonlarni tahlil qilishda tasvirdan vaqt funksiyasiga qayta o'tish yo'llari har xil bo'lishi mumkin.

I- yo‘l - p operator funksiyasining unga mos t vaqt funksiyasiga bevosita teskari Laplas o‘zgartirishidan foydalanib o‘tish.

II- yo‘l - yoyish formulasi asosida o‘tish. Bu formula xarakteristik tenglamaning $H(p) = 0$ ildizlari bir xil qiymatlarga ega bo‘lmagan holda ishlatiladi.

Amalda eng ko‘p qo‘llanadigan yo‘l - yoyish formulasidir.

Yoyish formulasi. Originali topilishi lozim bo‘lgan tasvir $F(p) = \frac{G(p)}{H(p)}$

ratsional to‘g‘ri kasr ko‘rinishida berilgan bo‘lsin. Quyiagi ikki holati ko‘rib chiqamiz.

1. $H(p) = 0$ tenglama oddiy ildizlarga ega bo‘lgan holat. Operator shaklda berilgan ratsional to‘g‘ri kasrni unga mos vaqt funksiyasiga o‘tishda quyidagi yoyish formulasidan keng foydalaniladi:

$$\frac{G(p)}{H(p)} \stackrel{==}{=} f(t) = \sum_{k=1}^m \frac{G(p_k)}{H'(p_k)} e^{p_k t}, \quad (8.29)$$

bu yerda p_k - $H(p) = 0$ tenglamaning oddiy ildizlari.

Masala. Yoyish formulasidan foydalanib, quyidagi tasvir originali topilsin:

$$F(p) = \frac{1}{p(p+2)(p+5)} = \frac{G(p)}{H(p)}.$$

$H(p) = p(p+2)(p+5) = 0$ tenglamaning ildizlari:

$$p_1 = 0; \quad p_2 = -2; \quad p_3 = -5$$

Yoyish formulasiga ko‘ra:

$$F(p) = \frac{1}{p(p+2)(p+5)} \stackrel{==}{=} \frac{G(p)}{H(p)} \stackrel{==}{=} \frac{1}{2 \cdot 5} + \frac{e^{-2t}}{(-2)(-2+5)} + \frac{e^{-5t}}{(-5)(-5+2)} = \frac{1}{10} + \frac{2e^{-5t} - 5e^{-2t}}{30}$$

2. $H(p) = 0$ tenglama karrali(takrorlanadigan) ildizlarga ega bo‘lgan holat. Aytaylik, $H(p) = 0$ tenglama $p_1, p_2, \dots, p_n$ har xil ildizlarga ega bo‘lib, ulardagi p_1 ildiz m_1 marta, p_2 - m_2 marta va nihoyat p_n - m_n marta takrorlanadi.

Bunday holatda yoyish formulasi quyidagicha yoziladi:

$$\frac{G(p)}{H(p)} \stackrel{==}{=} f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{1}{(m_k - 1)!} \left[\frac{d^{m_k-1}}{dp^{m_k-1}} \frac{G(p)}{H(p)} e^{p_k t} \right]_{p=p_k}, \quad (8.30)$$

Masala. Yoyish formulasidan foydalanib, quyidagi tasvir originali topilsin:

$$F(p) = \frac{p+2}{(p-1)^2 p^3} = \frac{G(p)}{H(p)}.$$

Berilgan funksiya ikkinchi tartibli qutb $p_1 = 1$ va uchunchi tartibli qutb $p_2 = 0$ ga ega. Binibarin, $m_1 = 2$ va $m_2 = 3$.

$$\left[\frac{d}{dp} \frac{(p+2)e^{pt}}{p^3} \right]_{p=1} = (3t-8)e^t,$$

$$\left[\frac{d^2}{dp^2} \frac{(p+2)e^{pt}}{(p-1)^2} \right]_{p=0} = 2t^2 + 10t + 16.$$

(8.30) ga ko'ra:

$$F(p) = \frac{p+2}{(p-1)^2 p^3} = \frac{G(p)}{H(p)} = (3T-8)e^t + t^2 + 5t + 8.$$

Shuni aytib o'tish joizki, $m_1 = m_2 = \dots = m_n = 1$ da $(m_k - 1)! = 1$ bo'lganligi sababli (8.30) formula (8.29) ga o'tadi. Shuning uchun ham agar $H(p) = 0$ tenglama bir vaqtning o'zida ham oddiy ham karrali (takrorlanadigan) ildizlarga ega bo'lsa, u holda (8.29) va (8.30) formulalar oddiy va karrali (takrorlanadigan) ildizlar uchun alohida-alohida qo'llaniladi.

Yoyish formulasidagi quyidagi ba'zi xususiyatlarni eslatib o'tamiz:

1) yoyish formulasini har qanday boshlang'ich shartlarda va har xil shakldagi manba uchun ishlatish mumkin.

2) agar boshlang'ich shartlar nolga teng bo'lmasa, unda $G(p)$ ga ichki EYK lar ham kiradi.

3) agar $H(p) = 0$ xarakteristik tenglamada kompleks qo'shma ildizlari bo'lsa, u holda yoyish formulasida bu ildizlar haqiqiy qiymatni beradi.

4) agar elektr zanjiriga ta'sir etuvchi manba sinusoidal, masalan $E_m \sin(\omega t + \psi)$ bo'lsa, uning tasviri $\underline{E}_m \frac{1}{p - j\omega}$ ko'rinishida bo'ladi, bu yerda $\underline{E}_m = E_m e^{j\psi}$ - kompleks amplituda. Yoyish formulasining o'ng qismida kompleksdan oniy qiymatga o'tishda j oldidagi koeffitsiyentni olish kerak.

5) murakkab zanjirlarda ta'sir etuvchi manbalar sinusoidal bo'lsa, majburiy tashkil etuvchilarni simvolik usulda yechib olish maqsadga muvofiq.

O'tkinchi jarayonlarni operator usuli yordamida hisoblash. Bu usul yordamida hisoblashni quyidagi zanjir uchun keltiramiz.

1. R, L elementli zanjirni o'zgaras kuchlanish U_0 ga ulash (8.4-rasm). Zanjirdagi operator shakldagi o'tkinchi tok $i(t)$ quyidagi ko'rinishga ega:

$$I(p) = \frac{U(p)}{Z(p)} = \frac{\frac{U_0}{p}}{R + pL} = \frac{U_0}{R} \left[\frac{R}{p(R + pL)} \right] = \frac{U_0}{R} \left[\frac{1}{p} - \frac{1}{p - \frac{R}{L}} \right],$$

bu esa original $i(t) = \frac{U_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$ ga mos keladi.

2. R, L zanjirni sinusoidal kuchlanish $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi)$ ga ulash. Darslik ilovasida keltirilgan jadvalda berilganga asosan zanjirga berilgan kuchlanish $u(t)$ ning funksiyasi quyidagi tasvirga mos keladi:

$$U(p) = U_m \frac{p \sin \varphi + \omega \cos \varphi}{p^2 + \omega^2}.$$

Demak, operator shaklidagi o'tkinchi tok

$$I(p) = \frac{U(p)}{Z(p)} = U_m \frac{p \sin \varphi + \omega \cos \varphi}{(p^2 + \omega^2)(R + pL)} = \frac{\left(\frac{U_m}{L} \right) (p \sin \varphi + \omega \cos \varphi)}{(p + j\omega)(p - j\omega) \left(p + \frac{R}{L} \right)}$$

ga teng bo'ladi. Bu tasvirdan to'g'ridan to'g'ri jadvaldan foydalanib originalga o'tish mumkin emas. Bu murakkab kasrni yoyish teoremasiga asosan oddiy kasrlarga ajratamiz. Uning mohiyati shundaki, ildizlari o'zaro teng bo'lmagan ko'p hadli funksiya $H(p)$ ning ildizlarini yoyib, uni oddiy kasrlar yig'indisi tarzida ifodalaymiz:

$$\frac{G(p)}{H(p)} = \frac{A_1}{p - p_1} + \frac{A_2}{p - p_2} + \dots + \frac{A_n}{p - p_n} = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{p - p_k},$$

bu yerda $A_1, A_2, \dots, A_n$ - yoyish koeffitsiyentlarini ifodalovchi oddiy haqiqiy sonlar, $p_1, p_2, \dots, p_n - H(p) = 0$ tenglamaning ildizlari.

Yoyish teoremasidan foydalanib manba kuchlanishi sinusoidal o'zgaradigan holat uchun zanjirdagi o'tkinchi tok ifodasini topamiz:

$$i(t) = I_m \left[\frac{U_m e^{j\omega t}}{Z(j\omega)} + \sum_{k=1}^n \frac{U_m e^{p_k t}}{(p_k - j\omega) Z'(p_k)} \right] =$$

$$= \left[\frac{U_m e^{j\psi} e^{j\omega t}}{R + j\omega L} + \frac{U_m e^{j\psi} e^{-\frac{R}{L}t}}{\left(-\frac{R}{L} - j\omega\right)L} \right] =$$

$$= \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{U_m}{Z} \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t},$$

bu yerda $p_1 = -\frac{R}{L}$, $Z'(p_1) = L$, $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$.

Nazorat savollari

1. Kommutatsiyaning birinchi va ikkinchi qonunlariga ta'rif bering va isbotlang.
2. O'tkinchi jarayonning erkin va turg'un tashkil etuvchilari nimani bildiradi?
3. R va L ketma-ket ulangan zanjirdagi o'tkinchi jarayonlarni bayon eting. Vaqt doimiysi nima? U qanday birlikda o'lchanadi?
4. Shoxobchalanmagan R, L, C zanjirda qanday shart bajarilganda aperiodik va tebranma jarayonlar paydo bo'ladi? Bu hollarda o'tkinchi jarayonning erkin tashkil etuvchisi qanday aniqlanadi?
5. Bunday zanjir o'zgarmas yoki sinusoidal kuchlanishga ulanganida nimalar sodir bo'ladi?
6. Zanjirlar xarakteristik tenglamasini qanday usullar bilan tuzish mumkin? Bu usullarning afzallik va kamchiliklari nimadan iborat?
7. O'tkinchi jarayonlarni hisoblashning operator usulini bayon etib bering.
8. Laplas almashtirishi nima?
9. Operator shaklda tok va kuchlanishlar qanday ifodalanadi?
10. Om va Kirxgof qonunlarini operator shaklida yozing.
11. O'tkinchi jarayonlarni hisoblashda Dyumel integralini qo'llash tartibini aytib bering!

9- BOB. TARQOQ PARAMETRLI ELEKTR ZANJIRLARI

9.1. Umumiy ma'lumotlar

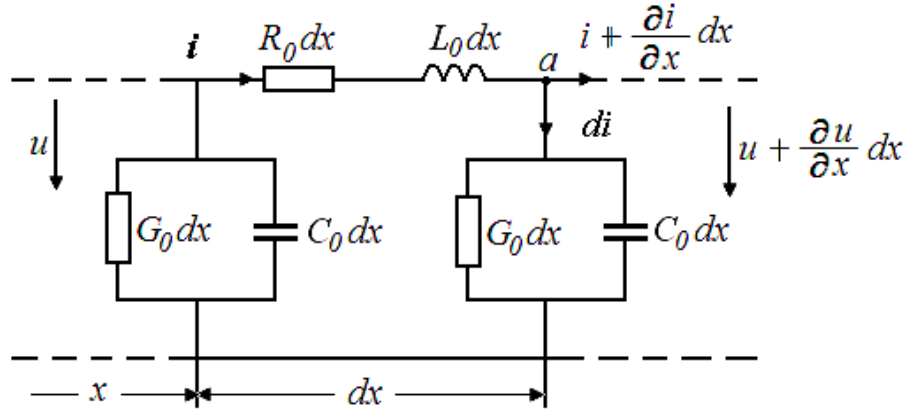
Avvalgi boblarda zanjirning R , G , L va S parametrlari uning uzunligi bo'ylab taqsimlanmagan holatda zanjirda yuz berayotgan elektromagnit jarayonlarni o'rgandik. Ammo, ko'pchilik hollarda, masalan, elektr energiyasi va aloqa uzatish liniyalarida kuchlanish va tok qiymatlari liniya bo'ylab uning bir nuqtasidan ikkinchi nuqtasiga uzluksiz o'zgarib boradi. Bunga asosiy sabab liniya(zanjir) parametrlari (R , G , L , S) uning uzunligi bo'ylab taqsimlanganligidir. Bunday zanjirlar *tarqoq parametrlil zanjirlar* deb ataladi. Elektr zanjirlarida elementlarni o'zaro bog'lab turuvchi simlarning uzunliklari bir necha yuz metrdan oshganda, magnit zanjirlarida esa magnit o'tkazgich uzunligi bir necha santimetrdan oshganda elektr simlaridagi kuchlanish va toklarni, magnit o'tkazgichlaridagi magnit kuchlanish va magnit oqimlarini ularning uzunliklari bo'ylab o'zgarishlarini hisobga olmaslik, elektr va magnit zanjirlarida yuz berayotgan jarayonlarni hisoblashda kata xatoliklarga olib keladi.

Tarqoq parametrlil zanjirlarni o'rganishga kirishishdan avval, zanjir tahlilini soddalashtirish maqsadida uning parametrlarini zanjir uzunligi bo'ylab bir tekis taqsimlangan, deb hisoblaymiz. Bunday zanjir(liniya)lar *bir jinsli zanjir(liniya)lar* deb ataladi. Bunday liniyalarga yuqori kuchlanishli elektr uzatish liniyalari, impulsli tok va kuchlanish ta'sirida bo'lgan transformator va elektr mashinalarining chulg'amlari, kabelli telefon va telegraf liniyalari, temir yo'l transporti tizimidagi avtoblokirovkali relsli liniyalar misol bo'la oladi.

9.2. Bir jinsli liniyaning differensial tenglamalari

Bir jinsli liniyani o'zaro ketma-ket ulangan va uzunligi dx ga teng bo'lgan elementar bo'lakchalar ko'rinishida tasvirlaymiz (9.1- rasm). Har bir liniya bo'lakchasi $R_0 dx$ aktiv qarshilik, $L_0 dx$ induktivlik, $G_0 dx$ aktiv o'tkazuvchanlik va $C_0 dx$ sig'im bilan tavsiflanadi, bu yerda R_0 [$\frac{\Omega}{m}$], L_0 [$\frac{H}{m}$], G_0 [$\frac{S}{m}$], C_0 [$\frac{F}{m}$] – mos ravishda liniya simlarining har metriga to'g'ri keladigan aktiv qarshiligi va induktivligi hamda liniya simlari orasidagi aktiv o'tkazuvchanligi va sig'imi.

R_0 , L_0 , G_0 , C_0 parametrlar bir jinsli liniyaning *birlamchi parametrlari* deb ataladi. Shuni ta’kidlash lozimki, R_0 - liniya simlarining qarshiligi, G_0 esa – liniya simlari orasidagi izolatsiya o’tkazuvchanligi bo‘lganligi sababli $R_0 \neq \frac{1}{G_0}$.



9.1- rasm

Bir jinsli liniyadagi tok va kuchlanishlar bir paytning o‘zida ikkita o‘zaro bog‘liq bo‘lmagan o‘zgaruvchi – x koordinata va t vaqtning funksiyasi hisoblanadi. Agar liniya bo‘lakchasining x koordinatali boshlanishida tok i bo‘lsa, u holda liniyaning $(x + dx)$ nuqtasida tok $\frac{\partial i}{\partial x} dx$ ga farq qiladi va $\left(i + \frac{\partial i}{\partial x} dx\right)$ ga teng bo‘ladi. Xuddi shuningdek kuchlanish uchun u va $\left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx\right)$ bo‘ladi.

9.1- rasmdagi zanjir berk konturi uchun Kirxgof 2- qonuni asosida quyidagi tenglamani tuzamiz:

$$-u + R_0 dx i + L_0 dx \frac{\partial i}{\partial t} + \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx\right) = 0.$$

Ifodani dx ga bo‘lgandan so‘ng:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}. \quad (9.1)$$

Zanjirning a tuguni uchun Kirxgof 1- qonuni asosida quyidagi tenglamani tuzamiz:

$$i - di - \left(i + \frac{\partial i}{\partial x} dx\right) = 0$$

$$\text{yoki } i - \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) G_0 dx - C_0 dx \frac{\partial}{\partial t} \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) - \left(i + \frac{\partial i}{\partial x} dx \right) = 0.$$

Agar oxirgi tenglamadagi ikkinchi tartibli orttirmani hisobga olmasak va ayrim soddalashtirishlarni amalga oshirsak, u holda quyidagi tenglamani hosil qilamiz:

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (9.2)$$

(9.1) va (9.2) tenglamalar *bir jinsli liniyaning differensial (telegraf) tenglamalari* deb ataladi. Ulardagi «—» ishora tok va kuchlanishlarni liniya boshi (manba) dan oxiri (iste'molchi) ga qarab *kamayib* borishini bildiradi.

Ushbu tenglamalar yordamida berilgan boshlang'ich $i|_{t=0}$; $u|_{t=0}$ va

chegaraviy $i|_{x=0}$; $u|_{x=0}$ yoki $i|_{x=x_m}$; $u|_{x=x_m}$ shartlarga asoslanib

liniyaning istalgan nuqtasidagi tok va kuchlanishlar qiymatlarini topish mumkin bo'ladi, bu yerda $x_m = l$ - bir jinsli liniyaning uzunligi. Bu tenglamalar tok va kuchlanishlarni vaqt bo'yicha har qanday o'zgarishiga ham to'g'ri keladi.

9.3. Bir jinsli liniyaning kompleks shakldagi tenglamalari

Ikki simli bir jinsli elektr energiyasi uzatish liniyasining kirish qismi (boshi) ga ω burchak chastotali sinusoidal kuchlanish berilgan bo'lsin. Liniya chiziqli zanjirlar turkumiga mansub bo'lganligi sababli uning barcha nuqtalaridagi tok va kuchlanishlar ham sinusoidal bo'ladi. Shularni hisobga olgan holda (9.1) va (9.2) tenglamalarni tok va kuchlanishlarning ta'sir etuvchi qiymatlari uchun kompleks shaklda quyidagicha yozishimiz mumkin:

$$-\frac{d\underline{U}}{dx} = (R_0 + j\omega L_0) \underline{I} = \underline{Z}_0 \underline{I}, \quad (9.3)$$

$$-\frac{d\underline{I}}{dx} = (G_0 + j\omega C_0) \underline{U} = \underline{Y}_0 \underline{U}, \quad (9.4)$$

bu yerda $\underline{Z}_0$, $\underline{Y}_0$ - liniyaning bo'ylama uzunlik birligidagi kompleks qarshiligi va ko'ndalang o'tkazuvchanligi bo'lib, $\underline{Z}_0 \neq \frac{1}{\underline{Y}_0}$.

(9.3) tenglamani differensiallab, (9.4) tenglamani hisobga olgan holda quyidagi 2- tartibli bir jinsli differensial tenglamani hosil qilamiz:

$$\frac{d^2 \underline{U}}{dx^2} = \underline{\gamma}^2 \underline{U} \quad \text{yoki} \quad \frac{d^2 \underline{U}}{dx^2} - \underline{\gamma}^2 \underline{U} = 0, \quad (9.5)$$

bunda $\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta$ – elektromagnit to‘lqinni liniya bo‘ylab *tarqalish koeffitsiyenti*, α - to‘lqinni *susayish yoki so‘nish koeffitsiyenti*, β - to‘lqinni *faza koeffitsiyenti*, $[\gamma] = [\alpha] = [\beta] = [\frac{1}{m}]$.

(9.5) tenglamaning yechimi quyidagicha yoziladi:

$$\underline{U} = \underline{A}_1 e^{-\underline{\gamma}x} + \underline{A}_2 e^{\underline{\gamma}x} = \underline{A}_1 e^{-\alpha x - j\beta x} + \underline{A}_2 e^{\alpha x + j\beta x}. \quad (9.6)$$

$\underline{A}_1$ va $\underline{A}_2$ integrallash doimiylari liniya boshi yoki oxiridagi kuchlanish va toklar qiymatlari yordamida topiladi. Liniyadagi tok (9.3) ga ko‘ra:

$$\underline{I} = \frac{1}{\underline{Z}_0} \frac{d\underline{U}}{dx} = \frac{\underline{\gamma}}{\underline{Z}_0} (\underline{A}_1 e^{-\underline{\gamma}x} - \underline{A}_2 e^{\underline{\gamma}x}) = \frac{\underline{A}_1}{\underline{Z}_T} e^{-\underline{\gamma}x} - \frac{\underline{A}_2}{\underline{Z}_T} e^{\underline{\gamma}x}, \quad (9.7)$$

bu yerda $\underline{Z}_T = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} = Z_T e^{j\varphi_T}$ - liniyaning *to‘lqin yoki xarakteristik qarshiligi* bo‘lib, u liniyaning ixtiyoriy qismida bir xil qiymatga ega bo‘ladi.

$\underline{\gamma}$ va $\underline{Z}_T$ parametrlar bir jinsli liniyaning *ikkilamchi parametrlari* deb ataladi.

1- masala. Ikkita mis simdan iborat havo elektr uzatish liniyasi berilgan. O‘tkazgichlar ko‘ndalang kesimining radiusi $a = 10 \text{ mm}$, ular orasidagi masofa $b = 2718 \text{ mm}$. Bir jinsli liniyaning birlamchi parametrlari topilsin. Misning solishtirma qarshiligi $\rho = 0,018 \text{ m}\Omega \cdot \text{m}$, havoning solishtirma o‘tkazuvchanligi $\sigma = 1,79 \cdot 10^{-20} \text{ S/km}$. Liniyaning birlamchi parametrlari chastotaga bog‘liq emas, sirt va o‘tkazgichlar yaqinlik effektlari hisobga olinmasin.

Yechish. Liniyaning bir km uzunlikdagi aktiv qarshiligi:

$$R_0 = \frac{2\rho}{\pi a^2} = \frac{2 \cdot 0,018 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 10^{-4}} = 0,115 \text{ } \Omega / \text{km}.$$

Liniyaning induktivligi o‘ramlari soni birga teng bo‘lgan g‘altak induktivligi sifatida hisoblanadi, ya’ni:

$$L_0 = \frac{\mu\mu_0}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{4\pi \cdot 10^{-4}}{\pi} \cdot \ln 271,8 = 2,24 \text{ mH / km}.$$

Ikkita o'tkazgichli liniyaning uzunlik birligidagi aktiv o'tkazuvchanligi va sig'imi mos ravishda quyidagicha hisoblanadi:

$$G_0 = \frac{\sigma\pi}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} = \frac{1,79 \cdot 10^{-20} \cdot 3,14}{\ln 271,8} = 10^{-20} \text{ S / km},$$

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0\pi}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 3,14}{\ln 271,8} = 4,95 \text{ pF/km}.$$

9.4. Bir jinsli liniyaning giperbolik shakldagi tenglamalari

Agar liniya boshi yoki oxiridagi tok va kuchlanish ma'lum bo'lsa, u holda integrallash doimiylari bo'lgan $\underline{A}_1$ va $\underline{A}_2$ larni aniqlash mumkin. (9.6) va (9.7) tenglamalarda $x=0$ deb hisoblab, liniya boshidagi kuchlanish va tok uchun quyidagilarni hosil qilamiz:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}_1 + \underline{A}_2, \quad \underline{I}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_T}(\underline{A}_1 - \underline{A}_2).$$

Bu tenglamalarni $\underline{A}_1$ va $\underline{A}_2$ larga nisbatan yechib, integrallash doimiylarini aniqlaymiz:

$$\underline{A}_1 = \frac{1}{2}(\underline{U}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_T), \quad \underline{A}_2 = \frac{1}{2}(\underline{U}_1 - \underline{I}_1 \underline{Z}_T).$$

Ushbu ifodalarni (9.6) va (9.7) tenglamalarga qo'yib, liniyaning istalgan nuqtasidagi kuchlanish va tok ifodalarini hosil qilamiz:

$$\underline{U} = \frac{1}{2}(\underline{U}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_T)e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}(\underline{U}_1 - \underline{I}_1 \underline{Z}_T)e^{\gamma x},$$

$$\underline{I} = \frac{1}{2}\left(\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_T} + \underline{I}_1\right)e^{-\gamma x} - \frac{1}{2}\left(\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_T} - \underline{I}_1\right)e^{\gamma x}.$$

$$\text{Agar } \frac{1}{2}(e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}) = sh(\gamma x), \quad \frac{1}{2}(e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}) = ch(\gamma x)$$

ekanligini inobatga olsak, u holda yuqoridagi tenglamalarni quyidagicha yozishimiz mumkin:

$$\underline{U} = \underline{U}_1 ch(\gamma x) - \underline{I}_1 \underline{Z}_T sh(\gamma x), \quad (9.8)$$

$$\underline{I} = \underline{I}_1 ch(\gamma x) - \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_T} sh(\gamma x). \quad (9.9)$$

(9.8) va (9.9) tenglamalar bir jinsli liniya boshidagi kuchlanish va tok qiymatlari ma'lum bo'lganda, liniyaning istalgan nuqtasidagi kuchlanish va tok qiymatlarini topish imkonini beradi.

Agar liniya oxiridagi kuchlanish $\underline{U}_2$ va tok $\underline{I}_2$ ma'lum bo'lsa, u holda liniyaning oxiridan ixtiyoriy x' masofadagi kuchlanish va tokni topish uchun (9.6) va (9.7) tenglamalardagi x o'rniga $(l - x')$ ni qo'yish kerak bo'ladi, ya'ni:

$$\underline{U} = \underline{A}_1 e^{-\gamma l} e^{\gamma x'} + \underline{A}_2 e^{\gamma l} e^{-\gamma x'} = \underline{A}_3 e^{\gamma x'} + \underline{A}_4 e^{-\gamma x'},$$

$$\underline{I} \underline{Z}_T = \underline{A}_1 e^{-\gamma l} e^{\gamma x'} - \underline{A}_2 e^{\gamma l} e^{-\gamma x'} = \underline{A}_3 e^{\gamma x'} - \underline{A}_4 e^{-\gamma x'},$$

bu yerda $\underline{A}_3 = \underline{A}_1 e^{-\gamma l}$, $\underline{A}_4 = \underline{A}_2 e^{\gamma l}$.

$x = 0$ da $\underline{U} = \underline{U}_2$ va $\underline{I} = \underline{I}_2$ bo'lganligi sababli $\underline{U}_2 = \underline{A}_3 + \underline{A}_4$, $\underline{I}_2 \underline{Z}_T = \underline{A}_3 - \underline{A}_4$ bo'ladi. Bu tengliklardan $\underline{A}_3$ va $\underline{A}_4$ ni quyidagicha topamiz:

$$\underline{A}_3 = \frac{1}{2}(\underline{U}_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_T), \quad \underline{A}_4 = \frac{1}{2}(\underline{U}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_T).$$

Shunday qilib:

$$\underline{U} = \frac{1}{2}(\underline{U}_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_T) e^{\gamma x'} + \frac{1}{2}(\underline{U}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_T) e^{-\gamma x'}, \quad (9.10)$$

$$\underline{I} = \frac{1}{2} \left(\underline{I}_2 + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_T} \right) e^{\gamma x'} + \frac{1}{2} \left(\underline{I}_2 - \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_T} \right) e^{-\gamma x'}, \quad (9.11)$$

yoki giperbolik funksiyalar orqali

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \operatorname{ch}(\gamma x') + \underline{I}_2 \underline{Z}_T \operatorname{sh}(\gamma x'), \quad (9.12)$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_T} \operatorname{sh}(\gamma x') + \underline{I}_2 \operatorname{ch}(\gamma x'). \quad (9.13)$$

(9.8), (9.9) va (9.12), (9.13) tenglamalarda giperbolik funksiyalar qatnashganligi uchun ular bir jinsli liniyaning *giperbolik shakldagi tenglamalari* deb ataladi.

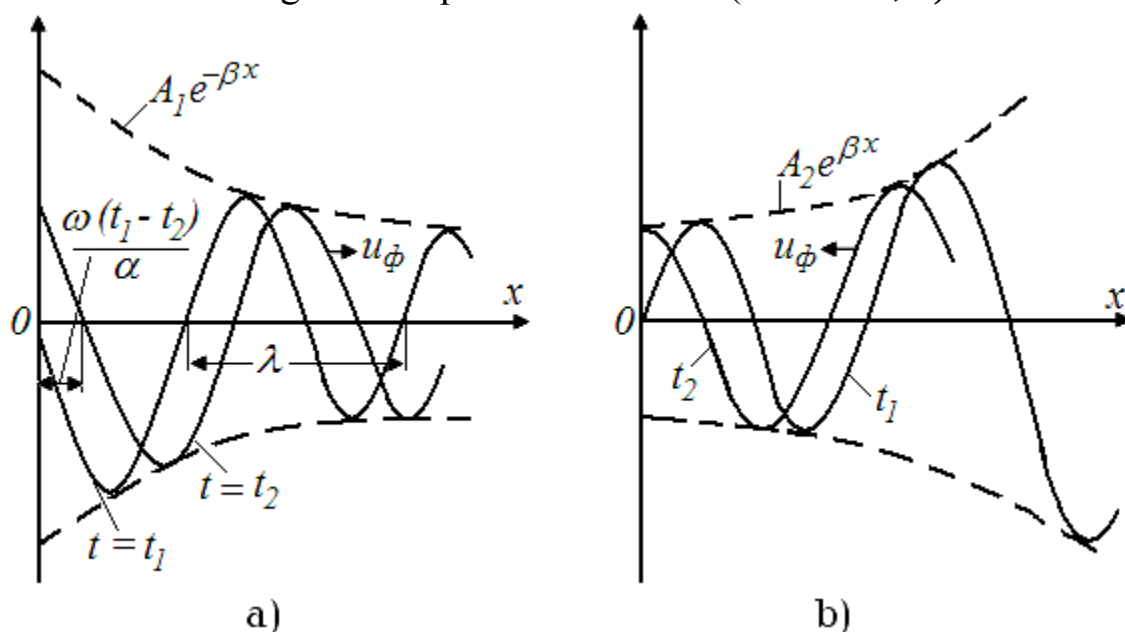
9.5. Bir jinsli liniyaning kuchlanish va tokning oniy qiymatlardagi tenglamalari

(9.6) va (9.7) tenglamalarga $\underline{A}_1 = A_1 e^{j\psi_1}$, $\underline{A}_2 = A_2 e^{j\psi_2}$, $\underline{Z}_T = Z_T e^{j\varphi}$ va $\underline{\gamma} = \alpha + j\beta$ larni qo'yib quyidagilarni hosil qilamiz:

$$u = \sqrt{2} A_1 e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x + \psi_1) + \sqrt{2} A_2 e^{\alpha x} \times \sin(\omega t + \beta x + \psi_2) = u_T + u_a; \quad (9.14)$$

$$i = -\frac{\sqrt{2}}{Z_T} A_1 e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x + \psi_1 - \varphi) - \frac{\sqrt{2}}{Z_T} A_2 e^{\alpha x} \sin(\omega t + \beta x + \psi_2 - \varphi) = i_T - i_a. \quad (9.15)$$

(9.14) va (9.15) tenglamalar bir jinsli liniyaning *kuchlanish va tokning oniy qiymatlaridagi tenglamalari* deb ataladi. Ushbu tenglamalardagi har bir qo'shiluvchi yuguruvchi to'liqin sifatida qaralishi mumkin, unda u_T va i_T kuchlanish va tokning tushuvchi to'liqlari (9.2- rasm, a), u_a va i_a esa – kuchlanish va tokning aks to'liqlari deb ataladi (9.2- rasm, b).



9.2- rasm

$x = x_1$ nuqtada (9.14) va (9.15) tenglamalardagi har bir qo'shiluvchi $t = t_1$ vaqtning davriy funksiyasidir va har bir qo'shiluvchi liniya bo'ylab so'nuvchi to'liqindir. To'liqinni liniya bo'ylab so'nishi liniyadagi energiya isrofi tufayli sodir bo'ladi, to'liqin fazasining o'zgarishi esa uning tezligini cheklanganligi bilan izohlanadi.

Tebranish fazasi siljishining tezligiga to'liqinning fazaviy tezligi deb ataladi. Bunda to'liqin fazasi vaqt va koordinataga bog'liq emas, ya'ni tushuvchi to'liqin uchun:

$$\omega t - \beta x + \psi_1 = \text{const},$$

bundan $\frac{d}{dt}(\omega t - \beta x + \psi_1) = 0$ yoki $\frac{dx}{dt} = \mathcal{G}_F = \frac{\omega}{\beta}.$

To‘lqinning tarqalish yo‘nalishi bo‘yicha tebranish fazasi 2π ga farq qiluvchi eng yaqin ikki nuqta orasidagi masofa to‘lqin uzunligi deb ataladi, ya’ni:

$$\omega t - \beta(x + \lambda) + \psi_1 = \omega t - \beta x + \psi_1 - 2\pi$$

yoki $\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$.

Oxirgi tenglikdan β ni topib, uni fazaviy tezlik ifodasiga qo‘ysak:

$$\vartheta_F = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\lambda}{T},$$

ya’ni to‘lqin $t = T$ vaqt mobaynida $x = \lambda$ masofa yo‘l bosib ulguradi. Agar liniyaning uzunligi undagi elektromagnit to‘lqin uzunligiga yaqin bo‘lsa, u holda bunday liniya uzun liniya deb ataladi.

Shuni ta’kidlash joizki, aks to‘lqin uchun $\vartheta_F = -\frac{\omega}{\beta}$ ifodani hosil qilishimiz mumkin. Undagi manfiy ishora aks to‘lqin tushuvchi to‘lqinga qarama-qarshi yo‘nalishda harakat qilishini bildiradi.

Shunday qilib, bir jinsli liniyadagi kuchlanish yoki tok oniy qiymatlarini bir-biriga qarama-qarshi yo‘nalgan ikkita to‘lqin yig‘indisi ko‘rinishida qarash mumkin. Bunda liniyadagi har bir to‘lqin harakat yo‘nalishi bo‘ylab so‘nib boradi.

To‘lqinni tushuvchi va aks tashkil etuvchilarga ajratish liniyadagi elektromagnit jarayonlarni to‘laroq tushunish va tahlil qilishni osonlashtiradi. Fizik nuqtai nazardan esa liniyada faqat natijaviy kuchlanish va tok mavjuddir.

9.6. Bir jinsli liniyaning ikkilamchi parametrlari

Bir jinsli liniyaning ikkilamchi yoki xarakteristik parametrlariga susayish koeffitsiyenti α , faza koeffitsiyenti β va to‘lqin qarshiligi Z_T kiradi. Bu parametrlar liniyaning birlamchi parametrlari R_0 , L_0 , G_0 , C_0 orqali quyidagicha ifodalanadi:

$$\begin{aligned} \underline{\gamma} &= \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \\ &= \sqrt{R_0 G_0 - \omega^2 L_0 C_0 + j\omega(L_0 G_0 + C_0 R_0)} = \alpha + j\beta. \end{aligned}$$

Bu ifodadan

$$\alpha^2 + j2\alpha\beta - \beta^2 = R_0 G_0 - \omega^2 L_0 C_0 + j\omega(L_0 G_0 + C_0 R_0),$$

bundan

$$\alpha^2 - \beta^2 = R_0 G_0 - \omega^2 L_0 C_0,$$

$$2\alpha\beta = \omega L_0 G_0 + \omega C_0 R_0.$$

Oxirgi ikkita tenglamani α va β larga nisbatan yechib, quyidagilarni hosil qilamiz:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left[R_0 G_0 - \omega^2 L_0 C_0 + \sqrt{(R_0^2 + \omega^2 L_0^2)(G_0^2 + \omega^2 C_0^2)} \right]}, \quad (9.16)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\omega^2 L_0 C_0 - R_0 G_0 + \sqrt{(R_0^2 + \omega^2 L_0^2)(G_0^2 + \omega^2 C_0^2)} \right]}. \quad (9.17)$$

(9.16) va (9.17) ifodalardan ko‘rinib turibdiki, α va β chastotaga bog‘liq ravishda o‘zgaradi.

Susayish va faza koeffitsiyentlarining yuqorida keltirilgan ifodalari amalda foydalanish uchun noqulay. Shuning uchun ko‘pincha bu ifodalar yuqori chastotali signallar uchun $R_0 \ll \omega L_0$ va $G_0 \ll \omega C_0$ ekanligini hisobga olib, quyidagi soddaroq ifodalar bilan almashtiriladi:

$$\alpha \approx \frac{R_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + \frac{G_0}{2} \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \quad (9.18)$$

$$\beta \approx \omega \sqrt{L_0 C_0}. \quad (9.19)$$

(9.18) ifodadan α chastotaga bog‘liq emas, degan tushuncha kelib chiqmasligi lozim, chunki yuqori chastotalarda R_0 va G_0 chastotaga bog‘liq ravishda o‘zgaradi.

(9.18) ifodadagi birinchi qo‘shiluvchi liniyaning R_0 qarshiligi hisobidan signalni susayishini, ikkinchi qo‘shiluvchi esa signalni G_0 o‘tkazuvchanlik hisobidan susayishni bildiradi.

To‘lqin fazaviy tezligi uchun (9.19) ni hisobga olgan holda quyidagi ifodani hosil qilish mumkin:

$$\mathcal{G}_F = \frac{\omega}{\beta} \approx \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}.$$

Bu tezlik chastota cheksiz katta bo‘lgan holat uchun eng katta fazaviy tezlik hisoblanadi. O‘zgarmas tok ($\omega = 0$) da faza koeffitsiyenti va fazaviy tezlik tushunchalari o‘z ma’nosini yo‘qotadi.

Kabel liniyalarida $\alpha \approx \beta \approx \sqrt{\frac{R_0 \cdot \omega C_0}{2}}$ bo‘lib, fazaviy tezlik

$$\mathcal{G}_F = \frac{\omega}{\beta} \approx \sqrt{\frac{2\omega}{R_0 C_0}}.$$

Elektromagnit maydon nazariyasida quyidagi tenglik isbotlangan:

$$L_0 C_0 = \frac{\varepsilon \mu}{c^2},$$

bu yerda $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ - yorug'likning vakuumdagi tezligi, ε , μ - tokli o'tkazgich atrofidagi muhit nisbiy dielektrik va magnit singdiruvchanliklari.

Chastota ortishi bilan fazaviy tezlik o'zining chegaraviy qiymati $\mathcal{G}_F = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$ ga intiladi.

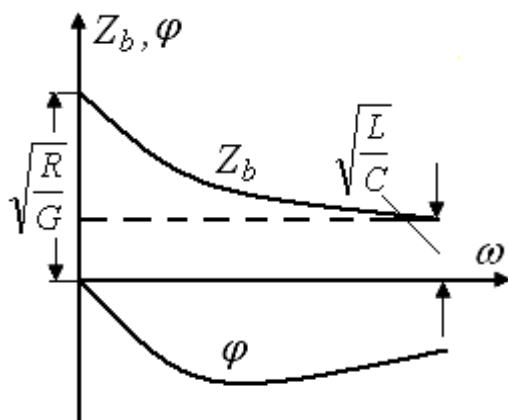
Liniyaning to'lqin qarshiligi tushuvchi va aks to'lqin kuchlanishiga mos keluvchi toklarni xarakterlaydi. Havo liniyalari uchun Z_T 300 – 400 Ω , kabel liniyalari uchun esa 60 – 80 Ω ni tashkil qiladi. Shuni qayd etish lozimki, havo liniyalarida to'lqinni tarqalish tezligi $\mathcal{G} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, to'lqin uzunligi esa chastotasi $f = 50 \text{ Gs}$ da $\lambda = \frac{v}{f} = 6 \cdot 10^6 \text{ m} = 6000 \text{ km}$ ni tashkil etadi, ya'ni elektr uzatish liniyalarida liniya uzunligi to'lqin uzunligidan ancha kam. Kabel liniyalarida C_0 havo liniyalarinikiga nisbatan juda katta, L_0 esa kichik. Shuning uchun ham havo liniyalarida Z_T kabel liniyalarinikiga nisbatan 6 – 8 marta katta bo'ladi.

Liniyaning to'lqin qarshiligi ifodasini quyidagicha o'zgartiramiz:

$$\underline{Z}_T = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} = \sqrt{\frac{\sqrt{R_0^2 + \omega^2 L_0^2}}{\sqrt{G_0^2 + \omega^2 C_0^2}}} e^{j \frac{1}{2} \arctg \frac{\omega(G_0 L_0 - R_0 C_0)}{R_0 G_0 + \omega^2 L_0 C_0}} = Z_T e^{j\theta}$$

bu yerda $Z_T = \sqrt{\frac{\sqrt{R_0^2 + \omega^2 L_0^2}}{\sqrt{G_0^2 + \omega^2 C_0^2}}}$ - to'lqin qarshilikning modul qiymati,

$\theta = \frac{1}{2} \arctg \frac{\omega(G_0 L_0 - R_0 C_0)}{R_0 G_0 + \omega^2 L_0 C_0}$ - to'lqin qarshilikning argument qiymati.



9.3-rasm

9.3-rasmda bir jinsli liniya to'lqin qarshiligining modul va argumentlarini chastotaga bog'liqligi keltirilgan.

$Z_T = f(\omega)$ xarakteristika shuni

ko'rsatadiki, $\omega = 0$ da $Z_T = \sqrt{\frac{R_0}{G_0}}$,

$\omega = \infty$ da esa $Z_T = \sqrt{\frac{L}{C}}$ bo'ladi.

2- masala. KM-4x2,52/9,4 rusumli

standart koaksial kabel liniyaning birlamchi va ikkilamchi parametrlarini aniqlang. Kabellar oʻzaro shaybasimon polietilen bilan izolyatsiyalangan. Chastota $f = 220 \text{ kGs}$, simlar diametri $d = 2,52 \text{ mm}$ va $D = 9,4 \text{ mm}$, izolyatsiyaning nisbiy dielektrik singdiruvchanligi $\varepsilon = 1,1$, dielektrik isroflar burchagining tangensi $\operatorname{tg} \delta = 0,5 \cdot 10^{-4}$, harorat $t = 20^\circ \text{C}$.

Yechish. Koaksial kabel liniyaning birlamchi parametrlari quyidagicha topiladi:

$$R_0 = 8,35 \sqrt{f} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) \cdot 10^{-2} = 8,35 \sqrt{220 \cdot 10^3} \left(\frac{1}{2,52} + \frac{1}{9,4} \right) \cdot 10^{-2} =$$

$$= 19,7 \text{ } \Omega / \text{km},$$

$$L_0 = 2 \ln \frac{D}{d} \cdot 10^{-4} = 2 \ln \frac{9,4}{2,52} \cdot 10^{-4} = 2,63 \cdot 10^{-4} \text{ H / km},$$

$$G_0 = \omega C_0 \operatorname{tg} \delta = 2\pi \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 46,5 \cdot 10^{-9} \cdot 0,5 \cdot 10^{-4} = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ S / km},$$

$$C_0 = \frac{\varepsilon}{18 \ln \frac{D}{d}} \cdot 10^{-6} = \frac{1,1 \cdot 10^{-6}}{18 \ln \frac{9,4}{2,52}} = 46,5 \cdot 10^{-9} \text{ F / km}.$$

Koaksial kabel liniyaning ikkilamchi parametrlarini hisoblashda agar $R_0 = 19,7 \ll \omega L_0 = 364$ va $G_0 = 3,2 \cdot 10^{-6} \ll \omega C_0 = 64000 \cdot 10^{-6}$ ekanligini hisobga olsak, u holda:

$$Z_T = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \sqrt{\frac{2,63 \cdot 10^{-4}}{46,5 \cdot 10^{-9}}} = 75 \text{ Om},$$

$$\alpha = \frac{R_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + \frac{G_0}{2} \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \frac{19,7}{2} \sqrt{\frac{46,5 \cdot 10^{-9}}{2,63 \cdot 10^{-4}}} + \frac{3,2 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{2,63 \cdot 10^{-4}}{46,5 \cdot 10^{-9}}} =$$

$$= 0,131 \text{ Np / km} = 1,14 \text{ dB / km},$$

$$\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0} = 2 \cdot 3,14 \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{2,63 \cdot 10^{-4} \cdot 46,5 \cdot 10^{-9}} =$$

$$= 4,83 \text{ rad / km}$$

Toʻlqin uzunligi va fazaviy tezlikni quyidagicha hisoblaymiz:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{6,28}{4,83} = 1,3 \text{ m}, \quad \vartheta_F = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 220 \cdot 10^3}{4,83} = 286000 \text{ km / c}.$$

Hisoblash natijalarini taqqoslash maqsadida R_0 va G_0 lar qiymatlarini hisobga olgan holda liniyaning ikkilamchi parametrlarini topamiz:

$$\underline{Z}_T = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} = \sqrt{\frac{19,7 + j2 \cdot 3,14 \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 2,63 \cdot 10^{-4}}{3,2 \cdot 10^{-6} + j2 \cdot 3,14 \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 46,5 \cdot 10^{-9}}} =$$

$$= 75,2e^{-j1^\circ 33'} \text{ Om},$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta = 0,13 + j4,8 \text{ km}^{-1}.$$

Ushbu topilgan qiymatlarni avvalgi ($R_0 = 0$, $G_0 = 0$) qiymatlar bilan o'zaro taqqoslab xatolik juda kichikligiga ishonch hosil qilamiz.

9.7. Bir jinsli liniyani to'rtqutblik ko'rinishda tasvirlash

Ushbu kitobning to'rtinchi bobida to'rtqutbliklar xossalarini o'rganganimizda biz elektr uzatish liniyalari ham to'rtqutbliklarga mansubligini aytib o'tgan edik. Quyida bir jinsli liniya parametrlarini to'rtqutblik xarakteristik koeffitsiyentlari orqali ifodalanishini ko'rsatamiz.

(9.12) va (9.13) tenglamalarni $x' = l$ uchun yozamiz:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cosh \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \underline{Z}_T \sinh \underline{\gamma} l,$$

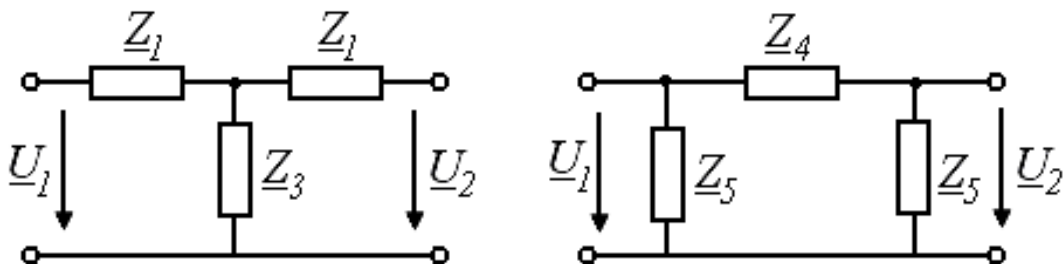
$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_T} \sinh \underline{\gamma} l + \underline{I}_2 \cosh \underline{\gamma} l.$$

Bu tenglamalarni to'rtqutblikning quyidagi tenglamalari bilan tenglashtiramiz:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}\underline{I}_2,$$

$$\underline{I}_1 = \underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2.$$

Natijada: $\underline{A} = \cosh \underline{\gamma} l$, $\underline{B} = \underline{Z}_T \sinh \underline{\gamma} l$, $\underline{C} = \frac{\sinh \underline{\gamma} l}{\underline{Z}_T}$, $\underline{D} = \underline{A} = \cosh \underline{\gamma} l$ larni hosil qilamiz. Ushbu tengliklardan ko'rinib turibdiki, bir jinsli liniyani simmetrik ($\underline{AD} - \underline{BC} = \cosh^2 \underline{\gamma} l - \sinh^2 \underline{\gamma} l = 1$) to'rtqutblik ko'rinishida ifodalash mumkin (9.4- rasm).



9.4- rasm

3–masala. Ikkita po‘lat simli liniyaning ikkilamchi parametrlari

$\underline{Z}_T = 1510e^{-j20^\circ 21'} \Omega$, $\alpha = 13,6 \text{ mNpkm}$, $\beta = 36,4 \text{ rad/km}$. Liniya uzunligi $l = 38 \text{ km}$, yuklama qarshiligi $\underline{Z}_{yu} = 1355e^{-j21,4^\circ}$ va liniya yuklamaga moslanmagan. Liniyaga berilgan kuchlanish $U_1 = 10 \text{ V}$, chastotasi $f = 800 \text{ Hz}$. Quyidagilar topilsin: 1) yuklamadagi kuchlanish va tok, liniya boshidagi tok, liniyaning yuklamaga ulangan holatdagi kirish qarshiligi; 2) yuklamada iste'mol qilinayotgan quvvat, liniyaga berilayotgan quvvat va uning FIK.

Yechish. Talab qilinayotgan kattaliklarni topishga kirishishdan avval hisoblashlarda kerak bo‘ladigan $\underline{\gamma}l$, $\underline{sh}\underline{\gamma}l$ va $\underline{ch}\underline{\gamma}l$ lar qiymatlarini aniqlaymiz:

$$\underline{\gamma}l = \alpha l + j\beta l = 13,6 \cdot 10^{-3} \cdot 38 + j36,4 \cdot 10^{-3} \cdot 38 = 0,505 + j1,385,$$

$$\underline{sh}\underline{\gamma}l = \text{sh}(0,505 + j1,385) = \text{sh } 0,505 \cos 1,385 + j \text{ch } 0,505 \sin 1,385 = 1,114e^{j85^\circ},$$

bu yerda $\text{sh } 0,505 = \frac{1}{2}(e^{0,505} - e^{-0,505})$ va $\text{ch } 0,505 = \frac{1}{2}(e^{0,505} + e^{-0,505})$ orqali hisoblanadi.

$$\underline{ch}\underline{\gamma}l = \text{ch}(0,505 + j1,385) = \text{ch } 0,505 \cos 1,385 + j \text{sh } 0,505 \sin 1,385 = 0,56e^{j68^\circ}.$$

Liniya oxiridagi kuchlanish (9.8) formula yordamida $x = l$ va $\underline{I}_{22} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{yu}}$

larni inobatga olib, quyidagicha aniqlanadi:

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{ch}\underline{\gamma}l + \frac{\underline{Z}_T}{\underline{Z}_{yu}} \underline{sh}\underline{\gamma}l} = \frac{10}{0,56e^{j68^\circ} + \frac{1510e^{-j20^\circ 21'}}{1355e^{j21,4^\circ}} 1,114e^{j85^\circ}} = 5,78e^{-j52,25^\circ} \text{ V}.$$

Yuklamadagi tok:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{yu}} = \frac{5,78e^{-j52,25^\circ}}{1355e^{j21,4^\circ}} = 4,27e^{-j73,3^\circ} \text{ mA}.$$

Liniya boshidagi tokni (7.13) formula yordamida topamiz:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 \underline{ch}\underline{\gamma}l + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_T} \underline{sh}\underline{\gamma}l = 5,78e^{j32,83^\circ} \text{ mA}.$$

Yuklamaga ulangan liniyaning kirish qarshiligi:

$$\underline{Z}_{kir} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \frac{10}{5,7810^{-3} e^{j32,83^\circ}} = 1732e^{-j32,83^\circ} \Omega.$$

9.8. Bir jinsli liniyaning xossalari

9.8.1. Signalni buzmaydigan liniya

Susayish koeffitsiyenti va fazaviy tezlik chastotaga funksional bog'liq bo'lishi telefon liniyalarida so'z talaffuzini, telegraf liniyalarida esa signalni buzilishiga olib keladi, chunki bunday holatlarda signal tarkibida yuqori garmonikalar mavjud bo'ladi.

Signalni buzmaydigan liniyada susayish koeffitsiyenti va fazaviy tezlik signal chastotasiga bog'liq bo'lmaydi. Bunda liniya boshidagi signal shakli uning oxiridagi shakli bilan bir xil bo'ladi. Signalni buzmaydigan liniya uchun Xevisayd tomonidan 1893 yilda topilgan quyidagi shart bajarilishi lozim:

$$\frac{R_0}{G_0} = \frac{L_0}{C_0}. \quad (9.20)$$

Bunda liniyaning ikkilamchi parametrlari quyidagicha aniqlanadi:

$$\alpha = \sqrt{R_0 G_0}, \quad \beta = \omega \sqrt{L_0 C_0}, \quad \vartheta_F = \frac{\omega}{\beta} \approx \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}, \quad Z_T = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}.$$

Shuni ta'kidlash joizki, amalda (9.20) shart odatda bajarilmaydi, chunki $\frac{L_0}{R_0}$ ning qiymati $\frac{C_0}{G_0}$ ning qiymatiga nisbatan ancha kichik.

Shuning uchun ham liniyadagi signalning susayishi har doim minimal (chegaraviy) qiymatdan yuqori bo'ladi. Bu holat, ayniqsa, kabel liniyalarida ko'proq kuzatiladi.

(9.20) shartni bajarilishiga sun'iy ravishda liniyaning birlamchi parametrlaridan birini o'zgartirib erishish mumkin. R_0 ni kamaytirish liniya simlarini qalinlashishiga, G_0 ni oshirish signal susayishini ortishiga olib keladi.

(9.20) shart bajarilishining eng maqbul yo'li – bu liniyaning ma'lum bir uzunlikdagi qismlariga sun'iy induktivlikni ulash yoki liniya simini nisbiy magnit singdiruvchanligi yuqori bo'lgan yupqa lentasimon material bilan qoplashdir.

9.8.2. Isrofsiz liniya

Ayrim hollarda, ayniqsa yuqori chastotali signallar liniya bo'ylab uzatilganda $\omega L_0 \gg R_0$ va $\omega C_0 \gg G_0$ bo'lganligi sababli liniyadagi isroflar hisobga olmaslik darajada kichik bo'ladi, ya'ni bunday liniyalarda

$$R_0 = 0, G_0 = 0. \quad (9.21)$$

(9.21) shart bajariladigan liniyalar *isrofsiz liniyalar* deb ataladi. Bunday liniyalar uchun uning ikkilamchi parametrlari quyidagilarga teng bo'ladi:

$$\gamma = j\omega\sqrt{L_0C_0} = j\beta, \quad \alpha = 0, \quad \beta = \omega\sqrt{L_0C_0}, \quad Z_T = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}},$$

$$\varphi_T = 0, \quad \vartheta_F = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L_0C_0}}, \quad \lambda = \frac{2\pi}{\beta}. \quad (9.22)$$

(9.22) tengliklar tahlili shuni ko'rsatadiki, liniyadagi susayish nolga teng va to'liq qarshilik aktiv bo'lib, chastotaga bog'liq emas. Isrofsiz liniyada fazaviy tezlik va to'liq uzunligi signalni buzmaydigan isrofli liniyadagidek bo'ladi.

Isrofsiz liniyada tenglamalardagi kompleks argumentli giperbolik funksiyalar haqiqiy argumentli oddiy trigonometrik funksiyalar bilan almashadi:

$$\underline{U} = \underline{U}_1 \cos \beta x - j \underline{I}_1 \underline{Z}_T \sin \beta x, \quad (7.23)$$

$$\underline{I} = \underline{I}_1 \cos \beta x - j \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_T} \sin \beta x, \quad (7.24)$$

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \cos \beta x + j \underline{I}_2 \underline{Z}_T \sin \beta x, \quad (7.25)$$

$$\underline{I} = \underline{I}_2 \cos \beta x + j \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_T} \sin \beta x. \quad (7.26)$$

Shuni aytib o'tish joizki, *liniya bo'ylab uzatilayotgan energiya elektr va magnit maydonlarining energiyalari yig'indisidan iborat bo'ladi*. Agar isrofsiz liniya oxiriga qarshiligi liniyaning to'liq qarshiligiga teng

yuklama ulansa, u holda liniyaning istalgan qismida $\frac{L_0 i^2}{2} = \frac{C_0 u^2}{2}$ shart bajariladi. Bunda tushuvchi to'liq yordamida yuklamaga olib borilayotgan energiya to'laligicha yuklama tomonidan iste'mol qilinadi va aks to'liq vujudga kelmaydi. Bunday liniya *muvofiglashtirilgan liniya* deb ataladi.

Agar yuklama qarshiligi liniyaning to'liq qarshiligidan farq qilsa, u holda liniya oxirida energiya elektr va magnit maydonlari o'rtasida qayta taqsimlanadi va liniyada aks to'liq paydo bo'ladi.

Chegaraviy holatda, ya'ni liniya oxiriga yuklama ulanmagan holat (salt ish rejimi)da, tushuvchi to'liq liniya oxiriga kelib cheksiz katta qarshilikka uchraydi, tok nolga teng bo'ladi va magnit maydonining energiyasi to'laligicha elektr maydoni energiyasiga o'tadi. Liniya oxiridagi

kuchlanish ikkilangan qiymatga teng bo'lib, liniyada ishorasi tushuvchi to'liq inshora bilan bir xil bo'lgan aks to'liq in paydo bo'ladi ($n_1 = 1$).

Boshqa bir chegaraviy holatda, ya'ni liniya oxiri qisqa tutashgan holat(qisqa tutashish rejimi)da tushuvchi to'liq in uchun liniya oxirida qarshilik va kuchlanish nolga teng bo'lib, elektr maydonining energiyasi to'raligicha magnit maydoni energiyasiga o'tadi. Liniyaning qisqa tutashgan oxiridagi tok ikkilangan qiymatga erishib, tushuvchi to'liq in ishorasiga qarama-qarshi ishorali aks to'liq in vujudga keladi ($n_2 = -1$).

$R_2 > Z_T$ bo'lganda $n_2 > 0$, $R_2 < Z_T$ bo'lganda esa $n_2 < 0$ bo'ladi. Shuning uchun ham 1- holatda kuchlanish ortib tok kamayadi, 2- holatda esa, aksincha, kuchlanish kamayib tok moslangan yuklama rejimiga ($n_2 = 0$) nisbatan ortadi.

9.8.3. Turg'un to'liqlar

Bir jinsli isrofsiz liniya oxirida aktiv quvvat nolga teng bo'lgan rejimlarni ko'rib chiqamiz. Bu rejimlar liniya oxirida qisqa tutashish, salt ish va reaktiv yuklama bo'lganda yuzaga keladi.

Salt ish rejimida $I_2 = 0$, $Z_{yuk} = \infty$ va isrofsiz liniya uchun $\alpha = 0$ bo'lganda (9.25) va (9.26) tenglamalar quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_2 \cos \beta x, \quad \underline{I} = j \frac{\underline{U}_2}{Z_T} \sin \beta x.$$

$\underline{U}_2 = U_2$ bo'lganda esa

$$u_0 = U_{2m} \cos \beta x \sin \omega t, \quad (9.27)$$

$$i_0 = \frac{U_{2m}}{Z_T} \sin \beta x \cos \omega t. \quad (9.28)$$

(9.27) va (9.28) *turg'un to'liq in tenglamalari* deb ataladi. Matematik jihatdan turg'un to'liq in ikkita funksiyaning ko'paytmasi ko'rinishida beriladi va albatta ikkita funksiya bittasining argumenti faqat vaqtga, ikkinchisining argumenti esa faqat koordinataga bog'liq bo'ladi.

Bir xil amplitudali to'g'ri va aks to'liqlarni ustma-ustlanish jarayoni turg'un to'liq in deb ataladi. Bir jinsli liniyada turg'un to'liq in uchta holatda yuzaga keladi: salt ish ($Z_{yu} = \infty$), qisqa tutashish ($Z_{yu} = 0$) va reaktiv yuklama ($Z_{yu} = jx$).

(9.27) va (9.28) tenglamalarni

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \sin(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \sin(\alpha - \beta)$$

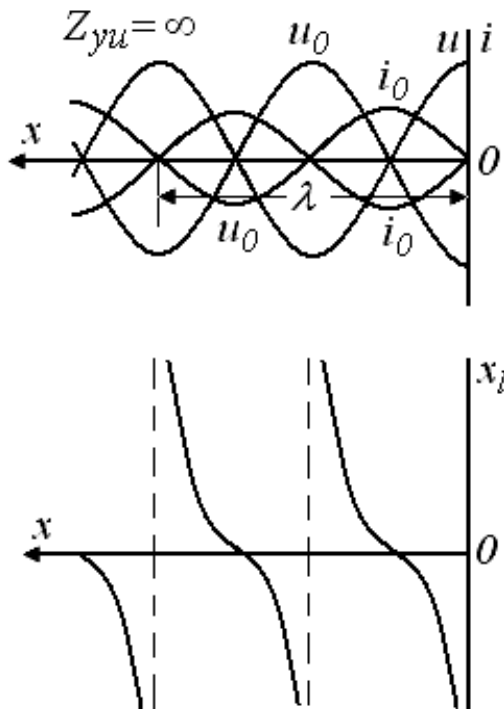
trigonometrik ayniyatdan foydalanib quyidagicha yozish mumkin:

$$u = \frac{U_{2m}}{2} \sin(\omega t + \beta x) + \frac{U_{2m}}{2} \sin(\omega t - \beta x),$$

$$i = \frac{U_{2m}}{2Z_T} \sin(\omega t + \beta x) + \frac{U_{2m}}{2Z_T} \sin(\omega t - \beta x).$$

Salt ish rejimida liniya oxirida ($x = 0$) va liniya oxiridan $x = \frac{k\pi}{\beta} = \frac{k\lambda}{2}$, ($k = 1, 2, 3, 4, \dots$) masofalardagi nuqtalarda vaqt t ning ixtiyoriy qiymatida kuchlanish maksimumga, tok esa nolga teng bo'ladi (9.5- rasm). Liniya oxiridan $x = \frac{(2k+1)}{2\beta} \pi = \frac{(2k+1)}{4} \lambda$ masofalardagi nuqtalarda kuchlanish nol qiymatga, tok esa maksimumga teng bo'ladi. Bu maksimum va nol nuqtalar liniya bo'ylab harakatlanmaydi.

$\sin \beta x$ va $\cos \beta x$ ning ishoralari bir xil bo'lgan liniyaning qismlarida tok kuchlanishdan 90° ga oldinda ($0 \leq x \leq \frac{\lambda}{4}$, $\frac{\lambda}{2} \leq x \leq \frac{3\lambda}{4}$ va boshqalar), $\sin \beta x$ va $\cos \beta x$ ning ishoralari har xil bo'lgan liniyaning qismlarida esa kuchlanish tokdan 90° oldinda ($\frac{\lambda}{4} \leq x \leq \frac{\lambda}{2}$, $\frac{3\lambda}{4} \leq x \leq \lambda$ va boshqalar) bo'ladi.



9.5- rasm

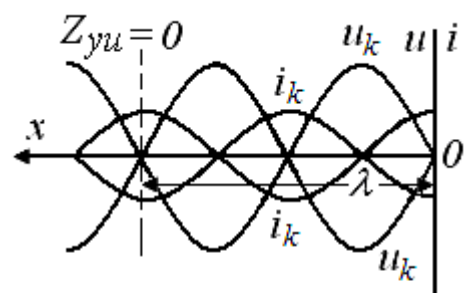
$0 < l < \frac{\lambda}{4}$ oraliqda salt ish rejimidagi liniyaning kirish qarshiligi sig'im xarakterga, $\frac{\lambda}{4} < l < \frac{\lambda}{2}$ oraliqda esa induktiv xarakterga ega bo'ladi. $l = \frac{\lambda}{4}$, $l = \frac{3\lambda}{4}$, ... qiymatlarda bu rejimdagi liniyaning kirish qarshiligi nolga teng bo'lib, zanjirning holati kuchlanishlar rezonansiga, $l = \frac{\lambda}{2}$, $l = \lambda$, ... qiymatlarda qarshilik cheksiz katta bo'lib, zanjirdagi holat esa toklar rezonansiga mos keladi.

Qisqa tutashish rejimida $Z_{yu} = 0$

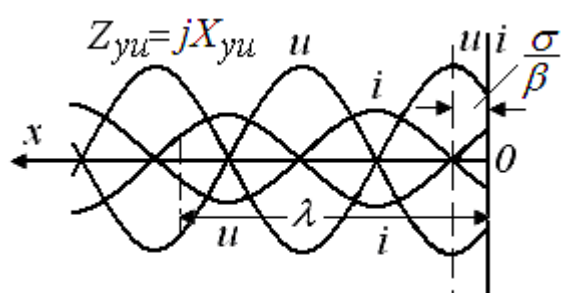
va $U_2 = 0$ bo'ladi. Liniyada hosil bo'lgan turg'un to'liqinni salt ish rejimidagidan farqi shundan iboratki, liniya oxirida kuchlanish nolga, tok esa o'zining maksimum qiymatiga teng bo'ladi (9.6-rasm). $0 < x < \frac{\lambda}{4}$ oraliqda liniyaning kirish qarshiligi induktiv xarakterga, $\frac{\lambda}{4} < x < \frac{\lambda}{2}$ oraliqda esa liniya sig'im xarakterga ega bo'ladi. $l = \frac{\lambda}{2}, l = \lambda, \dots$ qiymatlarda qisqa tutashtirilgan liniyaning kirish qarshiligi nolga teng bo'lib, zanjirdagi bu holat kuchlanishlar rezonansiga, $l = \frac{\lambda}{4}, l = \frac{3\lambda}{4}, \dots$ qiymatlarda liniyaning kirish qarshiligi cheksizga intiladi va zanjirning bu holati esa toklar rezonansiga mos keladi.

Reaktiv yuklamada, ya'ni $Z_{yu} = jX_{yu}$ da ham bir jinsli liniyada turg'un to'liqin hosil bo'ladi, lekin liniyaning oxiri ($x = 0$) da kuchlanish va tok qiymatlari ekstremal yoki nol bo'lmaydi (9.7- rasm).

Reaktiv yuklamaga ulangan isrofsiz bir jinsli liniyani unga berilgan kuchlanish chastotasi va liniya uzunligining qiymatlariga qarab induktiv yoki sig'im xarakterli zanjir ko'rinishida tasvirlash mumkin. Bunda ekvivalent induktivlik yoki sig'im qiymatlari noldan cheksizlikgacha bo'lgan qiymatlarni qabul qilishi mumkin.



9.6- rasm



9.7- rasm

Shunday qilib, ko‘rib chiqilgan uchala holatda ham liniyada turg‘un to‘lqinlar hosil bo‘ladi. Bunda kuchlanishning ekstremumlari va tokning nol va aksincha- kuchlanishning nol va tokning ekstremum qiymatlari liniya uzunligining chorak miqdoriga o‘zaro siljigan bo‘ladi.

Vaqtning istalgan paytida kuchlanish yoki tok tugunlarida quvvat nolga teng bo‘ladi va energiya liniyaning bu nuqtalari orqali uzatilmaydi. Lekin liniyaning kuchlanish va tok tugunlari orasidagi qismida energiya elektr va magnit maydonlari o‘rtasida almashinishi hisobidan uzatilib turadi.

Ko‘rib chiqilgan uchala holatda ham liniya va iste’molchida energiya isrofi kuzatilmaydi. *Liniyada yoki iste’molchida energiya isrofi paydo bo‘lishi liniyada yuguruvchi to‘lqin vujudga kelganligini bildiradi.*

4-masala. 3- masalada keltirilgan liniya parametrlaridan foydalangan holda liniya oxiridan qaytgan to‘lqin akslanish koeffitsiyenti va liniyaning kirish qarshiligini toping.

Yechish. Akslanish koeffitsiyenti:

$$\underline{P}_{yu} = \frac{\underline{Z}_{yu} - \underline{Z}_T}{\underline{Z}_{yu} + \underline{Z}_T} = 0,385e^{-j99,26^\circ}.$$

Liniyaning kirish qarshiligini quyidagi formula yordamida topishimiz mumkin:

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \underline{Z}_T \frac{\underline{Z}_{yu} + \underline{Z}_T th \underline{\gamma} l}{\underline{Z}_T + \underline{Z}_{yu} th \underline{\gamma} l} = \underline{Z}_T th(\underline{\gamma} l + \underline{n}),$$

bu yerda $th \frac{\underline{Z}_{yu}}{\underline{Z}_T}$ yoki $\underline{n} = \frac{1}{2} \ln \frac{\underline{Z}_T + \underline{Z}_{yu}}{\underline{Z}_T - \underline{Z}_{yu}}$ bo‘lib, $\underline{n}$ liniyaning to‘lqin qarshiligini yuklama bilan muvofiqlashtirilmaganligini bildiradi.

$\underline{Z}_1$ ni aniqlashda quyidagi ikki usuldan foydalanish mumkin:

1-usul. Avval $\underline{n}$ va $(\underline{\gamma} l + \underline{n})$ larni hisoblab topamiz, ya’ni:

$$\underline{n} = \frac{1}{2} \ln \frac{\underline{Z}_T + \underline{Z}_{yu}}{\underline{Z}_T - \underline{Z}_{yu}} = \frac{1}{2} \ln 2,6e^{j80,74^\circ} = \frac{1}{2} \ln 2,66 + j \frac{1}{2} \frac{80,74^\circ}{57,3^\circ} = 0,482 + j0,711,$$

$$(\underline{\gamma} l + \underline{n}) = 0,505 + j1,385 + 0,482 + j0,711 = 0,987 + j2,096 = x + jy,$$

bu yerda $x = 0,987 \text{ Np}$, $y = 2,096 \text{ rad}$, ya’ni u ikkinchi chorakda joylashadi.

$$th(\underline{\gamma} l + \underline{n}) = th(x + jy) = Te^{j\varphi_T} \text{ yoki}$$

$$T = \sqrt{\frac{ch2x - \cos 2y}{ch2x + \cos 2y}} = \sqrt{\frac{ch1,974 - \cos 4,192}{ch1,974 + \cos 4,192}} = 1,147,$$

$$tg \varphi_T = \pm \frac{\sin 2y}{sh2x} = \frac{\sin 4,192}{sh1,974} = -\frac{0,867}{3,516} = -0,247,$$

$$\varphi_T = \text{arctg}(-0,247) = -13^\circ 47'.$$

Yuqoridagi hisoblashlarga asoslanib $\underline{Z}_1$ ni topamiz:

$$\underline{Z}_1 = 1510e^{-j20^\circ 21'} 1,147e^{-j13^\circ 47'} = 1732e^{-j34^\circ 8'} \Omega.$$

2-usul. Giperbolik tangens funksiyani haqiqiy va mavhum qismlarga ajratib, liniyaning kirish qarshiligini topamiz:

$$\begin{aligned} th(x + jy) &= \frac{sh2x}{ch2x + \cos 2y} + j \frac{\sin 2y}{ch2x + \cos 2y} = \frac{sh1,974}{ch1,974 + \cos 4,192} + \\ &+ j \frac{\sin 4,192}{ch1,974 + \cos 4,192} = 1,114 - j0,275 = 1,143e^{-j13^\circ 50'}. \end{aligned}$$

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_T th(x + jy) = 1510e^{-j20^\circ 21'} 1,143 \cdot e^{-j13^\circ 50'} = 1728e^{-j34^\circ 11'} \text{ Om}.$$

Ta'kidlash lozimki, ko'rib chiqilgan ikkala usulning aniqlik darajasi deyarli bir xil bo'lsa-da, vaqt sarfiga ko'ra 2- usul tejamkorroq.

9.9. Tarqoq parametrlil zanjirlarda o'tkinchi jarayonlar to'g'risida

Ushbu bob boshida aytib o'tilganidek, bir jinsli ikkita simli liniya kuchlanishi va toki bir vaqtning o'zida bir-biri bilan o'zaro bog'lanmagan ikkita (t va x) o'zgaruvchilar funksiyasi bo'lganligi bois, liniyani tavsiflovchi (9.1) va (9.2) differensial tenglamalar xususiy hosilali ko'rinishida yozilgan edi.

Laplas o'zgartirishi yordamida bir jinsli liniyada yuz beradigan o'tkinchi jarayonlarni hisoblashni ko'rib chiqamiz. Agar (9.1) va (9.2) differensial tenglamalarda x o'zgaruvchini parameter, deb hisoblansa, u holda $u(x, t)$ va $i(x, t)$ funksiyalar tasvirlarini quyidagicha yozish mumkin:

$$\begin{aligned} u(x, t) \circ ==^\circ U(x, p) &= U, \\ i(x, t) \circ ==^\circ I(x, p) &= I. \end{aligned} \quad (9.29)$$

(9.29) ni hisobga olib, (9.1) va (9.2) differensial tenglamalar operator shaklda quyidagicha yoziladi:

$$-\frac{dU}{dx} = (R + pL)I - Li(x, 0),$$

$$-\frac{dI}{dx} = (G + pC)U - Cu(x,0), \quad (9.30)$$

bu yerda $i(x,0)$ va $u(x,0)$ - liniya x koodinatasida mos ravishda tok va kuchlanishlarning vaqt bo'yicha boshlang'ich qiymatlari.

p operator x ga bog'liq emasligi sababli va (9.30) differensial tenglamalarda p bo'yicha hosila ishtirok etmayotganligi bois, (9.1) va (9.2) tenglamalardan (9.30) ga o'tishda x bo'yicha xususiy hosila oddiy hosilaga almashtirilgan.

(9.30) dagi 1- tenglamani x bo'yicha differensiallab, unga 2- tenglamani qo'yib, quyidagi 2- tartibli differensial tenglamani hosil qilamiz:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = (R + pL)(G + pC)U + L \frac{di(x,0)}{dx} - C(R + pL)u(x,0). \quad (9.31)$$

Xuddi yuqoridagiga o'xshash, (9.30) dagi 2- tenglamani x bo'yicha differensiallab, unga 1- tenglamani qo'yib, quyidagi 2- tartibli differensial tenglamani hosil qilamiz:

$$\frac{d^2I}{dx^2} = (R + pL)(G + pC)I + C \frac{du(x,0)}{dx} - L(G + pC)i(x,0). \quad (9.32)$$

(9.31) va (9.32) tenglamalar odatdagi 2- tartibli differensial tenglamalar singari yechiladi.

To'liqinning liniya bo'ylab tarqalish koeffitsiyenti operator shaklda quyidagicha yoziladi:

$$\gamma(p) = \sqrt{(R + pL)(G + pC)}.$$

Nol boshlang'ich qiymatlarda (9.31) va (9.32) differensial tenglamalar quyidagi sodda ko'rinishda bo'ladi:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = \gamma^2 U, \quad (9.33)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = \gamma^2 I. \quad (9.34)$$

(9.33) va (9.34) operator differensial tenglamalar turg'un rejimdagi bir jinsli liniyaning (9.5) differensial tenglamalariga o'xshash.

Agar liniyadagi kuchlanish va toklar operator tasvirlari ko'rinishida olinsa va $Z_T(p) = \sqrt{\frac{R + pL}{G + pC}}$ ifoda liniya operator to'liqin qarshiligi

ekanligi inobatga olinsa, u holda (9.33) va (9.34) operator differensial tenglamalar yechimlari kompleks ko'rinishda hosil qilingan (9.5) va (9.6) yechimlarga o'xshash bo'ladi.

Umuman olganda, p operatorning transsendent funksiyalari bo'lgan $U(x, p)$ va $I(x, p)$ tasvirlardan ularning originallariga o'tish ma'lum darajada qiyinchiliklar to'g'iradi. Bunday holatlarda masala yechilishini osonlashtiruvchi ba'zi bir cheklovlar kiritiladi.

Masalan, bir jinsli liniya signalni buzmaydigan liniya, ya'ni $\frac{R}{L} = \frac{G}{C}$

va binobarin, $Z(p) = \sqrt{\frac{R}{L}}$, $\gamma = \sqrt{RG} + p\sqrt{LC}$, deb qabul qilinsa, u holda (9.33) va (9.34) differensial tenglamalar yechimlarini topish ancha osonlashadi.

Bu holatda kuchlanish va tok operator tasvirlari uchun yechim quyidagicha yozilishi mumkin:

$$U(p, x) = \left[F_1(p) e^{-p \frac{x}{v}} \right] e^{-\alpha x} + \left[F_2(p) e^{p \frac{x}{v}} \right] e^{\alpha x}, \quad (9.35)$$

$$I(p, x) = \sqrt{\frac{C}{L}} \left[F_1(p) e^{-p \frac{x}{v}} \right] e^{-\alpha x} - \sqrt{\frac{C}{L}} \left[F_2(p) e^{p \frac{x}{v}} \right] e^{\alpha x}. \quad (9.36)$$

$e^{-\alpha x}$ ko'paytma oldidagi funksiya originalini Riman-Mellin formulasini qo'llab hosil qilish mumkin (8.12- paragrafga qarang!), ya'ni:

$$\varphi(t, x) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\nu-j\infty}^{\nu+j\infty} \left[F_1(p) e^{-p \frac{x}{v}} \right] e^{pt} dp = \frac{1}{2\pi j} \int_{\nu-j\infty}^{\nu+j\infty} \left[F_1(p) e^{-p \frac{1}{v}(x-vt)} \right] dp.$$

Oxirgi ifodadan ko'rinib turibdiki, $\varphi(t, x)$ funksiya $(x-vt)$ argument funksiyasidir, ya'ni $\varphi(t, x) = \varphi(x-vt)$.

$e^{-\alpha x}$ ko'paytma oldidagi funksiya uchun ham xuddi yuqoridagidek yozish mumkin:

$$\Psi(t, x) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\nu-j\infty}^{\nu+j\infty} \left[F_2(p) e^{p \frac{x}{v}} \right] e^{pt} dp = \frac{1}{2\pi j} \int_{\nu-j\infty}^{\nu+j\infty} \left[F_2(p) e^{p \frac{1}{v}(x+vt)} \right] dp,$$

$$\Psi(t, x) = \varphi(x+vt).$$

Shunday qilib, kuchlanish va tokning izlanayotgan originallari quyidagi ko'rinishda yozilishi mumkin:

$$u(t, x) = \varphi(x-vt) e^{-\alpha x} + \Psi(x+vt) e^{\alpha x},$$

$$i(t, x) = \sqrt{\frac{C}{L}} [\varphi(x-vt) e^{-\alpha x} - \Psi(x+vt) e^{\alpha x}].$$

Ushbu yechimlarni klassik usul yordamida ham hosil qilish mumkin.

Nazorat savollari

1. Qanday zanjirlar parametrlari tarqoq zanjirlar deb ataladi? 2. Bir jinsli liniya nima? 3. Bir jinsli liniyaning almashlash sxemasini chizing. 4. Telegraf tenglamalar nima uchun xususiy hosilali differensial tenglamalar ko'rinishida ifodalanadi? 5. Bir jinsli liniyaning kompleks shakldagi tenglamalarini yozing! 6. Bir jinsli liniyaning giperbolik shakldagi tenglamalarini yozing! 7. Bir jinsli liniyaning kuchlanish va tokning oniy qiymatlardagi tenglamalarini yozing! 8. Liniyaning birlamchi parametrlariga izoh bering! 9. Liniyaning ikkilamchi parametrlarini izohlab bering! 10. Qanday liniyalar isrofsiz liniyalar deb ataladi? 11. Signalni buzmaydigan liniyaga ta'rif bering! 12. Tushuvchi va aks to'liqlar nima? 13. Liniyaning FIK nima? 14. Turg'un to'liqlar qanday holatlarda yuzaga keladi?

10- BOB. PASSIV IKKIQTUTBLIKLAR VA TO'RTQTUTBLIKLAR SINTEZI

10.1. Umumiy ma'lumotlar

Avvalgi boblarda chiziqli elektr zanjirlarining tahlil(analiz)i usullari, ya'ni zanjir tuzilishi va parametrlari berilganida uning turli xossalari va jarayonlarini aniqlash masalalari ko'rib chiqilgan edi.

Ammo, ba'zi hollarda chiziqli zanjirlar uchun teskari masalani echish lozim bo'ladi, ya'ni zanjir kirishiga berilayotgan vaqt bo'yicha ma'lum qonun bilan o'zgarayotgan kirish kattaligi $x_{kir}(t)$ uchun zanjir strukturasini (tuzilishini) va parametrlarini shunday tanlab olish kerakki, bunda zanjir chiqishidagi kattalikning vaqt bo'yicha o'zgarishi $x_{chiq}(t)$ berilgan qonun bo'yicha o'zgarsin.

Laplas tasvirlariga o'tib $X_{kir}(p) = L\{x_{kir}(t)\}$ va $X_{chiq}(p) = L\{x_{chiq}(t)\}$ ko'ramizki, zanjirning uzatish funksiyasi berilgan, ya'ni $k(p) = X_{chiq}(p) / X_{kir}(p)$.

Shu sababli zanjir sintezi masalasini quyidagicha qo'yish mumkin: zanjir uzatish funksiyasi $K(p)$ yoki (Fur'e o'zgartirishlariga o'tib) uning berilgan chastotaviy xarakteristikasi $K(j\omega)$ bo'yicha zanjir strukturasini(sxemasi) va parametrlarini aniqlash.

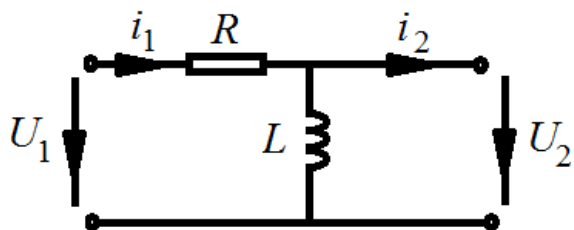
Passiv iikki qutbliklarni sintezida chiqish kattaligi sifatida ikki qutblik qismalaridagi kuchlanishni $U_1(j\omega)$, kirish kattaligi sifatida esa uning kirishidagi tok $I_1(j\omega)$ olamiz. Bu holatda: $K(j\omega) = K_z(j\omega) = U_1(j\omega) / I_1(j\omega) = Z(j\omega)$.

Shunday qilib, ikki qutblik uchun uzatish funksiyasi sifatida kirish qarshiligini $Z(j\omega)$ yoki unga teskari bo'lgan kattalik – kirish o'tkazuvchanligini $Y(j\omega)$ tanlashimiz mumkin. Ular analitik yoki grafik (chastotaviy xarakteristikalar) ko'rinishlarda bo'lishi mumkin.

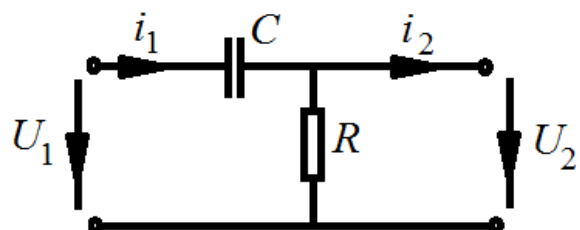
Elektr zanjirlari tahlilida ko'rilgan ediki, turli elektr zanjirlari ko'rinishi bir xil bo'lgan funksiyalarga ega bo'lishi mumkin. Masalan, 10.1- va 10.2- rasmlarda keltirilgan zanjirlar turli tuzilishlarga ega bo'lsa-da, ular differensiallovchi zanjirlar bo'lib, bir xil ko'rinishdagi uzatish funksiyasiga ega bo'ladi. Haqiqatan ham, 10.1- rasm uchun:

$$U_2(p) = \frac{R}{R + pL} U_1(p); \quad K(p) = \frac{R}{R + pL}.$$

10.2- rasm uchun esa:



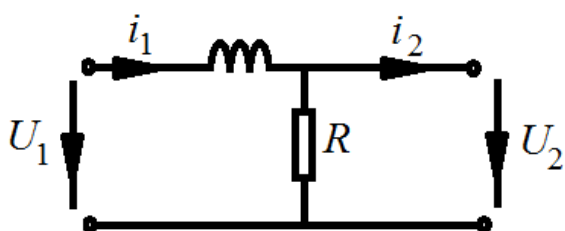
10.1- rasm



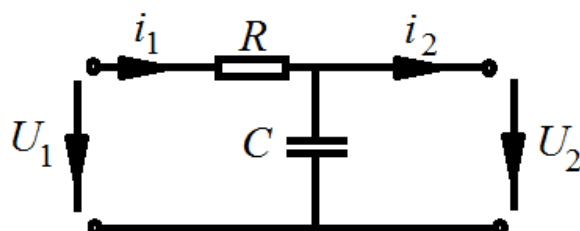
10.2- rasm

$$U_2(p) = \frac{1/(pC)}{R + 1/(pC)} U_1(p); \quad K(p) = \frac{1/(pC)}{R + 1/(pC)};$$

10.3- va 10.4- rasmlardagi zanjirlar integrallovchi bo'lib, bir ko'rinishdagi uzatish funksiyalariga egadir. Haqiqtdan:



10.3- rasm



10.4- rasm

Ba'zi hollarda chiziqli zanjirlar sintezi masalasi echimga ega bo'lmasligi mumkin, masalan, izlanayotgan funksiya zanjirida manfiy aktiv qarshilik bo'lsa.

Shu munosabat bilan zanjirning berilgan funksiyasi $F(p)$ bo'yicha quyidagi asosiy masalalar turadi.

Birinchi masala: berilgan funksiya $F(p)$ ga mos keladigan zanjirning odatdagi elementlar - kondensatorlar, induktiv g'altaklar va rezistorlar yordamida fizik amalga oshirilishi mumkinligi.

Agar funksiya grafik ko'rinishda berilgan yoki vaqt bo'yicha o'zgaradigan funksiya bo'lsa, uni shunday analitik approksimatsiyalash kerakki, natijada zanjirni fizik amalga oshirish mumkin bo'lsin.

Sintezning *ikkinchi masalasida* berilgan funksiyani avval zanjir ko'rinishida, keyin esa fizik elektr zanjiri ko'rinishida ishlab chiqish.

Bu erda shuni aytib o'tish joizki, berilgan funksiyani bir necha tuzilishdagi zanjirlar amalga oshirishi mumkin; xususiy hollarda zanjir

elementlarini kamaytirish maqsadida ekvivalent almashtirishlardan foydalaniladi.

10.2. Passiv elektr zanjirlari kirish funksiyalarining xossalari

Bu erda kirish operator va kompleks qarshiliklar va o'tkazuvchanliklarni, ya'ni ikki qutbliklar kirish funksiyalarini fizik jihatdan amalga oshirish shartlarini ko'rib chiqamiz.

Passiv elektr zanjirlari kirish funksiyalarining asosiy xossalarini ko'rib chiqamiz.

Kirish $Z(p)$ operator qarshiliklari va $Y(p)$ o'tkazuvchanliklarining birinchi xossasi shundan iboratki, $p(p = \sigma)$ ning haqiqiy qiymatlarda ular ham haqiqiydir, ya'ni $Z(p)$ va $Y(p)$ kattaliklar surati va maxrajidagi p bo'yicha polinomi ko'effitsientlari haqiqiydir, chunki ular zanjir uchastkalari R , L , C haqiqiy parametrlarining yig'indisi, ayirmasi, ko'paytmasi va bo'linmalaridan tashkil topgan bo'ladi.

Shuning uchiun ham p haqiqiy bo'lganda $Z(p)$ va $Y(p)$ lar ham haqiqiydir.

$Z(p)$ va $Y(p)$ kattaliklar ikkinchi xossasi shundan iboratki, ularning qutblari va nollari $p = \delta + j\omega$ kompleks operatorning (kompleks chastotada) faqat chap yarim tekisligida yoki mavhum o'qda joylashadi, ya'ni $\sigma_k \leq 0$, shu bilan birga $\sigma_k = 0$ bo'lganda qutblar va nollar sodda bo'ladi. Bunda $Z(p)$ va $Y(p)$ lar ifodalaydigan ratsional kasrlar surati va maxrajida turgan p bo'yicha polinomlarning barcha ko'effitsiyentlari musbat. Haqiqatdan ham, polinomni ko'paytuvchilarga yoyib, quyidagini hosil qilamiz:

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0 = a_n (p - p_n)(p - p_{n-1}) \dots (p - p_1)$$

Har bir $\dot{p}_k$ va $\dot{p}_{k+1} = \dot{p}_k$ qo'shma kompleks ildizlar jufti uchun quyidagi ko'paytuvchilar ko'paytmasiga ega bo'lamiz:

$$(p - \dot{p}_k)(p - \dot{p}_k) = (p - \sigma_k - j\omega_k)(p - \sigma_k + j\omega_k) = (p - \sigma_k)^2 + \omega_k^2$$

va p_i haqiqiy ildizlar uchun ko'paytuvchilarning $p - p_i = p - \sigma_i$ ko'rinishini hosil qilamiz. Bulardan ko'rinadiki, agar $\sigma_k \leq 0$ va $\sigma_i \leq 0$ bo'lsa, u holda yoyilgan polinom tarkibida manfiy sonlar bo'lmaydi va, binobarin, polinom barcha ko'effitsientlari $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$, musbat bo'ladi.

Ko‘rilayotgan funksiyalarni uchinchi muhim xossasi shundan iboratki, ularni haqiqiy tashkil etuvchisi musbat yoki nolga teng: $\operatorname{Re}[Z(p)] \geq 0$ va $\operatorname{Re}[Y(p)] \geq 0$, ya‘ni $\sigma \geq 0$ shart bajarilganda ular manfiy emas.

Xossalari yuqorida qayd etilgan funksiyalar *musbat haqiqiy funksiyalar* deb ataladi.

Bayon etilganlardan shu xulosa kelib chiqadiki, ratsional kasr

$$F(p) = \frac{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0}{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0} = \frac{G(p)}{Q(p)}$$

kirish funksiyasining operator ifodasi bo‘lishi uchun va aniq elektr zanjiri ko‘rinishida amalga oshirilishi uchun u yuqorida qayd etilgan talablarga javob berishi lozim, ya‘ni uning surati va maxraji chap yarim tekislikda yoki mavhum o‘qda nollarga ega bo‘lishi, barcha a_k va b_k koeffitsiyentlar haqiqiy va musbat bo‘lishi va nihoyat, $\operatorname{Re}(p) = \sigma \geq 0$ da $\operatorname{Re}[F(p)] \geq 0$ shartlar bajarilishi kerak.

Bundan tashqari, polinomlar surati va maxraji n va m darajalari farqi birdan ko‘p bo‘lmasligi lozim.

10.3. Kirish funksiyalarini sodda kasrlar ko‘rinishida ifodalash

Ratsional kasr ko‘rinishidagi kirish funksiyasini $A_\infty p + A_0$ ikki had

va
$$F(p) = \frac{G(p)}{Q(p)} = A_\infty p + A_0 + \frac{A_1}{p - p_1} + \frac{A_2}{p - p_2} + \dots + \frac{A_m}{p - p_m}$$
 oddiy kasr

yig‘indisi ko‘rinishida tasvirlash mumkin, bunda $p_1, p_2, \dots, p_m$ - $Q(p)$ maxraj ildizlari.

Bunda agar surat darajasi n maxraj darajasi m dan bittaga katta bo‘lsa, u holda $A_\infty \neq 0$. Agar $n=m$ bo‘lsa, unda $A_\infty = 0$ va $A_0 \neq 0$. Agar $n=m-1$ bo‘lsa, u holda $A_\infty = 0$ va $A_0 = 0$. Birinchi koeffitsient A_∞ dagi ∞ indeks

shuni bildiradiki, $n=m+1$ bo‘lganda bu koeffitsiyent $A_k = \left| \frac{F(p)}{p} \right| = \frac{a_n}{b_m}$

ko‘rinishda aniqlanadi. $A_1, A_2, \dots, A_m$ koeffitsiyentlar ratsional kasrni sodda kasrlarga yoyish formulalaridan quyidagicha topiladi:

$$A_k = \left| \frac{G(p)(p - p_k)}{Q(p)} \right|_{p=p_k} = G(p_k) \lim_{p \rightarrow p_k} \frac{p - p_k}{H(p)} = \frac{G(p)}{Q(p_k)}$$

Kirish funksiyasi maxrajining ildizlari mavhum yoki haqiqiy bo‘lgan xususiy holatni ko‘rib chiqamiz.

Mavhum ildizlar juft qo'shma bo'lishi lozim. Masalan $p_k = j\omega_k$ va $p_{k+1} = -j\omega_k$ bo'lsin. Bunda $A_k = A'_k + jA''_k$ va A_{k+1} lar qo'shma kattaliklar bo'lishi kerak, ya'ni $A_{k+1} = \dot{A}_k = A'_k - jA''_k$. Sodda kasrlarning mos bo'lgan juftliklarini umumlashtirib quyidagini hosil qilamiz:

$$\begin{aligned} \frac{A_k}{p - p_k} + \frac{A_{k+1}}{p - p_{k+1}} &= \frac{A_k(p + j\omega_k) + \dot{A}_k(p - p_k)}{(p - j\omega_k)(p + j\omega_k)} = \\ &= \frac{(A_k + \dot{A}_k)p + (A_k - \dot{A}_k)j\omega_k}{p^2 + \omega_k^2} = \frac{2A'_k p}{p^2 + \omega_k^2} - \frac{2A''_k \omega_k}{p^2 + \omega_k^2} \end{aligned}$$

Agar ildiz $p_i = \sigma_i = -\sigma_i$ haqiqiy bo'lsa, u holda unga mos keladigan oddiy kasr quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\frac{A_i}{p - p_i} = \frac{A_i}{p - \sigma_i}$$

Shunday qilib, faqat haqiqiy va mavhum ildizlar bo'lganda $F(p)$ funksiyani quyidagi ko'rinishda yoyish mumkin:

$$F(p) = \frac{G(p)}{Q(p)} = A_\infty p + A_0 + \frac{B_1 p}{p^2 - \omega_1^2} + \frac{B_3 p}{p^2 - \omega_3^2} + \dots + \frac{A_{m-1}}{p + \delta_{m-1}} + \frac{A_m}{p + \delta_m}$$

10.4. Maxraji haqiqiy va mavhum ildizlarga ega bo'lgan ikki qutblik kirish funksiyasini sodda kasrlarga yoyish yordamida amalga oshirish

Avvalgi paragrafda bayon etilgani kabi $F(p)$ kirish funksiyasining yoyilmasidagi barcha koeffitsiyentlar haqiqiy va musbat bo'lsin. Yoyilmaning alohida hadlari qanday qilib amalga oshirilishini ko'rib chiqamiz. Faraz qilaylik, $F(p)$ funksiya zanjir kirish operator qarshiligini ifodalayotgan bo'lsin, ya'ni $F(p) = Z(p)$.

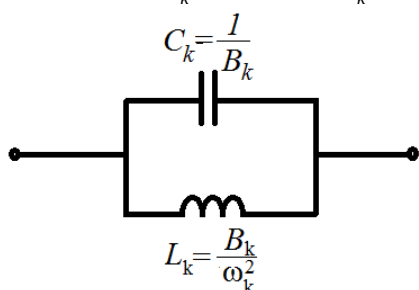
Birinchi $A_\infty p = Z_\infty(p)$ had induktivligi $L_\infty = A_\infty$ ga teng bo'lgan induktiv g'altak yordamida amalga oshiriladi, chunki uning operator qarshiligi $L_\infty p$ ga teng.

Ikkinchi $A_0 = Z_0(p)$ had $R_0 = A_0$ aktiv qarshilikka ega bo'lgan elektr zanjiri uchastkasi yordamida amalga oshiriladi.

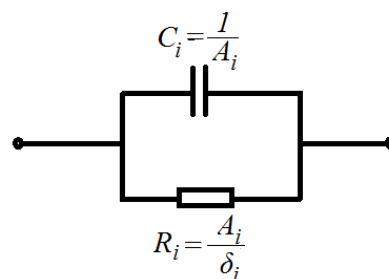
Ko'rinishi $\frac{B_k p}{p^2 + \omega_k^2} = \frac{1}{p/B_k + \omega_k^2/pB_k}$ bo'lgan had sig'imi C_k ga teng bo'lgan kondensator va unga parallel ulangan L_k induktivlikdan tashkil

topgan elektr zanjiri uchastkasidan iborat (10.5- rasm). Haqiqatda bunday uchastkaning operator qarshiligi $Z_k(p) = \frac{1}{pC_k + 1/(pL_k)}$ ko'rinishga ega va

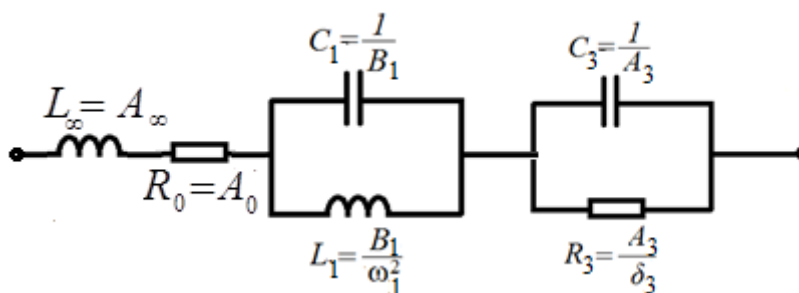
binobarin $C_k = \frac{1}{B_k}$ va $L_k = \frac{B_k}{\omega_k^2}$ deb, talab etilgan amalni bajarish mumkin.



10.5- rasm



10.6- rasm



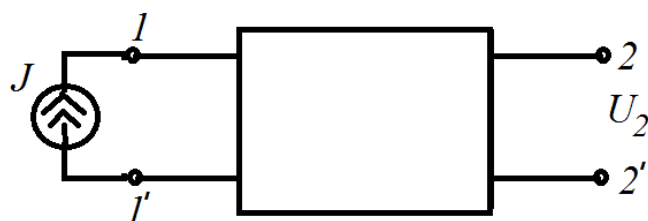
10.7- rasm

Nihoyat, $\frac{A_i}{p + \delta_i} = \frac{1}{p/A_i + \delta_i/A_i}$ ko'rinishdagi had sig'imi C_i ga teng kondensator va unga parallel ulangan R_i qarshilikdan iborat bo'lgan elektr zanjiri uchastkasi yordamida amalga oshiriladi. (10.6- rasm). Haqiqatdan ham bunday elektr zanjiri uchastkasining operator qarshiligi $Z_i(p) = \frac{1}{pC_i + 1/R_i}$ ko'rinishga ega va binobarin, $C_i = 1/A_i$ va $R_i = A_i/\delta_i$ qiymatlarda talab etilgan sxema amalga oshiriladi.

Shunday qilib, muayyan holatda kirish qarshiligi $Z(p) = A_\infty p + A_0 + \frac{B_1 p}{p^2 + \omega_1^2} + \frac{A_3}{p + \delta_3}$ funksiya bilan ifodalansa, uni amalga oshiradigan elektr zanjiri 10.7- rasmda keltirilgan sxemadan iborat bo'ladi.

10.5. To'rtqutblik uzatish funksiyasining sintezi haqida

To'rtqutblikning berilgan uzatish funksiyasi bo'yicha sintez qilish masalasini ko'rib chiqamiz (10.8- rasm). Bu to'rtqutblik tok manbaidan ta'minlanadi, uning chiqishi esa qarshiligi nihoyatda katta bo'lgan yuklama(masalan, maydon tranzistorining zatvori(to'sig'i))ga ulangan. Bu holatda to'rtqutblik Z – shaklda yozilgan



10.8- rasm

$$U_1(p) = Z_{11}(p)I_1(p) + Z_{12}(p)I_2(p);$$

$$U_2(p) = Z_{21}(p)I_1(p) + Z_{22}(p)I_2(p),$$

tenglamalarida $I_2(p) \approx 0$ deb, qabul qilinishi mumkin, ya'ni $U_1(p) = Z_{11}(p)I_1(p)$ va $U_2(p) = Z_{21}(p)I_1(p)$. Bunday holatda uzatish funksiyasi to'rtqutblik $Z_{21}(p)$ parametrlariga teng bo'ladi, chunki

$$k(p) = \frac{U_2(p)}{I_1(p)} = Z_{21}(p)$$

Elementlari faqat reaktiv elementlardan iborat bo'lgan to'rtqutblikni amalga oshiradigan uzatish funksiyasini ko'rib chiqamiz. Bu faqat reaktiv elementlardan iborat bo'lgan va salt ishlayotgan to'rtqutblik qismlari 1, 1' va 2, 2' tomonidagi kirish qarshiliklari $Z_{11}(p)$ va $Z_{22}(p)$ $j\omega$ o'qida yotgan va o'zaro almashinib keladigan oddiy nollar va qutblardan iborat bo'lgan holatga to'g'ri keladi. Bu funksiyalar yoyilmasidagi sodda kasrlar koeffitsientlari haqiqiy va musbat. $Z_{21}(p)$ kattalik kirish qarshilik emas va shuning uchun ham uning nollari kompleks tekislikning ixtiyoriy qismida haqiqiy o'qqa nisbatan simmetrik joylashishi mumkin.

$Z_{21}(p)$ funksiya qutblari $Z_{11}(p)$ va $Z_{22}(p)$ funksiyalar qutblari kabi $j\omega$ o'qida yotishi kerak bo'ladi. $Z_{21}(j\omega)$ funksiya esa mavhum kattalik bo'lishi lozim, chunki to'rtqutblik faqat reaktiv elementlardan iborat. Shu sababli $Z_{21}(j\omega)$ p ga nisbatan toq ratsional funksiya bo'lishi lozim.

Berilgan $K(p) = Z_{21}(p)$ uzatish funksiyasi asosida elektr zanjirini sintez qilishda $Z_{11}(p)$ va $Z_{22}(p)$ kattaliklar uchun hech qanday chegaralashlar qo'yilmaydi. Shuning uchun ham ularni bir-biriga teng deb olish maqsadga

muvoqif bo'radi. Bu holatda $Z_{11}(p) = Z_{22}(p)$ lar qutblari bir vaqtning o'zida $Z_{21}(p)$ ning ham qutblariga teng bo'radi.

To'rtqutblik ekvivalent sxemasining parametrlarini sintez qilinayotgan sxemaning Z_{11} va Z_{21} parametrlari bilan bog'lovchi sodda munosabatlar ko'priksimon ekvivalent sxema uchun ham o'rinalidir (10.9-r asm):

$$Z_{11}(p) = Z_{22}(p) = \frac{1}{2} [Z_{11}(p) + Z_{22}(p)]$$

$$Z_{12}(p) = Z_{21}(p) = \frac{1}{2} [Z_{22}(p) - Z_{11}(p)]$$

Bundan $Z_{11}(p) = Z_{11}(p) - Z_{12}(p)$ va $Z_{22}(p) = Z_{11}(p) - Z_{21}(p)$ ekanligi kelib chiqadi.

Shu sababli elektr zanjiri sintezini amalga oshirishda ko'priksimondan foydalanamiz.

Agar $Z_{21}(p)$ ratsional kasr ko'rinishida berilgan bo'lsa, uni sodda kasrlarga yoyamiz. Natijada musbat va manfiy koeffitsientli sodda kasrlarga ega bo'lamiz. Musbat koeffitsiyentli kasrlar yig'indisini $Z_{21(+)}(p)$, manfiy koeffitsiyentli kasrlar yig'indisining minus ishora bilan olingan qiymatini esa $Z_{21(-)}(p)$ orqali belgilaymiz. Natijada $Z_{21}(p) = Z_{21(+)}(p) - Z_{21(-)}(p)$ ni hosil qilamiz.

$Z_{21(+)}(p)$ va $Z_{21(-)}(p)$ ifodalardagi koeffitsientlar musbat. Agar $Z_{11}(p) = Z_{22}(p) = Z_{21(+)}(p) + Z_{21(-)}(p)$, deb qabul qilsak, u holda $Z_{11}(p)$ va $Z_{22}(p)$ lar uchun eng sodda ifodalarni hosil qilamiz. Bu holatda $Z_{11}(p) = 2Z_{21(+)}(p)$ va $Z_{22}(p) = 2Z_{21(-)}(p)$.

1- masala. Sintezlanayotgan to'rtqutblik uzatish funksiyasi berilgan:

$$Z_{21}(p) = \frac{p^5 + 5p^3 + 4,5p}{(p^2 + 0,5)(p^2 + 1)(p^2 + 2)} = \frac{3p}{p^2 + 0,5} - \frac{p}{p^2 + 1} - \frac{p}{p^2 + 2} =$$

$$= Z_{21(+)}(p) - Z_{21(-)}(p)$$

$$Z_{21(+)}(p) = \frac{3p}{p^2 + 0,5}; \quad Z_{21(-)}(p) = \frac{p}{p^2 + 1} - \frac{p}{p^2 + 2}$$

Uzatish funksiyasi surati $(p^5 + 5p^3 + 4,5p)$ nollari p tekisligining $j\omega$ o'qida joylashgan va δ o'qiga va koordinata boshiga nisbatan simmetrik ekanligiga ishonch hosil qilish mumkin.

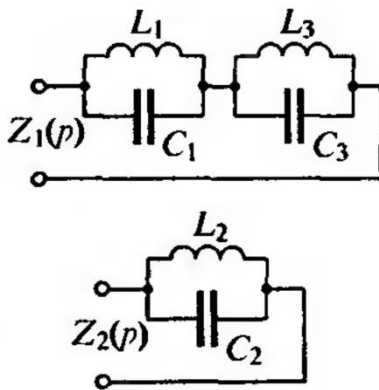
Shunday qilib, bu holatda to'rtqutblik ko'priksimon sxemasining parametrlari quyidagiga teng:

$$Z_1(p) = 2Z_{21(-)}(p) = \frac{2p}{p^2 + 1} - \frac{2p}{p^2 + 2}$$

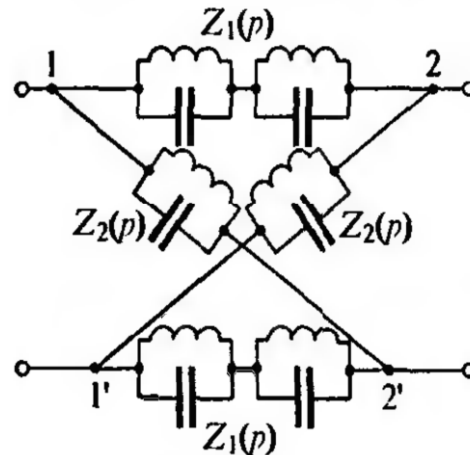
$$Z_2(p) = Z_{21(+)}(p) = \frac{6p}{p^2 + 0,5}$$

$Z_1(p)$ va $Z_2(p)$ larni amalga oshirilishi (realizatsiyasi) parametrlari quyidagicha bo'lgan sxemalarga olib keladi (10.10- rasm)

$$C_1 = \frac{1}{2}; L_1 = 2; C_3 = \frac{1}{2}; L_3 = 1; C_2 = \frac{1}{6}; L_2 = \frac{6}{0,5} = 12.$$



10.10- rasm



10.11- rasm

Hosil bo'lgan ko'prik sxema (10.11- rasm) ko'p elementlidir. Elementlar sonini kamaytirish maqsadida mumkin qadar ma'lum bir ekvivalent almashtirishlarni amalga oshirish lozim bo'ladi.

Uzatish funksiyasi sintezining keltirilgan usuli eng sodda usullardan biri hisoblanadi. Murakkab to'rtqutbliklar sintezi uchun boshqa qator usullar mavjud.

Uzatish funksiyasining sintezi avtomatika, radiotexnika va o'lchash texnikasida muhim ahamiyatga ega.

Uzatish funksiyasining sintezi asosida korrektsiyalovchi, filtrlovchi va boshqa elektr zanjirlari loyihalanadi.

2- masala. Reaktiv ikki qutblik kirish funksiyasi berilgan:

$$Z(p) = (10^9 p^3 + 16 \cdot 10^{21} p) / (p^4 37 \cdot 10^{12} p^2 + 36 \cdot 10^{14})$$

Ikki qutblikning chastotaviy xarakteristikasi qurilsin va birinchi va ikkinchi kanonik sxemalari ko'rinishida amalga oshirilsin.

Echish. Masalani Foster usulida echish uchun kirish funksiyasi maxrajining p_2^2 va p_4^2 ildizlarini topamiz. Buning uchun quyidagi

bikvadrat tenglamani echamiz: $p^4 37 \cdot 10^{12} p^2 + 36 \cdot 10^{14} = 0$. Bunda $p_2^2 = -10^{12}$; $p_4^2 = -36 \cdot 10^{12}$.

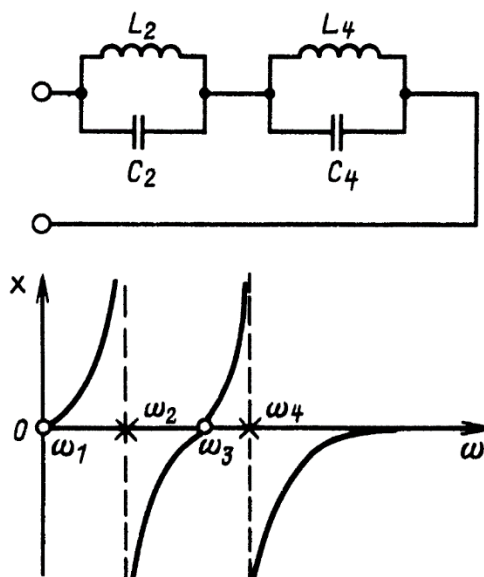
$Z(p)$ qarshilikni quyidagi ko'rinishda tasvirlaymiz:

$$Z(p) = 10^9 p(p^2 + 16 \cdot 10^{12}) / (p^2 + 10^{12})(p^2 + 36 \cdot 10^{12})$$

Ushbu ifodada $p = j\omega$ deb va $\omega_2^2 = 1 \cdot 10^{12}$, $\omega_3^2 = 16 \cdot 10^{12}$, $\omega_4^2 = 36 \cdot 10^{12}$ belgilashlar kiritib, quyidagini hosil qilamiz:

$$Z(j\omega) = \frac{j\omega 10^9 (\omega_3^2 - \omega^2)}{(\omega_2^2 - \omega^2)(\omega_4^2 - \omega^2)} = jx(\omega)$$

Bu ifoda bo'yicha 10.12- rasmda reaktiv ikkiqutblikning chastotaviy xarakteristikasi qurilgan.



10.12- rasm

Darhaqiqat ko'rinish turibdiki, $\omega \rightarrow 0$ va $\omega \rightarrow \infty$ qarshilik $x \rightarrow \infty$, ya'ni $x(\omega)$ xarakteristika ikkita tashqi nolga ega. Bundan tashqari, $x(\omega)$ ikkita parallel rezonans nuqtalariga ($\omega = \omega_2$ va $\omega = \omega_4$) va bitta ketma-ket rezonansga ($\omega = \omega_3$) ega va shu bilan birga qutblar va nollar $Z(p)$ ning mavhum o'qida yotadi.

Ikki qutblikni birinchi kanonik ko'rinishida amalga oshirish uchun (bu esa izlanayotgan sxemaning struktura tuzilishini belgilaydi) $Z(p)$ ni quyidagi ko'rinishga keltiramiz:

$$Z(p) = \frac{pA_2}{p^2 + \omega_2^2} + \frac{pA_4}{p^2 + \omega_4^2},$$

$$\text{Bundan } A_2 = \frac{1}{C} = \lim_{p^2 \rightarrow \omega_2^2} Z(p) \frac{p^2 + \omega_2^2}{p} = \frac{3}{7} \cdot 10^9 \text{ F}^{-1}; C_2 = \frac{7}{3} \text{ nF} \text{ va}$$

$$L_2 = \frac{1}{C_2 \omega_2^2} = \frac{3}{7} \text{ mH}$$

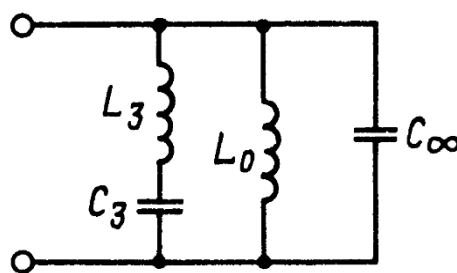
Shunga o'xshash boshqa parametrlarni topamiz:

$$A_4 = \frac{1}{C_4} = \lim_{p^2 \rightarrow \omega_4^2} Z(p) \frac{p^2 + \omega_4^2}{p} = \frac{4}{7} \cdot 10^9 \text{ F}^{-1}; C_2 = \frac{7}{4} \text{ nF} \text{ va}$$

$$L_4 = \frac{1}{C_4 \omega_4^2} = \frac{1}{63} \text{ mH}$$

Ikki qutblikni ikkinchi kanonik sxema ko'rinishida amalga oshirish uchun (bu ham izlanayotgan sxema tuzilishini belgilaydi) $Y(p)$ ni quyidagi ko'rinishga keltiramiz (10.13- rasm):

$$Y(p) = pA_\infty + \frac{A_0}{p} + \frac{pA_3}{p^2 + \omega_3^2}.$$



10.13- rasm

Ikki qutblik sxemasidan ko'rinish turibdiki, $Y(p)$ ikkita tashqi ($p = 0$ va $p = \infty$) va bitta ichki ($p^2 = -\omega_3^2$) qutbga ega.

Avval isbotlangan $Z(p)$ ning xossasiga ko'ra $dx/d\omega > 0$ bo'lganda $Y(p)$ kirish funksiyasining uchta qutblari orasida uning ikkita nollari bo'lishi kerak. Bu esa uning 10.12- rasmda keltirilgan chastotaviy xarakteristikasiga mos bo'ladi.

O'zgaras koeffitsiyentlar va parametrlarni topamiz:

$$A_\infty = C_\infty = \lim_{p \rightarrow \infty} \frac{Y(p)}{p} = 1 \text{ nF}.$$

$$A_0 = \frac{1}{L_0} = \lim_{p \rightarrow 0} pY(p) = \frac{9}{4} \cdot 10^3 \text{ H}^{-1};$$

$$L_0 = \frac{4}{9} \text{ mH} \quad A_3 = \frac{1}{L_3} = \lim_{p^2 \rightarrow -\omega_3^2} \frac{Y(p)(p^2 + \omega_3^2)}{p} = \frac{75}{4} \cdot 10^3 \text{ H}^{-1}$$

$$L_0 = \frac{4}{75} \text{ mH}; \quad C_3 = \frac{1}{L_3 \omega_3^2} = \frac{75}{64} \text{ nF}$$

3- masala. 2- masalada berilganlar asosida Kaur usuli bo'yicha birinchi va ikkinchi zanjirsimon sxemalar ko'rinishida ikkiqutblikni amalga oshiring.

Echish. Kirish operator o'tkazuvchanlikni birinchi zanjirsimon sxema ko'rinishida keltiramiz.

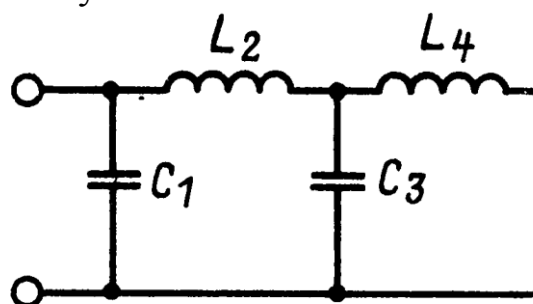
$$Y(p) = \frac{p^4 + 37 \cdot 10^{12} p^2 + 36 \cdot 10^{24}}{10^9 p^3 + 16 \cdot 10^{21} p}$$

$Y(p)$ suratini maxrajiga bo'lib birinchi yig'indi pC_1 ajratamiz:

$$= \frac{p^4 + 37 \cdot 10^{12} p^2 + 36 \cdot 10^{24}}{p^4 + 16 \cdot 10^{12} p^2} - \frac{10^9 p^3 + 16 \cdot 10^{21} p}{10^{-9} p} = \frac{21 \cdot 10^{12} p^2 + 36 \cdot 10^{24}}{10^{-9} p}$$

$$p^4 + 37 \cdot 10^{12} p^2 + 36 \cdot 10^{24} = 10^{-9} p(10^9 p^3 + 16 \cdot 10^{21} p) + 21 \cdot 10^{12} p^2 + 36 \cdot 10^{24}$$

Birinchi zanjirsimon sxemaning birinchi elementi sifatida ko'ndalang sig'im $C_1 = 10^{-9} \text{ F} = 1 \text{ nF}$ (10.14- rasm). Avvalgi keltirilgan belgilashlarni e'tiborga olib quyidagilarni yozamiz:



10.14- rasm

$$Y(p) = pC_1 + \frac{21 \cdot 10^{12} p^2 + 36 \cdot 10^{24}}{10^9 p^3 + 16 \cdot 10^{21} p} = 10^{-9} p + Y_1(p)$$

ya'ni

$$Z_1(p) = \frac{10^9 p^3 + 16 \cdot 10^{21} p}{21 \cdot 10^{12} p^2 + 36 \cdot 10^{24} p} = pL_2 + Z_2(p)$$

pL_2 qo'shiluvchini ajratamiz: $Z_1(p)$ ifoda suratini maxrajiga bo'lish orqali yoki boshqacha qilib aytganda birinchi amal bo'luvchisini qoldiqqa bo'lamiz:

$$\begin{aligned}
& \frac{10^9 p^3 + 16 \cdot 10^{21} p}{10^9 p^3 + \frac{12}{7} 10^{21} p} \quad \left| \frac{21 \cdot 10^{12} p^2 + 36 \cdot 10^{24}}{\frac{1}{21} \cdot 10^{-3} p} \right. \\
& \frac{(100/7) \cdot 10^{21} p}{10^9 p^3 + 16 \cdot 10^{21} p} = \frac{1}{21} \cdot 10^{-3} p (21 \cdot 10^{12} p^2 + 36 \cdot 10^{24}) + \frac{100}{7} \cdot 10^{21} p
\end{aligned}$$

10.14- rasmda tasvirlangan ikkiqutblik sxemasining ikkinchi elementi bo'ylama induktivlikdir: $L_2 = \frac{1}{21} \cdot 10^{-3} \text{H} = \frac{1}{21} \text{mH}$. Shu sababli:

$$Z_1(p) = \frac{1}{21} \cdot 10^{-3} p + \frac{(100/7) \cdot 10^{21} p}{21 \cdot 10^{12} p^2 + 36 \cdot 10^{24}} = \frac{1}{21} 10^{-3} p + Z_2(p)$$

$$\text{Ya'ni: } Y_2(p) = \frac{21 \cdot 10^{12} p^2 + 36 \cdot 10^{24}}{(100/7) \cdot 10^{21} p} = pC_3 + Y_3(p)$$

pC_3 qo'shiluvchini ajratamiz: $Y_2(p)$ suratini maxrajiga bo'lamiz yoki boshqacha qilib aytganda ikkinchi amalning bo'luvchisini qoldiqqa bo'lamiz:

$$21 \cdot 10^{12} p^2 + 36 \cdot 10^{24} = \left(\frac{147}{100} \cdot 10^{-9} p \right) \left(\frac{100}{7} \cdot 10^{21} p \right) + 36 \cdot 10^{24}$$

10.14- rasmda keltirilgan ikkiqutblik uchinchi elementi ko'ndalang sig'imdir: $C_3 = \frac{147}{100} \cdot 10^{-9} \text{F} = 1,47 \text{nF}$. Shu sababli:

$$Y_2(p) = \frac{147}{100} \cdot 10^{-9} p + \frac{36 \cdot 10^{24}}{(100/7) \cdot 10^{21} p} = \frac{147}{100} \cdot 10^{-9} p + Y_3(p)$$

$$Z_3(p) = \frac{(100/7) \cdot 10^{21} p}{36 \cdot 10^{24}} = \frac{25}{63} \cdot 10^{-3} p + pL_4$$

10.14- rasmdagi oxirgi to'rtinchi elementi - bu bo'ylama induktivlikdir: $L_4 = \frac{25}{63} \cdot 10^{-3} \text{H} = \frac{25}{63} \text{mH}$.

Xulosa qilib shuni aytish joizki, 10.9, 19.4 rasmlardagi barcha uchta sxemalar 19.4- rasmda keltirilgan bir xil chastotaviy xarakteristikaga ega va bitta kirish funksiyasini amalga oshiradi va bitta kirish funksiyasini keltirilgan operator qarshilik yoki operator o'tkazuvchanlik $Y(p) = 1/Z(p)$ amalga oshiradilar. Barcha sxemalardagi elementlar soni to'rtta (ikkita induktivlik va ikkita sig'im). Uchta sxema uchun $Z(0) = 0$ va $Z(\infty) = 0$, $Y(\infty) = \infty$ va $Y(0) = \infty$. Lekin sxemalar tuzilishi va ularning parametrlari turlicha bo'lib, sintez masalasining echimi ko'p variantli

bo'lishligidan dalolat beradi. U yoki bu variantni tanlash induktiv va sig'im elementlarini qay darajada qulay amalga oshirilishi bilan bog'liq.

Nazorat savollari

1. Sintez masalasining umumiy tavsifi nimadan iborat? 2. Qanday hollarda chiziqli zanjirlar sintezi masalasi echimga ega bo'lmasligi mumkin? 3. Zanjirni berilgan funksiyasi bo'yicha sintez qilishda qanday asosiy masalalar turadi? 4. Passiv elektr zanjirlari kirish funksiyalarining xossalari ayting! 5. Qanday funksiyalar musbat haqiqiy funksiyalar deb ataladi? 6. Zanjir kirish funksiyalari qanday qilib sodda kasrlar ko'rinishida ifodalanadi? 7. Maxraji haqiqiy va mavhum ildizlarga ega bo'lgan ikki qutblik kirish funksiyasi sodda kasrlarga yoyish yordamida amalga oshirish masalasini tushuntirib bering! 8. To'rtqutblik uzatish funksiyasining sintezi haqida nimalarni bilasiz?

II - BO'LIM. NOCHIZIQ ZANJIRLAR

11- BOB. O'ZGARMAS TOK NOCHIZIQ ELEKTR VA MAGNIT ZANJIRLARI

11.1. Umumiy ma'lumotlar

Chiziqli elektr zanjirlarini tahlil qilishda shu paytgacha ular elementlarining parametrlari - rezistor qarshiligi R , g'altak induktivligi L , kondensator sig'imi C o'zgarmas bo'lib, zanjirdagi tok va kuchlanishlarga bog'liq emas, ya'ni ular chiziqli VAX ga ega deb hisoblandi. Ammo bu holat zanjirdagi haqiqiy jarayonni ideallashtirishdir. Ko'pchilik hollarda elektr zanjirlaridagi elementlar VAXsi nochiziq bo'lib, ularning parametrlari tok va kuchlanishlarning qiymatlari va yo'nalishlariga bog'liq bo'ladi. Bunday elementlar, kitobning birinchi bobida qayd etib o'tganimizdek, nochiziq elementlar, tarkibida hech bo'lmaganda bitta nochiziq elementi bo'lgan zanjirlar esa nochiziq zanjirlar deb ataladi.

Nochiziq zanjirlar energetika, avtomatika, radiotexnika, elektronika, elektr aloqa va boshqa sohalarida keng qo'llaniladi. Bunday zanjirlardagi jarayonlarni tahlil qilish chiziqli zanjirlardagi jarayonlar tahlilidan ancha murakkabdir. Chunki, nochiziq zanjirlar o'zgaruvchan koeffitsiyentli tenglamalar bilan ifodalanadi.

Ko'pchilik elektrotexnika materiallarida $\rho = f(\delta)$, $\mu = f(H)$ va $\varepsilon = f(E)$ bog'lanishlar nochiziq funksiya ko'rinishida bo'ladi va shuning uchun ham bu materiallar asosida yasalgan rezistorlar, induktiv g'altaklar va kondensatorlar nochiziqlik xossalariga ega bo'ladi.

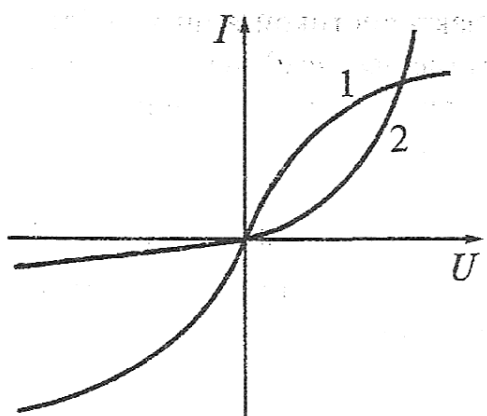
Nochiziq elementlar nochiziq rezistor, nochiziq induktiv g'altak va nochiziq kondensatorlarga bo'linadi.

Odatda nochiziq elementlar ikkita katta guruhga ajratiladi: *boshqarilmaydigan* (nochiziq ikkiqutbliklar) va *boshqariladigan* (nochiziq ikki-, uch-, to'rt- yoki ko'p qutbliklar). Birinchi guruh nochiziq elementlarga termorezistor, yarim o'tkazgichli diod, dinistor cho'g'lanma lampa, termoqarshilik, elektr yoyi, ferromagnit o'zakli induktiv g'altak, baretter, gazotron, stabilitron, varikap va boshqalar kiradi. Ikkinchi guruh nochiziq elementlarga bir nechta kirish qismalari bo'lgan va ulardan kamida bittasi boshqarish maqsadida foydalaniladigan elementlar kiradi. Bularga tranzistor, tiristor, radiolampa, fotodiod, fototranzistor va boshqalar misol bo'la oladi.

Nochiziq elementlar xossalarini ularning VAX lari yordamida tahlil etish qulay hisoblanadi. VAX bir qiymatli va ko'p qiymatli bo'lishi

mumkin. Bir qiymatli VAX larda argument (masalan, tok) ning har bir qiymatiga funksiya (masalan, kuchlanish) ning faqat bitta qiymati mos keladi. Ko'p qiymatli VAX larda esa argumentning bir qiymatiga funksiyaning bir nechta qiymatlari mos keladi. Masalan, gisterezis sirtmog'i ko'p qiymatli VAX lar guruhiga kiradi.

Nochiziq elementlar VAX sining ko'rinishiga ko'ra simmetrik va nosimmetrik VAX li elementlarga bo'linadi. Simmetrik VAX li nochiziq elementlarda xarakteristika elementdagi tok va kuchlanishning ishorasiga bog'liq bo'lmaydi (11.1- rasmdagi 1- egri chiziq). Bunday elementlarga cho'g'lanma lampa, termorezistor, ferromagnit o'zakli g'altak va boshqalar kiradi. Nosimmetrik VAX li nochiziq elementlarda xarakteristikaning ko'rinishi undan o'tayotgan tokning yo'nalishiga va qismalardagi kuchlanish ishoralariga bog'liq bo'ladi (11.1- rasmdagi 2-egri chiziq). Bunday elementlarga diod, stabilitron, dinistor va boshqalar kiradi.



11.1- rasm

Agar nochiziq element VAX sining ma'lum qismida $\frac{di}{dt} < 0$ yoki $\frac{di}{dt} < 0$ bo'lsa, u holda bunday element barqaror bo'lmagan VAX li element deb ataladi. Ularning VAX si N yoki S harfini eslatadi. Masalan, tunnel diod VAX sining shakli N harfiga o'xshash bo'lganligi uchun u N turdagi nochiziq qarshilik deb ataladi.

Amaliyotda ko'p qo'llaniladigan rezistorlar quyida keltirilgan:

Varikap - $p-n$ o'tishga asoslangan sig'imli yarim o'tkazgich element.

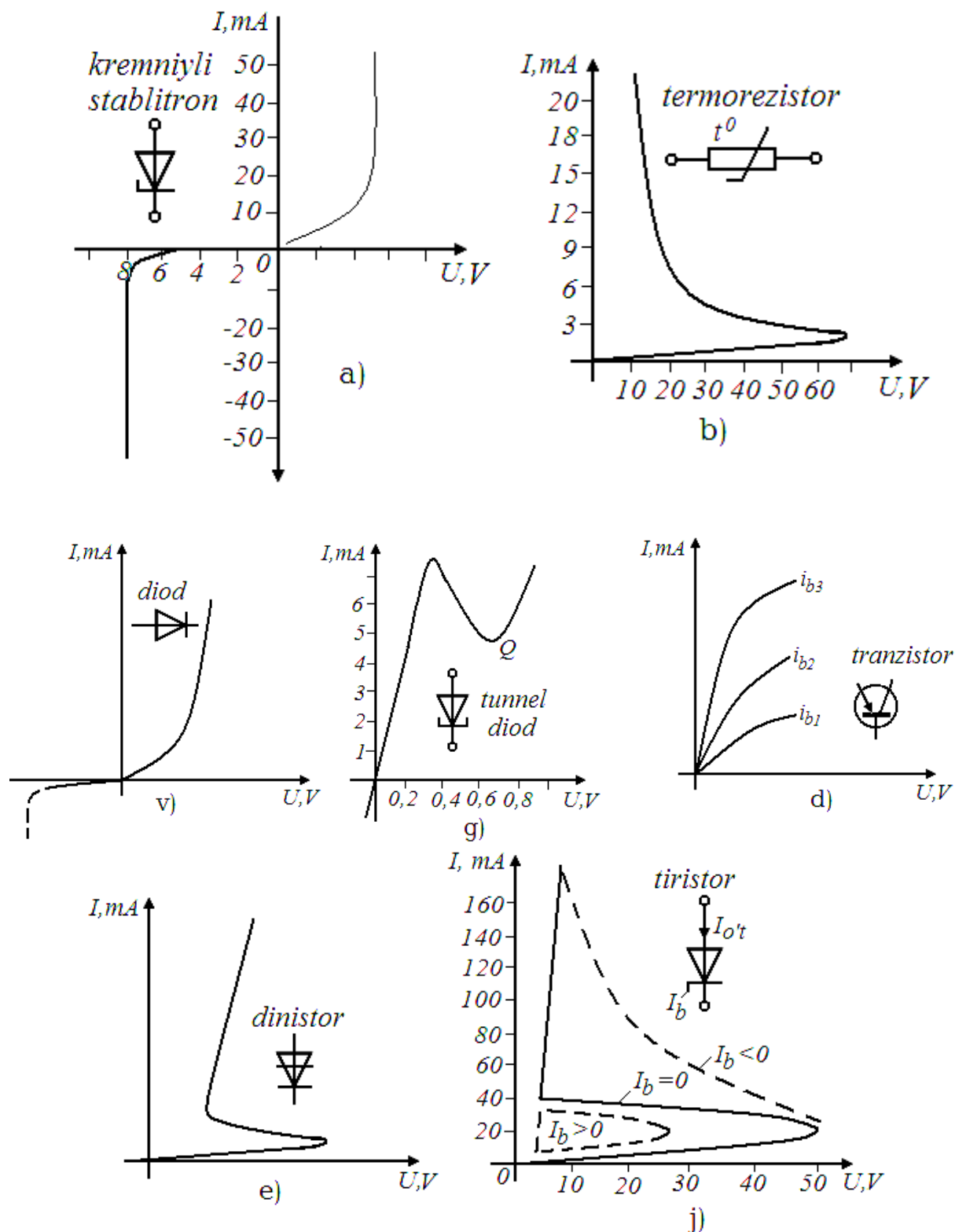
Varikond - segnetoelektrik kondensator bo'lib, sig'im elementi sifatida foydalaniladi.

Varistor - tirit yoki vilit korborund qarshilik kukunsimon kvars zarrachalardan, koks va grafitdan disk yoki trubka shaklida yasaladi. Nochiziqlik xususiyati kristallarni yarim o'tkazgichli qobig' bilan qoplash natijasida paydo bo'ladi. Kuchlanish o'zgarishiga ta'sir etuvchi birlamchi o'zgartkich sifatida qo'llaniladi.

Stabilitron - $p-n$ o'tish qalinligi kichik bo'lgan yarim o'tkazgichli diod (10.2- rasm, a). Kuchlanishni me'yorlash (stabillash)da qo'llaniladi.

Termorezistor (termistor) - metall (karbid, sulfid, marganes va nikel) oksidlaridan tayyorlanadigan va qarshiligi harorat ta'sirida o'zgaradigan rezistor (11.2 - rasm, b).

Yarim o'tkazgichli diod - germaniy yoki kremniy asosida tayyorlangan p - n o'tishli yarim o'tkazgich element (11.2- rasm, v). To'g'rilagich va invertor sxemalarida, hisoblash texnikasida va boshqa qurilmalarda keng qo'llaniladi.



11.2- rasm

Tunnel diod - tarkibida katta miqdorda aralashma bo'lgan va o'tish qalinligi nihoyatda yupqa bo'lgan yarim o'tkazgichli kristall (10.2- rasm, g). Differensial qarshiligi manfiy bo'lgan rele effektli element sifatida qo'llaniladi.

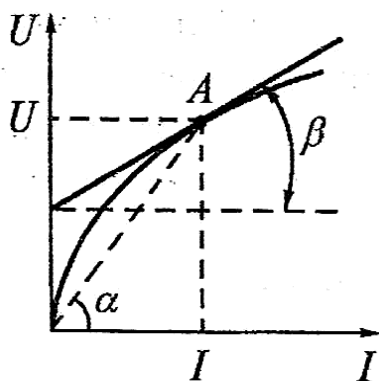
Tranzistor - tokni bir tomonga o'tkazuvchi ikkita elektron teshik ($p-n(n-p)$) o'tishli va uchta qutbli yarim o'tkazgich element (11.2- rasm, d). Kuchaytirgich, elektron kalit va boshqa sxemalarda keng qo'llaniladi.

Dinistor - to'rt qatlamli elektron - teshik ($p-n-p-n$) o'tishli kremniyli yarim o'tkazgichli ventil (11.2- rasm, e). Diskret avtomatika va impuls texnikasida keng foydalaniladi.

Tiristor - uchta elektron - teshik o'tishga ega bo'lgan boshqariluvchi uch qutbli yarim o'tkazgichli ventil (11.2- rasm, j). U invertorlar va elektr yuritmalarda qo'llaniladi.

Nochiziq rezistorlar VAX dan tashqari statik va dinamik qarshiliklari bilan tavsiflanadi.

Nochiziq rezistorni 11.3- rasmda keltirilgan VAX sini ko'rib chiqaylik. Element ish rejimi VAX ning A nuqtasiga to'g'ri kelsin, deylik. Nochiziq rezistordagi kuchlanish(tok)ni undan o'tayotgan tokka(kuchlanishga) nisbati *statik qarshilik(o'tkazuvchanlik)* deb ataladi:



11.3- rasm

$$R_{st} = \frac{U}{I} = m_R \operatorname{tg} \alpha, \quad (G_{st} = \frac{I}{U} = \frac{1}{m_R} \operatorname{ctg} \alpha,)$$

bu yerda m_R - qarshilik masshtabi.

11.3 - rasmdan ko'rinib turibdiki, statik qarshilik A nuqtani koordinata boshi bilan tutashtiruvchi to'g'ri chiziq va tok o'qi orasidagi α burchak tangensiga to'g'ri proporsional.

Nochiziq rezistordagi kuchlanish(tok) orttirmasini undan o'tayotgan tok(undagi kuchlanish) orttirmasiga nisbatining tok(kuchlanish) orttirmasi nolga intilgandagi limiti *dinamik qarshilik(o'tkazuvchanlik)* deb ataladi, ya'ni:

$$R_o = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{dU}{dI} = m_R \operatorname{tg} \beta \quad (G_o = \lim_{\Delta U \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{dI}{dU} = \frac{1}{m_R} \operatorname{ctg} \beta)$$

Dinamik qarshilik (*o'tkazuvchanlik*) VAX A nuqtasiga o'tkazilgan urinmaning tok o'qi bilan hosil qilgan β burchagining tangensi(kotangensi)ga to'g'ri proporsional. U nochiziq elementning kuchlanish yoki tok kichik o'zgarishidagi holatini tavsiflaydi. Shuni ta'kidlash joizki, chiziqli VAX li elementda $R_{st} = R_o (G_{st} = G_o)$.

11.2. O'zgarmas tok nohiziqli elektr zanjirlarini hisoblash

Nohiziqli zanjirlarni hisoblash usullarini quyidagi uch guruhga ajratish mumkin:

1. *Grafik usul.* Bu usul zanjirdagi nohiziqli va chiziqli elementlar VAX lari grafik ko'rinishda berilganda qo'llaniladi hamda Kirxgof tenglamalari sistemasi grafik usulda yechiladi.

2. *Analitik usul.* Bu usul zanjirdagi nohiziqli elementlar VAX larini analitik funksiyalar bilan approksimatsiyalash imkoniyati bo'lganda qo'llaniladi.

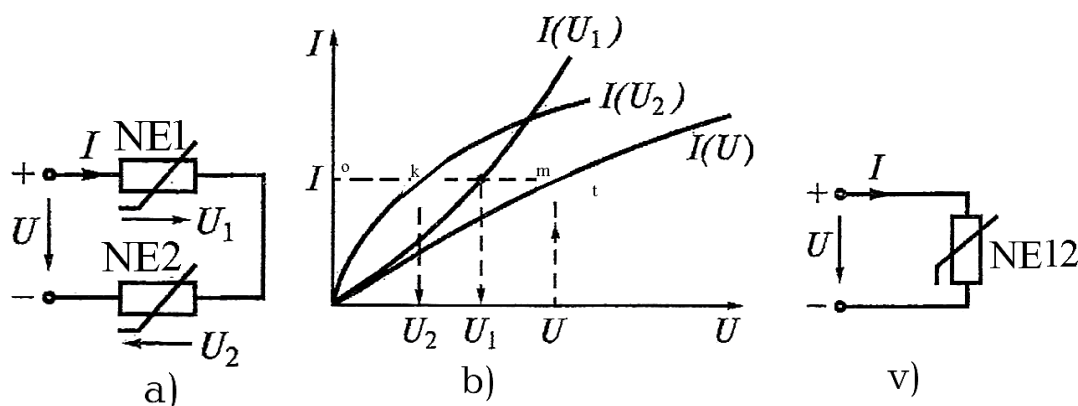
3. *Grafo-analitik usul.* Bu usul zanjirning chiziqli qismi analitik ifodalanganda va nohiziqli elementlar VAX lari grafik ko'rinishda berilgan hollarda qo'llaniladi.

Zanjirdagi nohiziqli elementning VAX si qanday (grafik yoki analitik) ko'rinishda berilishiga qarab zanjirni hisoblashda yuqoridagi usullardan biri tanlanadi.

11.2.1. Nohiziqli elektr zanjirlarni grafik usulda hisoblash

Shoxobchalanmagan va elementlarining VAX lari grafik usulda berilgan nohiziqli zanjirlarni grafik usulda hisoblash qulay hisoblanadi. Bunday zanjirlarni hisoblash - zanjirning tegishli qismidagi tok va kuchlanishlarni VAX lar yordamida topish demakdir. Bunda nohiziqli elementlarning VAX lari ularning o'zaro ulanish usuliga qarab tok yoki kuchlanish o'qi bo'ylab qo'shiladi.

1. *Nohiziqli elementlarning ketma-ket ulanishi.* 11.4- rasm, *a* da ikkita nohiziqli element NE1 va NE2 lar ketma-ket ulangan sxemasi, ular VAX lari esa 11.4- rasm, *b* da keltirilgan.

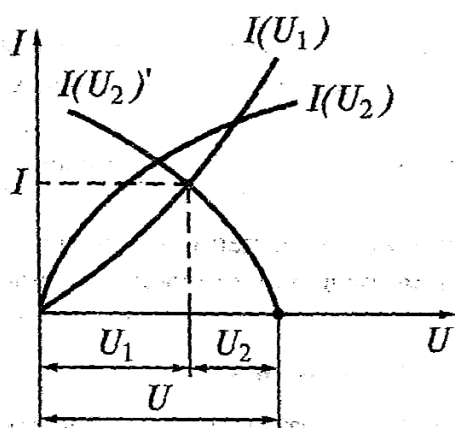


11.4- rasm

Sxemadan ko'rinib turibdiki, ikkala NE dan bir xil tok o'tadi, kuchlanishlar esa, umumiy holda, har xil qiymatga ega. Shuning uchun ham zanjirning umumiy VAX sini topishda NE1 va NE2lar VAX larini Kirxgof 2-qonuni asosida kuchlanish o'qi bo'ylab qo'shamiz. Buning uchun kuchlanish o'qiga parallel bo'lgan to'g'ri chiziqlar o'tkazamiz va tokning qiymatiga mos keladigan kuchlanishlar qiymatlarini qo'shamiz. Yani I tok NE1 o'tib undan om kesmaga proporsiyonal U_1 kuchlanish hosil qiladi, huddi shu tok I NE2 dan o'tib, undan ok kesmaga proporsiyonal U_2 kuchlanish hosil qiladi. Kirxgof 2-qonuniga ko'ra zanjirdagi umumiy kuchlanish $om + ok = ot$ kesmaga proporsional bo'ladi. Natijada zanjirning umumiy VAX sini hosil qilamiz (11.4- rasm, b). Manba kuchlanishining ma'lum (U) qiymatiga to'g'ri keladigan zanjirdagi tok (I) va NE1 va NE2 lardagi kuchlanish pasayishlari (U_1, U_2)ni topish uchun kuchlanish o'qining U nuqtasidan zanjirning umumiy VAX sini kesib o'tuvchi tok o'qiga parallel to'g'ri chiziq o'tkazamiz. Bu to'g'ri chiziqni umumiy VAX ni kesishgan nuqtasidan tok o'qiga perpendikulyar tushiramiz. Bu perpendikulyarni tok o'qi bilan kesishgan nuqtasi U kuchlanish ta'sirida zanjirda hosil bo'ladigan tok qiymatiga, uni NE1 va NE2 VAX lari bilan kesishgan nuqtalarining absissalari esa NE1 va NE2 elementlardagi kuchlanishlar pasayishlari U_1 va U_2 ga teng bo'ladi hamda bunda albatta $U = U_1 + U_2$ tenglik (Kirxgof 2- qonuni) bajarilishi lozim. Berilgan zanjir ekvivalent sxemasi 11.4- rasm, v da keltirilgan.

Zanjirdagi elementlar soni uchta yoki undan ortiq bo'lganda ham hisoblash tartibi xuddi shunday bo'ladi.

Nochiziq zanjirni uning natijaviy VAX sini qurmasdan ham hisoblash mumkin. Buning uchun manba kuchlanishining berilgan qiymati uchun $U_2 = U - U_1$ tenglikni grafikda hosil qilish yetarli bo'ladi. Buning uchun



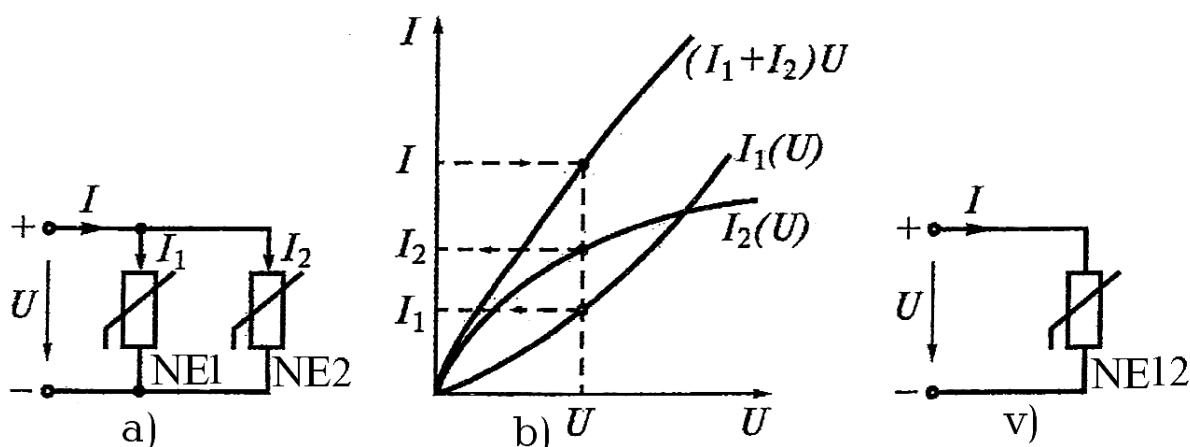
11.5- rasm

$I(U_2)$ egri chiziqni kuchlanish o'qi bo'ylab koordinata boshidan manba kuchlanishining berilgan qiymati U qiymatiga parallel ko'chiramiz va uni tok o'qiga nisbatan burib, oyna tasvirini hosil qilamiz (11.5- rasm). Natijada $I(U_2)'$ grafikni hosil qilamiz. Bu grafikni $I(U_1)$ grafik bilan kesishgan nuqtasidan kuchlanish o'qiga perpendikulyar tushirib

NE1 va NE2 elementlardagi U_1 va U_2 kuchlanishlarni, shu nuqtadan tok o'qiga perpendikulyar o'tkazib zanjirdan o'tayotgan I tokni hosil qilamiz.

2. *Nochiziq elementlarning parallel ulanishi.* 10.6- rasm, a da elementlari o'zaro parallel ulangan nochiziq zanjir sxemasi, elementlarning VAX lari esa 11.6- rasm, b da keltirilgan.

Agar manba kuchlanishi berilgan bo'lsa, u holda $I_1(U)$ va $I_2(U)$ VAXlar yordamida I_1 va I_2 toklarni, Kirxgof 1- qonuni asosida esa $I = I_1 + I_2$ ni topamiz.



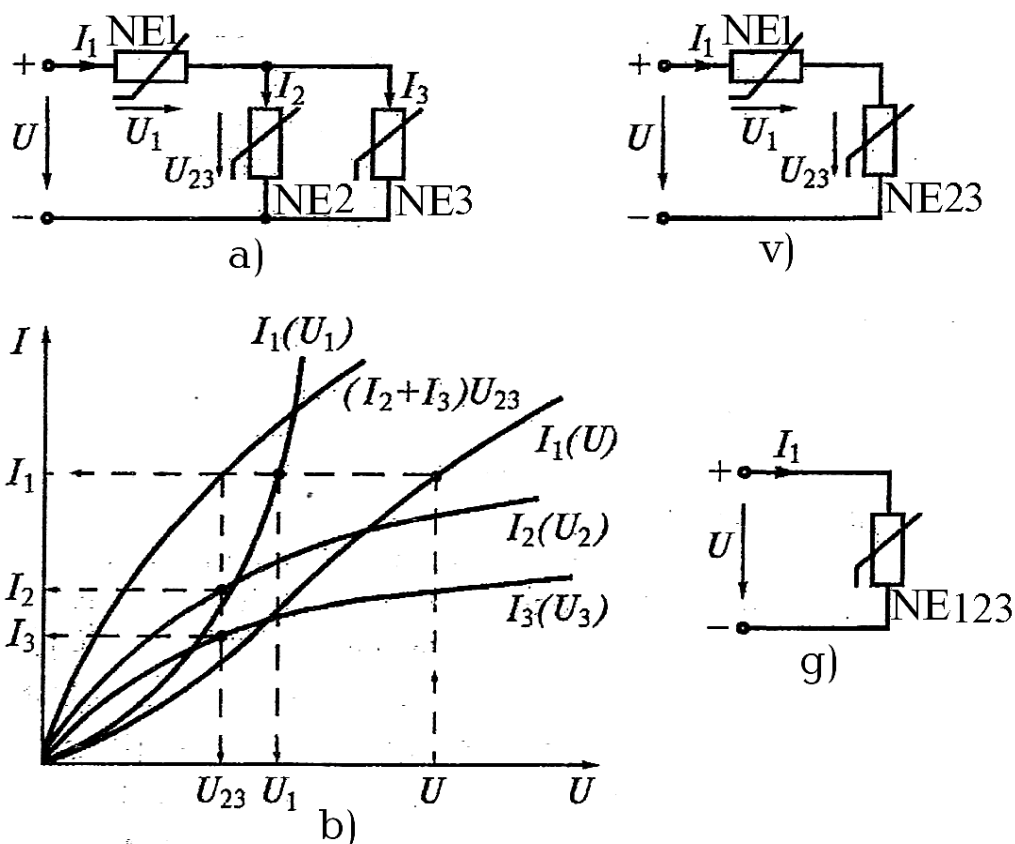
11.6- rasm

Agar zanjir tok manbayidan ta'minlanayotgan bo'lsa, u holda U kuchlanish, I_1 va I_2 toklarni topish uchun zanjirning umumiy VAX sini qurish kerak bo'ladi. Buning uchun tok o'qiga parallel bo'lgan to'g'ri chiziqlar o'tkazamiz va kuchlanish qiymatiga mos keladigan toklar qiymatlarini qo'shamiz.

Natijada $(I_1 + I_2)U$ umumiy VAX ni hosil qilamiz (11.6- rasm, b). Bu VAX ga mos sxema 11.6- rasm, v da keltirilgan. I tok qiymatiga mos kuchlanish U , I_1 va I_2 toklar qiymatlarini topish uchun I tokka mos keluvchi tok o'qidan kuchlanish o'qiga parallel to'g'ri chiziq o'tkazamiz va uni umumiy VAX bilan kesishgan nuqtasidan kuchlanish o'qiga perpendikulyar tushiramiz hamda U , I_1 va I_2 qiymatlarini topamiz.

3. *Nochiziq elementlarning aralash ulanishi.* 11.7- rasm, a da NE1, NE2 va NE3 nochiziq elementlar o'zaro aralash ulangan zanjir, 11.7- rasm, b da esa ularning VAX lari keltirilgan. Bunda manba kuchlanishi ma'lum bo'lib, shoxobchalardagi toklar va elementlardagi kuchlanish pasayishlarini topish talab qilinadi. Ushbu zanjir quyidagi tartibda hisoblanadi. Avval

parallel ulangan NE1 va NE2 VAX lari $I_2(U_2)$ va $I_3(U_3)$ tok o'qi bo'yicha qo'shiladi va $(I_2 + I_3)U_{23}$ VAX hosil qilinadi (11.7- rasm, b).

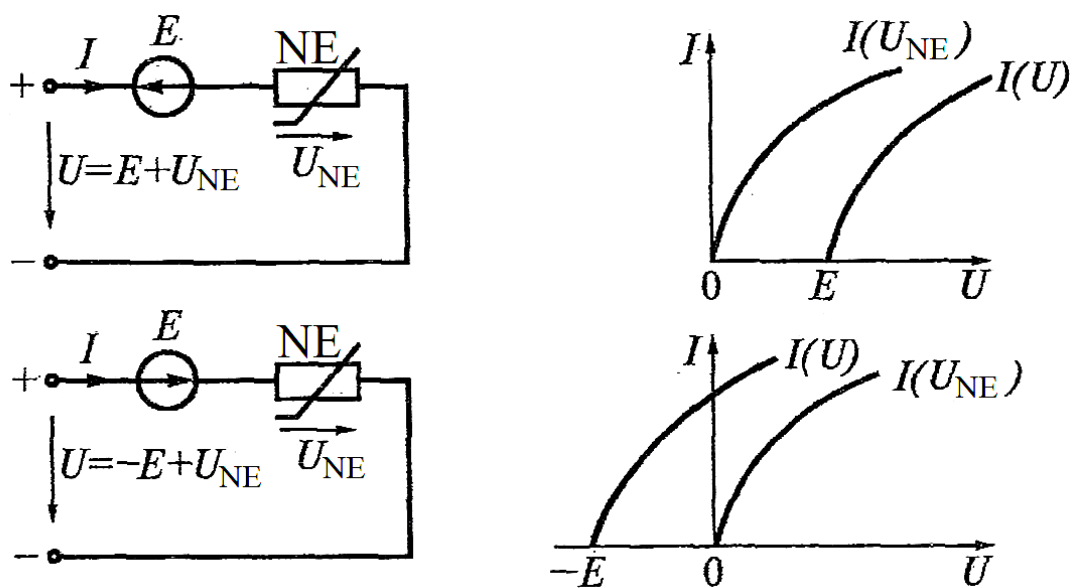


11.7- rasm

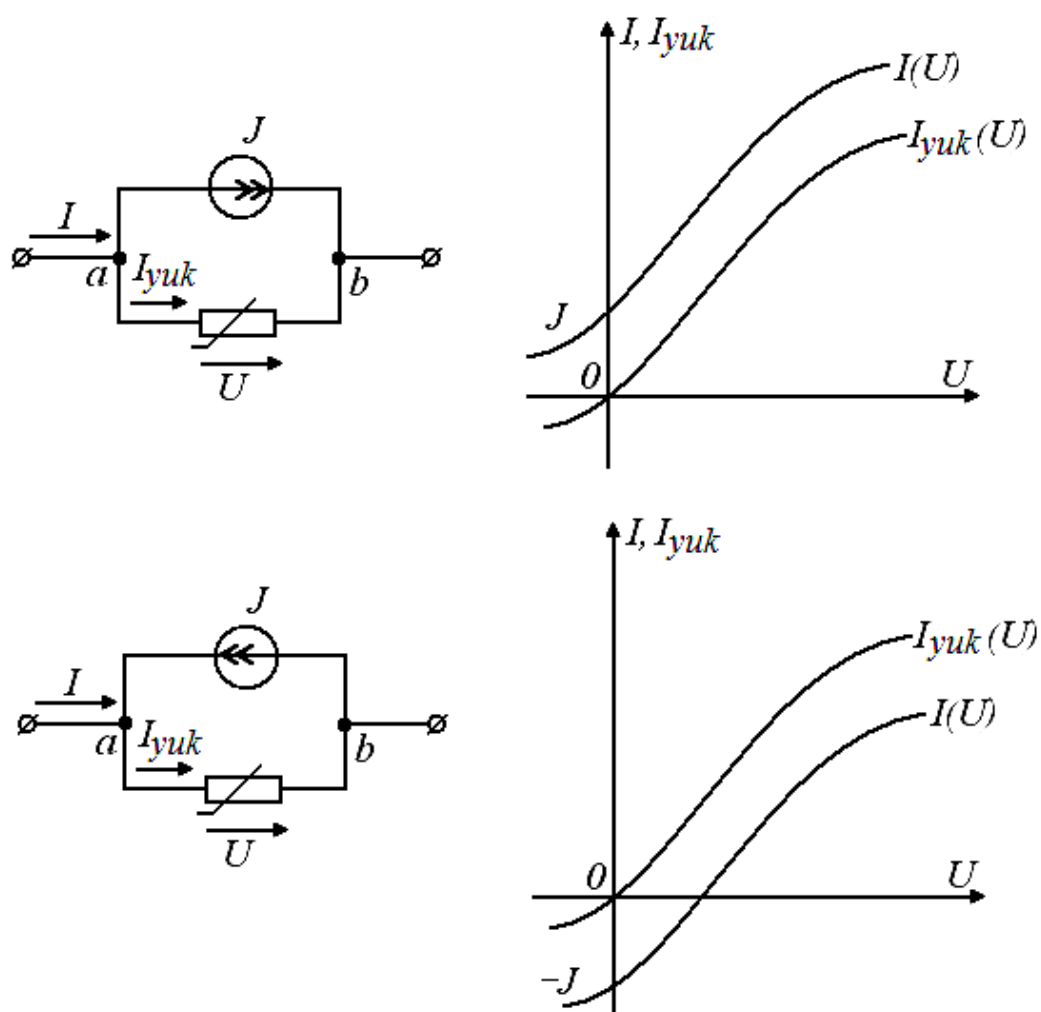
Bunda zanjir 11.7- rasm, v da keltirilgan sxema ko'rinishiga keladi. Zanjirni umumiy VAX sini qurish uchun NE1 va NE23 elementlar VAX larini kuchlanish o'qi bo'yicha qo'shamiz va $I_1(U)$ xarakteristikani hosil qilamiz. Bu xarakteristikaga mos keluvchi zanjir sxemasi 11.7- rasm, g da ko'rsatilgan. Manba kuchlanishining qiymatiga mos keluvchi I_1 tokni, so'ngra esa U_1 va U_{23} kuchlanishlarni topamiz. U_{23} kuchlanish asosida $I_2(U_2)$ va $I_3(U_3)$ VAX lardan foydalanib I_2 va I_3 toklar qiymatlarini aniqlaymiz.

4. EYK manbai va noxiziq element ketma-ket ulangan zanjir (11.8- rasm).

Bunday hollarda zanjirning umumiy VAX sini hosil qilish uchun NE VAXsi kuchlanish o'qi bo'ylab E birlikka suriladi. Agar yo'nalishi zanjirdagi tokning yo'nalishiga mos bo'lsa, u holda NE xarakteristikasi chapga, aks holda esa o'ngga E birlikka suriladi.



11.8- rasm



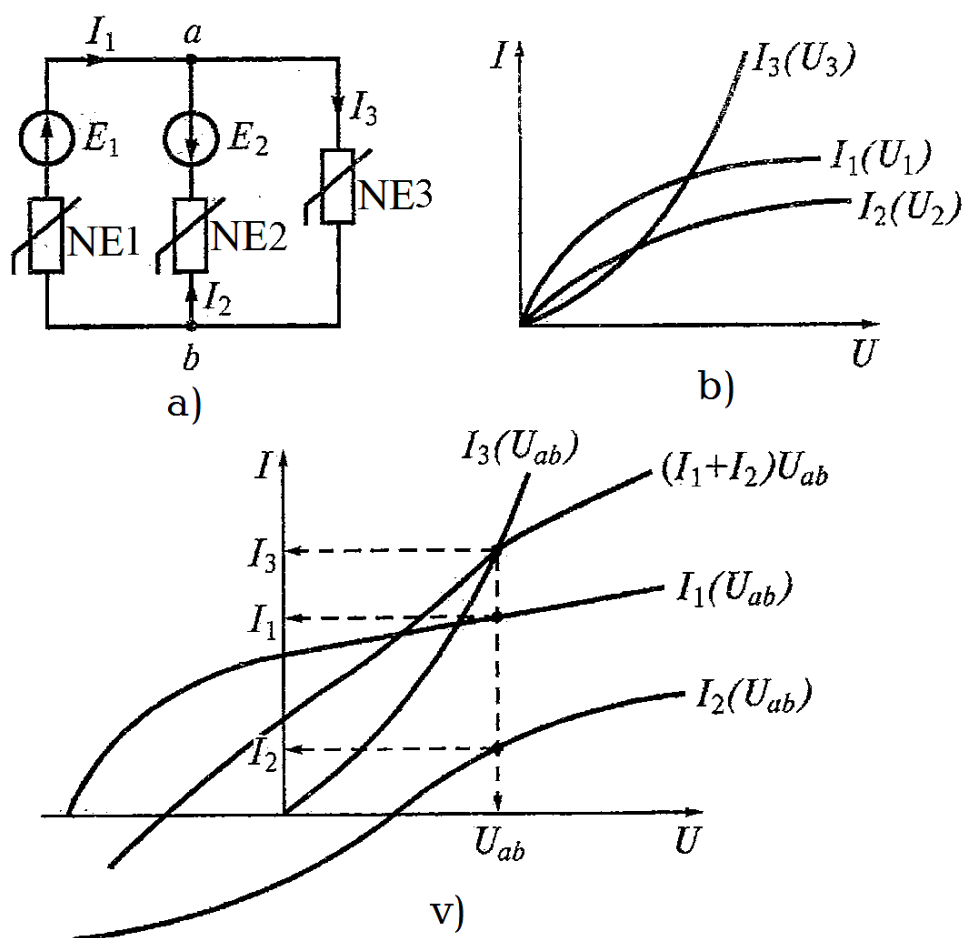
11.9- rasm

5. Tok manbayi va noxiziqliq element parallel ulangan zanjir (11.9-rasm). Bu holatda zanjirning umumiy VAXsini hosil qilish uchun NE xarakteristikasini tok (ordinata) o'qi bo'ylab manba tokining qiymatiga teng bo'lgan kattalikka yuqoriga yoki pastga surish lozim bo'ladi.

Agar manba tokining yo'nalishi zanjirning shoxobchalanmagan qismidagi tok yo'nalishiga mos bo'lsa, u holda NE VAXsi yuqoriga, aks holda esa pastga J birlikka suriladi.

6. Ikkita tugunga ega bo'lgan noxiziqliq zanjirni hisoblash. Ikkita tugunga birlashtirilgan uchta parallel shoxobchali zanjirni ko'rib chiqamiz. Zanjir ikkita EYK manbayi va uchta noxiziqliq elementdan tashkil topgan bo'lib, sxemasi va noxiziqliq elementlar VAX lari mos ravishda 11.10-rasm, a va b da keltirilgan. Aytaylik $E_1 > E_2$ bo'lsin.

Shoxobchalardagi toklar yo'nalishlarini ixtiyoriy tanlaymiz va har bir shoxobcha VAX sini quramiz. $I_1(U_{ab})$ VAX ni qurish uchun $I_1(U_2)$ xarakteristikani kuchlanish o'qi bo'ylab E_1 birlikka chapga suramiz, chunki E_1 va I_1 yo'nalishlari bir xil (11.10-rasm, v). $I_2(U_{ab})$ VAX ni qurish uchun

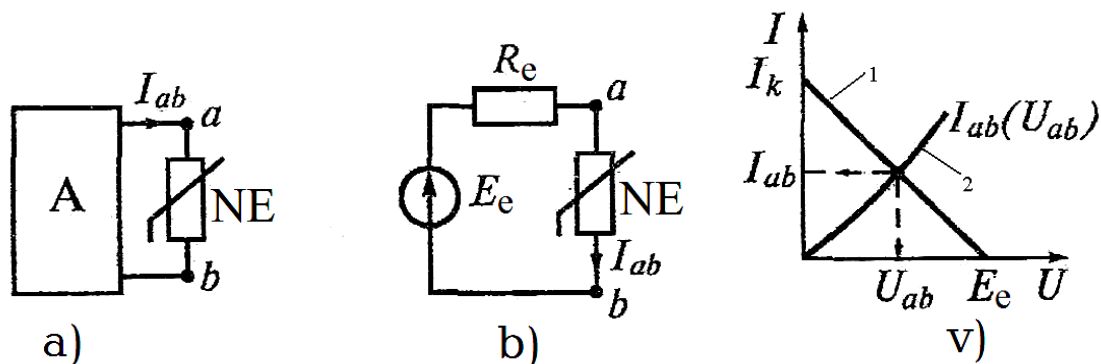


11.10- rasm

esa $I_2(U_2)$ xarakteristikani E_2 birlikka o'ngga (E_2 va I_2 yo'nalishlari o'zaro qarama-qarshi bo'lganligi sababli) siljitamiz. Kirxgofning 1-qonuniga ko'ra $I_1 + I_2 = I_3$. Shuning uchun $I_1(U_{ab})$ va $I_2(U_{ab})$ VAX larni tok o'qi bo'yicha qo'shamiz va $(I_1 + I_2)U_{ab}$ va $I_3(U_{ab})$ VAX larni o'zaro kesishish nuqtasidan kuchlanish o'qiga perpendikulyar tushiramiz.

Bu perpendikulyarning $I_1(U_{ab})$ va $I_2(U_{ab})$ xarakteristikalar bilan kesishgan nuqtalarining ordinatalari bizga kerak bo'lgan I_1 va I_2 toklarni beradi.

7. *Shoxobchalangan nochiziqli zanjirlarni hisoblashda ekvivalent generator usulini qo'llash.* Tarkibida bitta nochiziqli element bo'lgan shoxobchalangan nochiziqli zanjirni ekvivalent generator usuli yordamida hisoblash mumkin. Buning uchun nochiziqli elementli shoxobchani alohida ajratib, zanjirning qolgan chiziqli qismini aktiv ikki qutblik ko'rinishida tasvirlaymiz (11.11- rasm, a). Bizga ma'lumki, aktiv chiziqli ikki qutblikni ekvivalent generator bilan almashtirishimiz mumkin. Bunda generator EYKi ajratilgan shoxobcha qismalaridagi kuchlanishga, ichki qarshiligi esa passiv ikki qutblik kirish qarshiligiga teng (11.11- rasm, b). $U_{ab.s.ish.}$ kuchlanish chiziqli zanjirlarni hisoblashda qo'llanilgan usullardan biri yordamida aniqlanishi mumkin. 11.11- rasm, b da keltirilgan ekvivalent zanjirni grafik usulda hisoblash uchun avval ekvivalent generator tashqi xarakteristikasi quriladi (1- chiziqli).



11.11- rasm

Bu xarakteristika $U_{ab} = E_{ekv} - I_{ab} R_{ekv}$ tenglama asosida quriladi, ya'ni $I_{ab} = 0$ da $U_{ab} = E_{ekv}$ va $U_{ab} = 0$ da $I_{ab} = E_{ekv} / R_{ekv} = I_k$

Nochiziqli element VAX si (2- chiziqli) va ekvivalent generator tashqi xarakteristikasi (1- chiziqli) o'zaro kesishish nuqtasining koordinatalari nochiziqli elementdagi tok va kuchlanishni beradi.

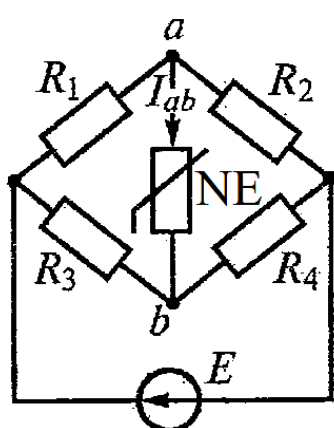
Masala. 11.12- rasm, *a* da keltirilgan zanjirdagi nochiyiq elementdan o'tayotgan tok topilsin. Bunda $R_1 = 30 \text{ Om}$, $R_2 = 60 \text{ Om}$, $R_3 = 20 \text{ Om}$, $R_4 = 20 \text{ Om}$, $E = 360 \text{ V}$ bo'lib, NE VAX si 10.12 - rasm, *b* da berilgan.

Yechish. 1. $U_{ab.s.ish.}$ kuchlanishni topish uchun 10.12- rasm, *v* dagi sxemadan foydalanamiz. Bunda:

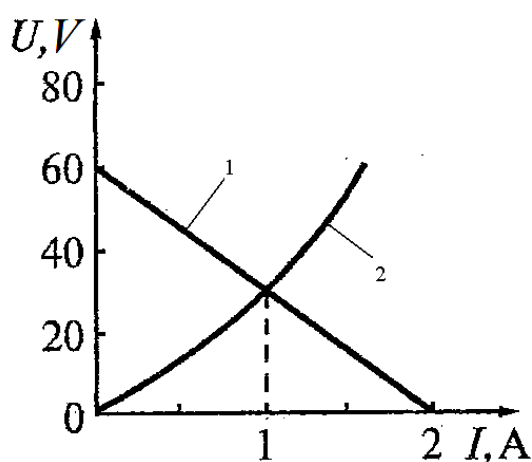
$$I_{1s.ish} = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{360}{30 + 60} = 4 \text{ A},$$

$$I_{2s.ish} = \frac{E}{R_3 + R_4} = \frac{360}{20 + 20} = 9 \text{ A},$$

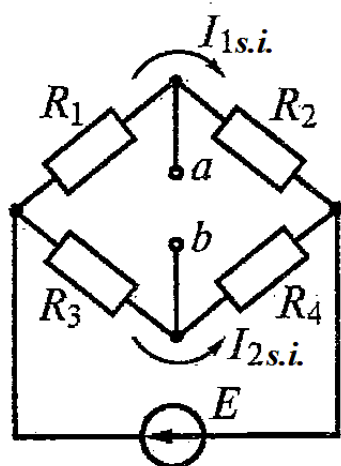
$$U_{ab.s.ish} = I_{2s.ish} R_3 - I_{1s.ish} R_1 = 9 \cdot 20 - 4 \cdot 30 = 60 \text{ V}.$$



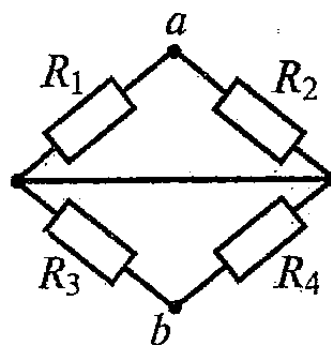
a)



b)



v)



g)

11.12- rasm

2. Ekvivalent generator ichki qarshiligini topish uchun 11.12- rasm, *g* dagi sxemadan foydalanamiz:

$$R_{ekv} = R_{ich.} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = 30 \text{ Om.}$$

3. Ekvivalent generator tashqi xarakteristikasini qurish uchun zanjirdagi qisqa tutashish tokini quyidagicha aniqlaymiz:

$$I_{q.t.} = \frac{E_{ekv}}{R_{ekv}} = \frac{U_{abs.ish}}{R_{ich}} = \frac{60}{30} = 2 \text{ A.}$$

11.12- rasm, b da ekvivalent generator tashqi xarakteristikasi $E_{ekv} = 60V$ da $I = 0$ va $U = 0$ da $I_{q.t.} = 2A$ ($I_{q.t.}$ - qisqa tutashish rejimidagi tok) nuqtalar asosida qurilgan. (1- chiziq) Bu xarakteristikani NE VAX si bilan kesishgan nuqtasining absissasi izlanayotgan tok qiymatiga teng bo'ladi, ya'ni $I_{ab} = 1A$.

11.2.2. Nochiziqliq elektr zanjirlarini analitik usulda hisoblash

Agar nochiziqliq zanjirlardagi nochiziqliq elementlar VAX lari analitik tenglamalar bilan ifodalansa, u holda zanjirni analitik usullar yordamida hisoblash imkoniyati paydo bo'ladi. Nochiziqliq element VAX sini analitik tenglama bilan ifodalash *approksimatsiyalash* deb ataladi.

Nochiziqliq elektrotexnikada approksimatsiyalash amalini bajarishda ko'pchilik hollarda quyidagi funksiyalar qo'llaniladi:

1) darajali polinom

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n;$$

2) eksponensial polinom

$$y = A_0 + A_1 e^{a_1 x} + A_2 e^{a_2 x^2} + \dots + A_n e^{a_n x^n};$$

3) trigonometrik polinom

$$y = A_0 + A_1 \sin(x + \varphi_1) + A_2 \sin(2x + \varphi_2) + \dots + A_n \sin(nx + \varphi_n);$$

4) kasr-darajali funksiya

$$y = Ax^\alpha, \text{ bu yerda } \alpha - \text{kasr son};$$

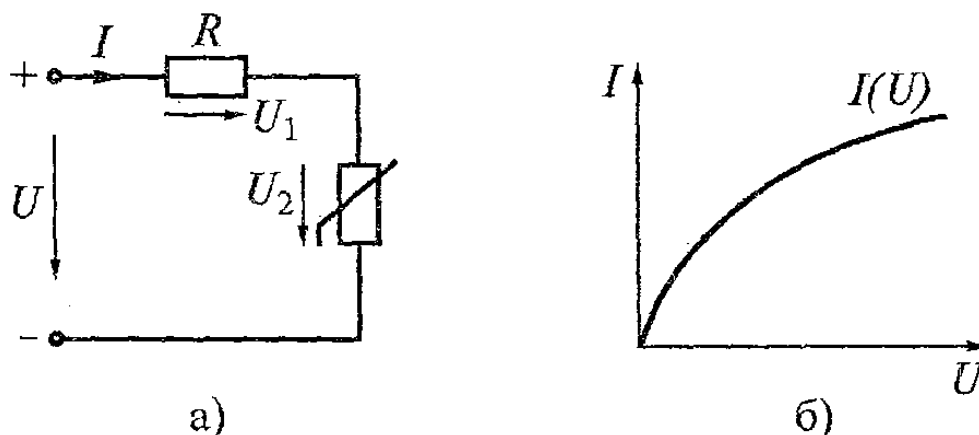
5) turli transsendent funksiyalar

$$y = a + b \operatorname{th} \beta x; y = a + b \operatorname{arctg} \beta x; y = a \operatorname{sh} \beta x.$$

Approksimatsiyalash masalasi ikkita bosqichdan iborat:

- berilgan nochiziqliq element VAX siga to'g'ri keladigan approksimatsiyalovchi funksiya tanlanadi;
- tanlangan approksimatsiyalovchi funksiyaning noma'lum koeffitsiyentlari aniqlanadi.

O‘zaro ketma-ket ulangan chiziqli va nochiziqli elementlardan tashkil topgan zanjirni ko‘rib chiqaylik (11.13- rasm, a). Nochiziqli element VAX si 11.13- rasm, b da berilgan.



11.13- rasm

Bu VAX darajali polinom bilan approksimatsiyalansa, maqsadga muvofiq bo‘ladi. Agar darajali polinomni faqat ikkita hadi bilan chegaralansak, u holda nochiziqli elementdagi kuchlanish pasayishining undan o‘tayotgan tokka bog‘liqligini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$U_2 = a_1 I + a_2 I^2.$$

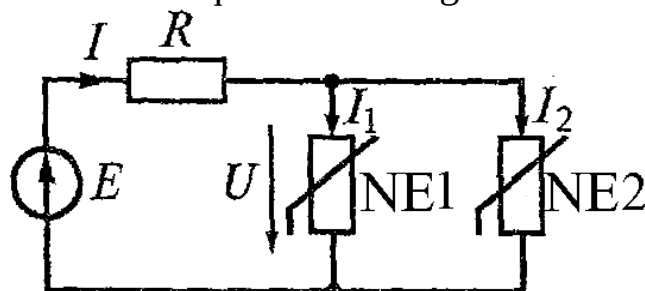
Berilgan zanjir uchun Kirxgofning ikkinchi qonuniga asosan quyidagi muvozanat tenglamasini hosil qilamiz:

$$U = U_1 + U_2 = RI + a_1 I + a_2 I^2.$$

Hosil qilingan kvadrat tenglamani yechib, manba kuchlanishi va zanjir parametrlari qiymatlari berilganda zanjirdagi tok qiymatini topamiz.

Masala. 11.14- rasmda keltirilgan zanjirda quyidagilar berilgan: $E = 30V$; $R = 20\text{ Om}$; NE1 va NE2 larning VAX lari mos ravishda $I_1(U) = a_1 U + a_2 U^2$ va $I_2(U) = b_1 U + b_2 U^2$ tenglamalar ko‘rinishda berilgan, bu yerda $a_1 = 0,1\text{ A/V}$; $a_2 = 0,003\text{ A/V}^2$; $b_1 = 0,04\text{ A/V}$; $b_2 = 0,002\text{ A/V}^2$.

Nochiziqli elementlardagi kuchlanish va toklar topilsin.



11.14- rasm

Yechish. Berilgan zanjir uchun Kirxgof birinchi va Om qonunlari asosida quyidagilarni yozamiz:

$$I = I_1 + I_2, \quad I = \frac{E - U}{R}.$$

Yuqoridagi 1- tenglamaga $I_1(U)$ va $I_2(U)$ lar ifodalarini

qo'yib va ikkala tenglama o'ng tomonlarini o'zaro tenglashtirib quyidagini hosil qilamiz:

$$[(E - U/R)] = (a_2 + b_2)U^2 + (a_1 + b_1)U$$

yoki berilgan qiymatlarni qo'ysak:

$$0,005U^2 + 0,1U - 1,5 = 0.$$

Bundan $U = 10V$.

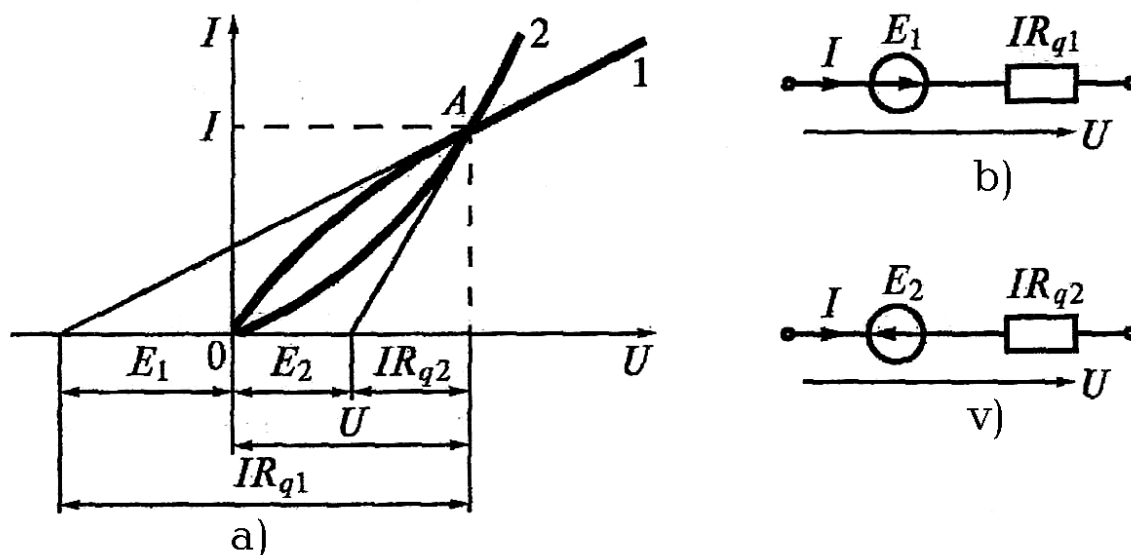
O'zaro parallel ulangan nochiqliq elementlardagi kuchlanishning topilgan qiymatini ularning VAX lari tenglamalariga qo'yib, toklarni topamiz:

$$I_1 = 0,1 \cdot 10 + 0,003 \cdot 10^2 = 0,4 A,$$

$$I_2 = 0,04 \cdot 10 + 0,002 \cdot 10^2 = 0,6 A.$$

11.2.3. Nochiziq elektr zanjirlarini linearizatsiya usuli yordamida hisoblash

Linearizatsiya (chiziqlilashtirish) usuliga ko'ra, zanjirdagi nochiqliq element, qarshiligining qiymati berilgan nochiqliq elementning dinamik qarshiligiga teng bo'lgan chiziqli element va EYK manbayi bilan almashtiriladi. Bunda nochiqliq elementning ish rejimi VAX ning to'g'ri chiziqli bilan almashtirilgan bo'lagi chegaralaridan chiqmasligi lozim. 11.15- rasm, a da ikkita nochiqliq elementning VAX lari keltirilgan (1- va 2- chiziqlar).



11.15- rasm

Yuqorida aytilganlarga ko'ra, ularni quyidagi tenglamalar orqali ifodalanuvchi to'g'ri chiziqlar bilan almashtirish mumkin:

$$U = -E_1 + IR_{q1}, \quad U = E_2 + IR_{q2}.$$

Bu tenglamalarga 11.15- rasm, *b* va *v* dagi sxemalar mos keladi.

Shunday qilib, nochiziqli element ekvivalent chiziqli qarshilik va EYK bilan almashtirilishi mumkin. Bunda agar nochiziqli element VAX si tegishli nuqtasidan o'tkaziladigan to'g'ri chiziqli absissa (kuchlanish) o'qini manfiy qismini kesib o'tsa, u holda ekvivalent sxemada EYK va tok yo'nalishi mos, aks holda esa qarama-qarshi bo'ladi. Bunday ekvivalent almashtirish natijasida nochiziqli element chiziqli zanjir shoxobchasiga almashadi va uni hisoblash uchun chiziqli zanjirni hisoblashning an'anaviy usullaridan foydalanishimiz mumkin.

Masala. 11.16- rasm, *a* dagi sxema uchun nochiziqli element va chiziqli qarshilikdagi kuchlanish pasayishlari va zanjirdan o'tayotgan tok topilsin. Quyidagilar berilgan: $U = 230\text{ V}$; $R_1 = 190\text{ Ohm}$, NE VAX si 11.16- rasm, *b* da keltirilgan.

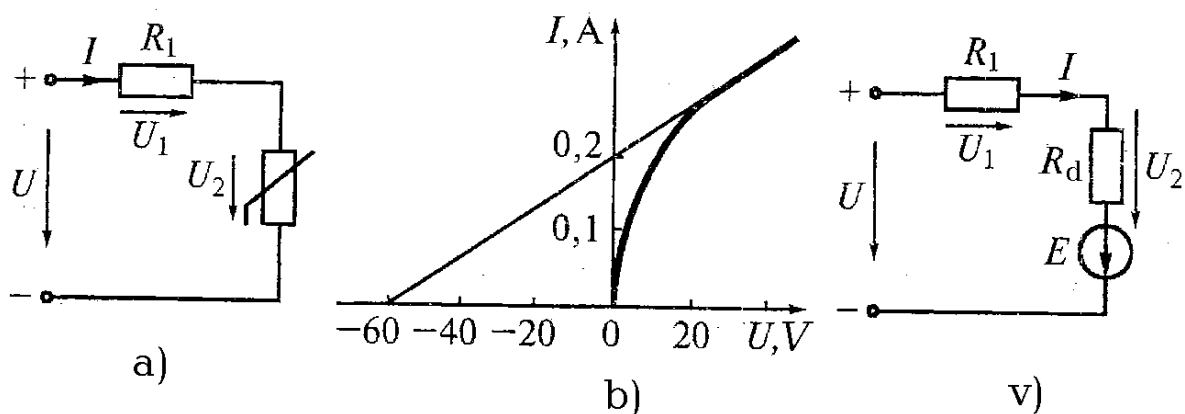
Yechish. NE VAX si ishchi qismini to'g'ri chiziqli bilan almashtiramiz (11.16- rasm, *b*). Natijada quyidagini hosil qilamiz:

$$U_2 = E + IR_o$$

bu yerda, $E = -60\text{ V}$; $R_o = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{60}{0,2} = 300\text{ Ohm}$.

Yuqoridagi almashtirish natijasida 11.16- rasm, *v* da ko'rsatilgan chiziqli zanjirni hosil qilamiz. Kirxgof 2 - qonuniga ko'ra:

$$U = U_1 + U_2 = IR_1 + E + IR_o = 190I - 60 + 300I = 490I - 60.$$



11.16- rasm

Bundan

$$I = \frac{U + 60}{490} = \frac{230 + 60}{490} \approx 0,6; \quad U_1 = IR_1 = 0,6 \cdot 190 = 110\text{ V};$$

$$U_2 = -60 + I \cdot 300 = -60 + 0,6 \cdot 300 = 120\text{ V}.$$

11.2.4. Nochiziq elektr zanjirlarini iteratsiya usuli yordamida hisoblash

Shoxobchalangan nochiziq zanjirda manba kuchlanishi, chiziqli qarshiliklar qiymatlari va nochiziq elementlar VAX lari berilgan bo'lib, shoxobchalardagi toklarni topish talab qilinsin. Berilgan zanjirning muvozanat tenglamalari Kirxgof $\sum I = 0$ va $\sum E = \sum (RI + U)$ qonunlari asosida tuziladi. Bu tenglamalarda o'zaro VAX yordamida bog'langan kuchlanishlar va toklar noma'lum kattaliklar hisoblanadi.

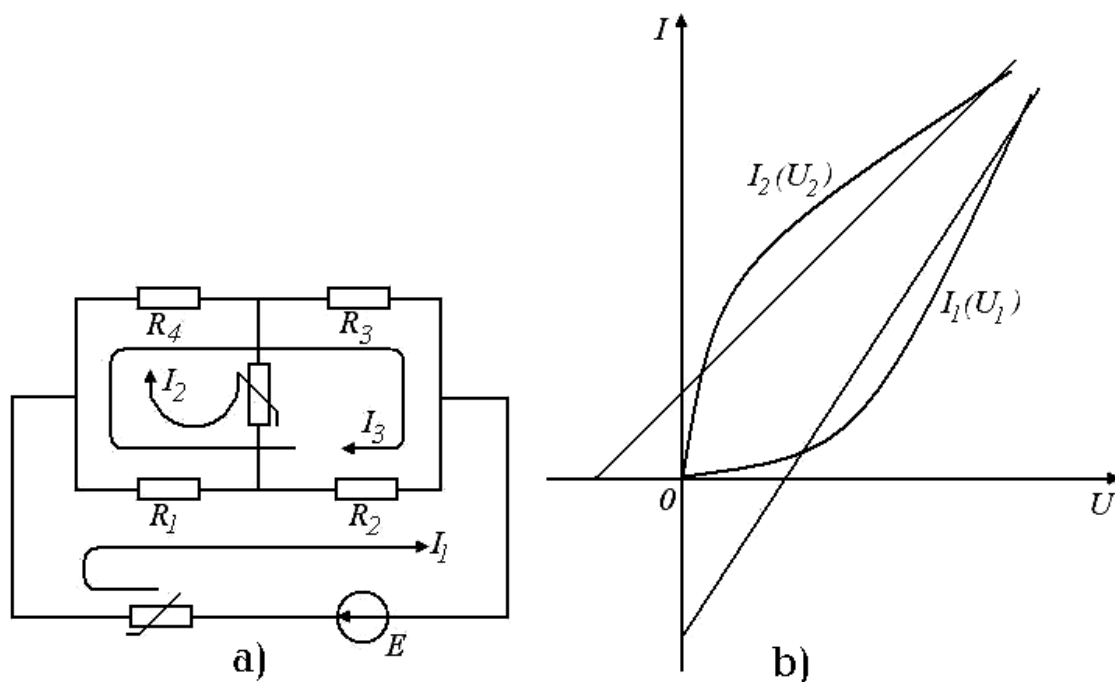
Bu masalani yechishni, ya'ni noma'lum toklarni topishni *iteratsiya (ketma-ket yaqinlashish) usuli* yordamida amalga oshirish mumkin. Bu usulga ko'ra, avval noma'lum tok va kuchlanishlarning taqribiy qiymatlari topiladi. Buning uchun zanjirdagi har bir nochiziq element chiziqli qarshilik va EYK bilan almashtiriladi hamda zanjirning muvozanat tenglamalari noma'lum toklarga nisbatan yechiladi. Toklarning aniqlangan qiymatlariga mos keluvchi kuchlanishlar qiymatlari NE lar VAX laridan aniqlanadi. Kuchlanishlar qiymatlari yana zanjirning muvozanat tenglamalariga qo'yilib, ularni birgalikda yechib, toklarning yangi qiymatlari topiladi. Bu qiymatlar asosida NE lar VAX laridan yana kuchlanishlarning yangi qiymatlari topiladi va h.k. Bu jarayon to kuchlanishlar va toklar qiymatlari qaytarilib qolguncha davom ettiriladi. Bu usulga ko'ra, noma'lum kattalikning haqiqiy qiymatiga hisoblashlar natijasida bosqichma-bosqich yaqinlashib boriladi. Shuning uchun ham bu usul ketma-ket yaqinlashish usuli deb ataladi.

Masala. 11.17- rasm, *a* da berilgan sxemadagi ikkita nochiziq elementning VAX lari 11.17- rasm, *b* da keltirilgan. Ulardagi tok masshtabi $m_I = 0,1 A/mm$, kuchlanish masshtabi esa $m_U = 0,5 V/mm$. Agar $E = 20 V$, $R_1 = 4 \Omega$, $R_2 = 1 \Omega$, $R_3 = 3 \Omega$, $R_4 = 2 \Omega$ bo'lsa, nochiziq elementlardagi tok va kuchlanishlarni iteratsiya usuli yordamida aniqlang.

Yechish. Zanjirdagi kontur toklar shunday tanlanganki, nochiziq elementlardagi toklar bevosita kontur toklarga teng. Sxema uchun Kirxgof 2 - qonuni asosida tenglamalar sistemasini quyidagicha tuzamiz:

$$\begin{aligned}(R_1 + R_2)I_1 - R_1I_2 - (R_1 + R_2)I_3 &= E - U_1, \\ -R_1I_1 + (R_1 + R_4)I_2 + (R_1 + R_4)I_3 &= -U_2, \\ -(R_1 + R_2)I_1 + (R_1 + R_4)I_2 + (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)I_3 &= 0,\end{aligned}$$

bu yerda I_1, I_2, I_3 - kontur toklar. U_1 va U_2 - mos ravishda NE1 va NE2 lardagi kuchlanishlar.



11.17- rasm

Oxirgi tenglamadan I_3 tokni topib, uni 1- va 2- tenglamalarga qo'yamiz va natijada quyidagi 2 ta tenglamani hosil qilamiz:

$$\frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_\Sigma} I_1 - \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_\Sigma} I_2 = E - U,$$

$$-\frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_\Sigma} I_1 + \frac{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3)}{R_\Sigma} I_2 = -U_2.$$

Chiziqli qarshiliklar va EYK qiymatlarini qo'yamiz:

$$2,5I_1 - I_2 = 20 - U_1, \quad -I_1 + 2,4I_2 = -U_2.$$

Iteratsiya usuliga ko'ra, yechimga birinchi yaqinlashishni topish uchun nochiziqli elementlar VAX larini chiziqli qarshiliklar va EYK lar bilan almashtiramiz va grafiklardan $E_1 = 6V$ va $R_{o1} = 3Om$, $E_2 = 2,5V$, $R_{o2} = 4Om$ ekanligiga ishonch hosil qilamiz. Linearizatsiyalangan NE larda tok va kuchlanishlar quyidagi tenglamalar bilan bog'langan:

$$U_1 = 3I_1 + 6;$$

$$U_2 = 4I_2 - 2,5.$$

Bu ifodalarni Kirxgof 2 - qonuni asosida tuzilgan tenglamalarga qo'yib, toklarning dastlabki taqribiy qiymatlarini topamiz: $I_1 = 2,7 A$, $I_2 = 0,81 A$.

Toklarning topilgan qiymatlariga VAX lardan $U_1 = 60V$ va $U_2 = 0,8V$ kuchlanishlar mos keladi. Ularni yana tenglamalar sistemasiga qo'yib I_1

va I_2 toklarning yangi qiymatlarini topamiz va h.k. Ketma-ket yaqinlashish natijalari quyidagi jadval ko‘rinishida berilgan:

Yaqinlashish tartibi	I_1	U_1	I_2	U_2
1	2,7	16	0,81	0,8
2	2,46	15,4	0,8	0,722
3	2,37	15,2	0,78	0,646
4	2,31	15	0,72	0,593
5	2,3	14,9	0,712	0,588

Jadvaldagi toklar va kuchlanishlar qiymatlaridan ko‘rinib turibdiki, 4-yaqinlashishdan keyin ularning qiymatlari qaytirila boshladi. Shunday qilib, berilgan zanjir nochiziqliq elementlaridagi tok va kuchlanishlar quyidagiga teng:

$$U_1 = 14,9 \text{ V}, I_1 = 2,3 \text{ A},$$

$$U_2 = 0,588 \text{ V}, I_2 = 0,715 \text{ A}.$$

11.3. Doimiy magnit oqimli magnit zanjirlari

11.3.1. Umumiy ma'lumotlar

Ferromagnit elementlardan tashkil topgan elektrotexnik qurilmalarda magnit oqimi birlashgan yo‘llar majmuasi magnit zanjirini tashkil etadi. Bunda ferromagnit elementlar magnit singdiruvchanligi yuqori bo‘lgan materiallardan yasaladi va magnit singdiruvchanlik magnit oqimining kattaligiga bog‘liq bo‘lganligi uchun magnit zanjirlari nochiziqliq zanjirlar turkumiga kiradi.

Agar magnit zanjiri bir xil magnit materialdan yasalgan bo‘lsa, u holda u *bir jinsli magnit zanjiri* deb ataladi. Agar magnit zanjiri turli magnit xossalari materiallardan tashkil topgan bo‘lsa, u holda u *bir jinsli bo‘lmagan magnit zanjiri* deb ataladi. Agar magnit zanjirining istalgan qismida magnit oqimi bir xil qiymatga ega bo‘lsa, u holda bunday zanjir *shoxobchalanmagan magnit zanjiri* deb ataladi. Shoxobchalanmagan magnit zanjirining turli qismlarida magnit oqimi har xil qiymatga ega bo‘ladi.

Doimiy magnit oqimli magnit zanjirlarini hisoblash avvalgi paragraflarda ko‘rilgan o‘zgarmas tok nochiziqliq elektr zanjirlarini hisoblashga o‘xshab ketsa-da, ayrim farqli tomonlari mavjud. Birinchidan, magnit gisterezis hodisasi hisoblashlarga ancha noqulayliklar tug‘diradi.

Ikkinchidan, magnit zanjirining uzunligi magnit oqimining taqsimlanishiga keskin ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun ham magnit zanjirini hisoblashda maydon yoki parametrlari taqsimlangan zanjirlar nazariyalaridan foydalanishga to'g'ri keladi.

Umuman olganda, magnit zanjirlarini hisoblashda masalalar ikkita turga ajratiladi. *Birinchi tur masala*: magnit oqimi yoki magnit induksiyasining berilgan qiymatiga ko'ra chulg'amning magnit yurituvchi kuch (MYK)ini aniqlash. Bu tur masalalar odatda analitik usulda oson yechiladi. *Ikkinchi tur masala birinchisiga teskari*: MYK ning berilgan qiymatiga ko'ra magnit oqimini aniqlash. Bu tur masalalar deyarli har doim grafik usulda yechiladi. Yechish tartibi quyidagicha: magnit oqimiga ixtiyoriy qiymatlar berilib MYK qiymatlari topiladi, ya'ni birinchi tur masala yechiladi. Hisoblash natijasiga ko'ra zanjirning veber-ampere xarakteristikasi quriladi. Bu egri chiziqdan MYKning berilgan qiymatiga mos keluvchi magnit oqimining qiymati topiladi.

Fizika kursidan ma'lumki, magnit maydoniga aloqador hodisalar magnit induksiyasi, magnit oqimi, magnit maydoni kuchlanganligi, magnitlanganlik, magnit singdiruvchanlik va boshqa fizik kattalik va parametrlar bilan tavsiflanadi.

Magnit induksiyasi magnit maydonini tavsiflovchi asosiy kattalik bo'lib, magnit maydonida V tezlik bilan harakatlanayotgan q zaryadga ta'sir etuvchi kuch bilan aniqlanadi:

$F = q [\underline{V} \times \underline{B}]$. $\underline{V} \perp \underline{B}$ bo'lgan holda $F = qVB$, bunda q – elektr zaryadi, C ; v – elektr zaryadi tezligi, m/s; B – magnit induksiya, T. Bunga ko'ra: $B = \frac{F}{qV}$.

Magnit oqimi quyidagi formula yordamida aniqlanadi:

$$\Phi = \int_S \underline{B} \, d\underline{s}.$$

Bir jinsli ($B = const$) va magnit kuch chiziqlari S yuzaga perpendikular yo'nalgan maydonda quyidagi tenglik bajariladi:

$$\Phi = Bs \text{ yoki } B = \frac{\Phi}{s}.$$

Modda magnit holatini tavsiflovchi vektor kattalik bo'lib, u son jihatdan moddaning hajm elementi bilan bog'langan magnit momentni shu element hajmiga nisbatini modda hajmi va uning elementi barcha o'lchamlari nolga intilgandagi limitiga teng, ya'ni:

$$M = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}, \left[\frac{A}{m} \right]$$

bu yerda ΔV - elementar hajm, $m = is$ - tok elementar konturining magnit momenti, i, s - mos ravishda konturning toki va yuzasi.

Magnit maydoni induksiyasi va kuchlanganligi o'zaro quyidagicha bog'langan:

$$B = \mu\mu_0 H = \mu_a H ,$$

bunda μ - materialning nisbiy magnit singdiruvchanligi; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$ - magnit doimiysi; μ_a - materialning absolut magnit singdiruvchanligi.

11.3.2. Magnit zanjirlarining asosiy qonunlari

Magnit zanjirlarini hisoblash quyidagi ikkita qonunga asoslanadi:

1. *Magnit induksiyasi liniyalarining uzluksizligi qonuni.* Matematik jihatdan bu qonun quyidagicha ifodalanadi, ya'ni:

$$\oint_S \underline{B} d\underline{S} = 0 \text{ yoki } \Sigma \Phi = 0 ,$$

ya'ni shoxobchalanmagan magnit zanjirining har bir qismida magnit oqimi bir xil qiymatga ega bo'ladi.

Bu qonun magnit zanjirlari uchun Kirxgof 1- qonuni bo'lib, unga ko'ra magnit zanjirining istalgan tugunida magnit oqimlarining algebraik yig'indisi nolga teng yoki boshqacha qilib aytganda yopiq sirtga kiruvchi magnit kuch chiziqlari undan chiquvchi magnit kuch chiziqlari soniga teng bo'ladi.

2. *To'la tok qonuni.* Matematik jihatdan bu qonun quyidagicha yoziladi:

$$\oint_l \underline{H} d\underline{l} = iw = \Sigma F \text{ yoki } \Sigma U_\mu = \Sigma F .$$

Ushbu qonun quyidagicha ta'riflanadi:

«Biror berk kontur bo'ylab magnit yurituvchi kuch (MYK) shu kontur chegaralab turgan yuzadan o'tadigan to'la tokka teng yoki boshqacha qilib aytganda, magnit zanjirining ixtiyoriy berk konturida MYuK larning algebraik yig'indisi shu konturga tegishli magnit qarshiliklaridagi magnit kuchlanishlar pasayishlarining algebraik yig'indisiga teng». Bu qonun magnit zanjirlari uchun Kirxgof 2- qonunidir.

Shuni aytib o'tish joizki, magnit zanjirining a va b nuqtalari orasidagi magnit kuchlanish pasayishi deb, shu nuqtalar orasidagi magnit maydoni kuchlanganligi vektoridan olingan chiziqli integralga aytiladi (11.18-rasm), ya'ni:

$$U_{\mu ab} = \int_a^b \underline{H} \, dl.$$

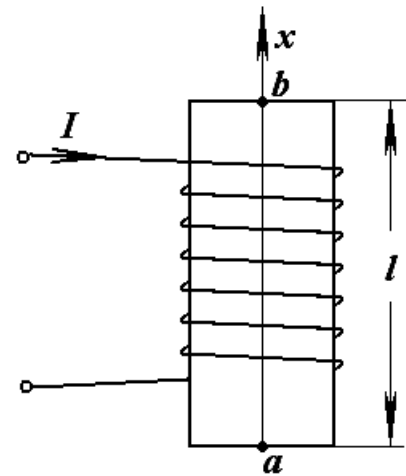
To'la tok qonuniga asosan: $Iw = Hl$

yoki undan $H = \frac{Iw}{l}$. Bu ifodani yuqoridagi ifodaga qo'yib, quyidagini hosil qilamiz:

$$U_{\mu ab} = \int_a^b H dl = \int_0^l \frac{Iw}{l} dx = Iw, \quad [A].$$

Agar magnit zanjiri n ta bo'lakchalardan iborat berk konturni

tashkil etsa, u holda $U_{\mu ab} = \sum_{k=1}^n H_k l_k$.



11.18- rasm

3. Magnit zanjiri uchun Om qonuni.

Quyidagi magnit zanjirini ko'rib chiqamiz (11.19- rasm). Bunda

I – o'ramlar soni w ga teng bo'lgan chulg'amdanda o'tayotgan tok; S , l – magnit zanjiri qismining mos ravishda ko'ndalang kesim yuzasi va uzunligi.

To'la tok yoki Kirxgof 2- qonuniga ko'ra quyidagilarni yozishimiz mumkin:

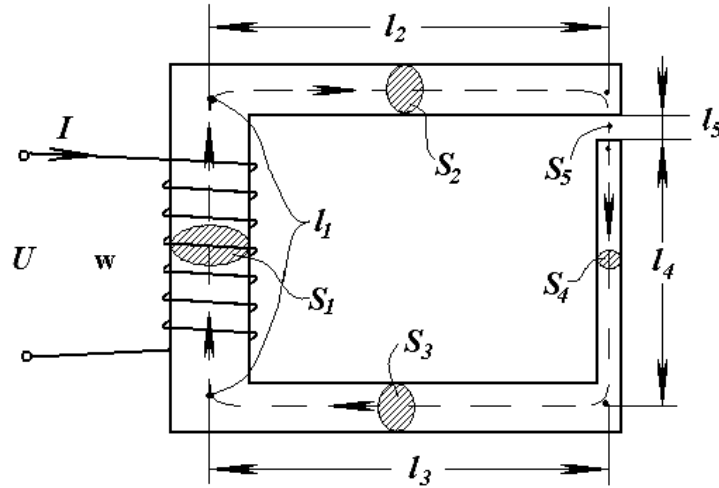
$$F = Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 + H_5 l_5,$$

bunda $H_1 = \frac{B_1}{\mu\mu_0}$; $H_2 = \frac{B_2}{\mu\mu_0}$; $H_3 = \frac{B_3}{\mu\mu_0}$; $H_4 = \frac{B_4}{\mu\mu_0}$; $H_5 = \frac{B_5}{\mu_0}$ va

$B_1 = \Phi/S_1$; $B_2 = \Phi/S_2$; $B_3 = \Phi/S_3$; $B_4 = \Phi/S_4$; $B_5 = \Phi/S_5$ - magnit zanjirining tegishli bo'lakchalaridagi mos ravishda maydon kuchlanganligi va induksiyasi. H va B qiymatlarini yuqoridagi tenglamaga qo'yamiz:

$$\begin{aligned} Iw &= \Phi \frac{l_1}{\mu\mu_0 S_1} + \Phi \frac{l_2}{\mu\mu_0 S_2} + \Phi \frac{l_3}{\mu\mu_0 S_3} + \Phi \frac{l_4}{\mu\mu_0 S_4} + \Phi \frac{l_5}{\mu_0 S_5} = \\ &= \Phi R_{\mu 1} + \Phi R_{\mu 2} + \Phi R_{\mu 3} + \Phi R_{\mu 4} + \Phi R_{\mu 5} = \Phi \Sigma R_{\mu}, \end{aligned}$$

$$\Phi = \frac{Iw}{\Sigma R_{\mu}}.$$



11.19- rasm

Soʻnggi ifoda *magnit zanjiri uchun Om qonuni* deb ataladi.

$R_{\mu i} = \frac{l_i}{\mu\mu_0 S_i}$ - magnit zanjiri *i* - boʻlakchasining *magnit qarshiligi* deb ataladi.

10.3.3. Elektr va magnit zanjirlaridagi oʻxshashliklar

Elektr va magnit zanjirlarida ayrim (Om va Kirxgof) qonunlarining oʻxshashligidan, ulardagi ayrim kattaliklarni bir-biri bilan solishtirish natijasida shunday xulosaga kelish mumkinki, unga koʻra magnit zanjirini ham xuddi elektr zanjiri singari ekvivalent almashlash sxemalar yordamida tasvirlash mumkin. Umumiy holda elektr va magnit zanjirlaridagi oʻxshashlik (analogiya)ni quyidagi jadval koʻrinishida ifodalash mumkin:

Elektr zanjiri	Magnit zanjiri
1. EYK: E [V]	MYuK: $F = Iw$ [A]
2. Elektr toki: I [A]	Magnit oqimi: F [Vb]
3. Elektr qarshilik: $R_e = \rho \frac{l_e}{S_e}$ [Ω]	Magnit qarshilik: $R_\mu = \frac{l_\mu}{\mu\mu_0 S_\mu}$ [$\frac{1}{\Omega}$]
4. Elektr kuchlanish: $U_e = \varphi_1 - \varphi_2$ [V]	Magnit kuchlanish: $U_\mu = Hl$
5. Om qonuni: $I = \frac{U_e}{R_e}$	Om qonuni: $\Phi = \frac{U_\mu}{R_\mu}$
6. Kirxgof 1-qonuni: $\sum I = 0$	Kirxgof 1-qonuni: $\sum \Phi = 0$
7. Kirxgof 2-qonuni: $\sum E = \sum U_e$	Kirxgof 2-qonuni: $\sum F = \sum U_\mu$

Klassik o'quv adabiyotlarida uchraydigan yuqorida qayd etilgan elektr va magnit zanjirlari o'rtasidagi o'xshashliklar ayrim kamchiliklarga ega. Masalan, o'zgarmas tok elektr zanjiridagi R_e qarshilikda elektr energiya issiqlik energiyasiga aylansa, o'zgarmas magnit oqimli magnit zanjiridagi R_μ qarshilikda energiya magnit maydoni energiyasi ko'rinishda to'planadi, ya'ni R_μ qarshilik reaktiv element vazifasini bajaradi. Elektr zanjirida UI ko'paytma quvvat birligida o'lchansa, magnit zanjirida bu holat bajarilmaydi va hokazo.

Shuning uchun turli (elektr, magnit, mexanik, issiqlik, gidravlik va h.k.) tabiatli zanjirlardagi jarayonlarni bir xil ko'rinishdagi tenglamalar bilan ifodalash maqsadida *professor Zaripov M.F.* tomonidan quyidagi analogiya mezonlari taklif etilgan:

1. *Energetik mezon*: Har qanday tabiatli zanjirda kuchlanish va tok ko'paytmasi quvvat birligida o'lchanishi lozim, ya'ni: $UI = P$ [Vt].

2. *Statik mezon*: Har qanday tabiatli zanjirda tokning qarshilikka ko'paytmasi kuchlanishga teng, ya'ni: $IR = U$.

3. *Dinamik mezon*: Har qanday tabiatli zanjirda tok zaryadning vaqt bo'yicha hosilasiga teng, ya'ni: $I = \frac{dQ}{dt}$.

№	Kattalik va munosabatlar	Zanjirning tabiati	
		Elektr	Magnit
1.	Kuchlanish	$U_e = \varphi_1 - \varphi_2$ yoki E - EYK [V]	$U_\mu = Hl$ yoki F - MYK [A]
2.	Tok	$I_e = \frac{dQ_e}{dt}$ [A]	$I_\mu = \frac{d\Phi}{dt}$ [Vb]
3.	Zaryad	Q_e [C]	$Q_\mu = \Phi$ [Vb]
4.	Qarshilik	$R_e = \rho_e \frac{l_e}{S_e}$	$R_\mu = G_e = \frac{S_e}{\rho_e l_e}$ - uyurmaviy toklar yo'lidagi elektr o'tkazuvchanlik, [1/Ω]
5.	Induktivlik	$L_e = w^2 \mu \mu_0 \frac{S_\mu}{l_\mu}$	$L_\mu = \frac{\mathcal{E}_0 S_e}{l_e}$ - uyurmaviy toklar yo'lidagi elektr sig'im, [F]
6.	Sig'im	$C_e = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S_e}{l_e}$	$C_\mu = \mu \mu_0 \frac{S_\mu}{l_\mu}$ - uyurmaviy toklar yo'lidagi elektr sig'im, [H]

Ushbu o'xshashliklarga asoslanib, istalgan tabiatli zanjirni bir xil ko'rinishdagi tenglamalar yordamida ifodalash va hisoblash mumkin bo'ladi.

11.3.4. Shoxobchalangan magnit zanjirlarini hisoblash

Shoxobchalangan magnit zanjirida bir nechta magnit oqimlari zanjirning ayrim qismlarida o'zaro qo'shilishi yoki ayrilishi mumkin. Bunday zanjirlarni hisoblashda, xuddi elektr zanjirlariga o'xshab, ular kontur, tugun va shoxobchalarga ajratiladi va ularga nisbatan Om va Kirxgof qonunlari qo'llaniladi.

Shoxobchalangan magnit zanjirlarini hisoblash tartibini 11.20- rasmda keltirilgan zanjir misolida ko'rib chiqamiz.

Masala. Berilgan magnit zanjiri shoxobchalaridagi magnit oqimlarining qiymatlari aniqlansin. Quyidagilar berilgan:

$$I_1 = 2 \text{ A}, w_1 = 500 \text{ o'ram}, l_1 = 30 \text{ sm}, S_1 = 4 \text{ mm}^2,$$

$$I_2 = 5 \text{ A}, w_2 = 150 \text{ o'ram}, l_2 = 20 \text{ sm}, S_2 = 6 \text{ mm}^2,$$

$$l_3 = 30 \text{ sm}, S_3 = 4 \text{ mm}^2, l_h = 1 \text{ mm}.$$

Ferromagnit o'zakning magnit xossasi quyidagi jadval ko'rinishda berilgan magnitlanish egri chizig'i bilan ifodalanadi:

V, Tl	0	0,22	0,75	0,93	1,02	1,14	1,28	1,47	1,53	1,57
N, A/m	0	20	40	60	80	120	200	400	600	800

1. Berilgan zanjirni quyidagi ekvivalent sxema ko'rinishda tasvirlaymiz (11.21- rasm).

2. $U_{\mu ab}$ kuchlanishni o'zak qismlaridagi MYK va magnit qarshiligi orqali aniqlaymiz:

$$U_{\mu ab} = F_1 - H_1 l_1 - H_h l_h - \text{o'zakning chap qismi uchun},$$

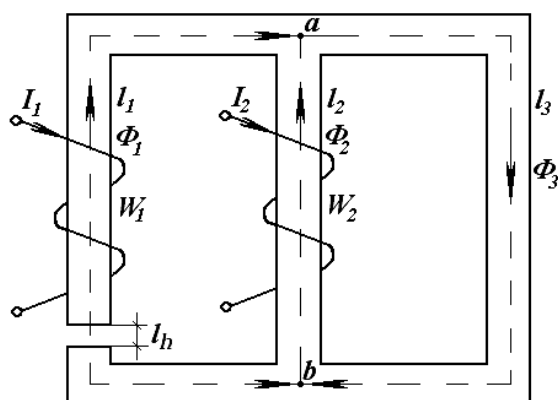
$$U_{\mu ab} = F_2 - H_2 l_2 - \text{o'zakning o'rtadagi qismi uchun},$$

$$U_{\mu ab} = H_3 l_3 - \text{o'zakning o'ng qismi uchun}.$$

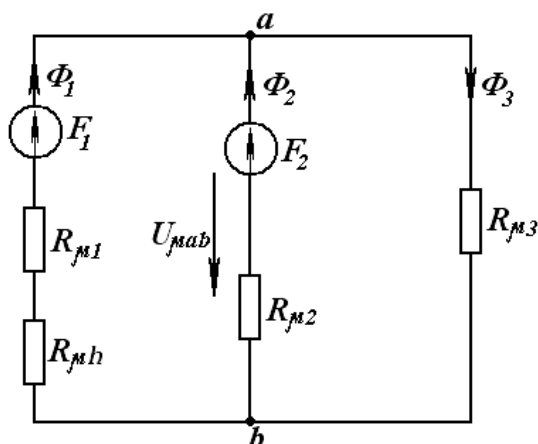
3. Har bir o'zak qismi uchun magnit induksiyasiga ixtiyoriy qiymatlar berib $\Phi = BS$ formula yordamida o'zak qismlaridagi magnit oqimlarini hisoblaymiz.

4. Magnitlanish egri chizig'idan zanjirning ferromagnit qismidagi kuchlanganliklarni aniqlaymiz. Havo oralig'idagi kuchlanganlikni $H_h = 8 \cdot 10^3 B$ formula yordamida hisoblaymiz.

5. O‘zakning har bir qismi uchun magnet kuchlanishlarni 2- bandda keltirilgan formulalardan foydalanib topamiz.



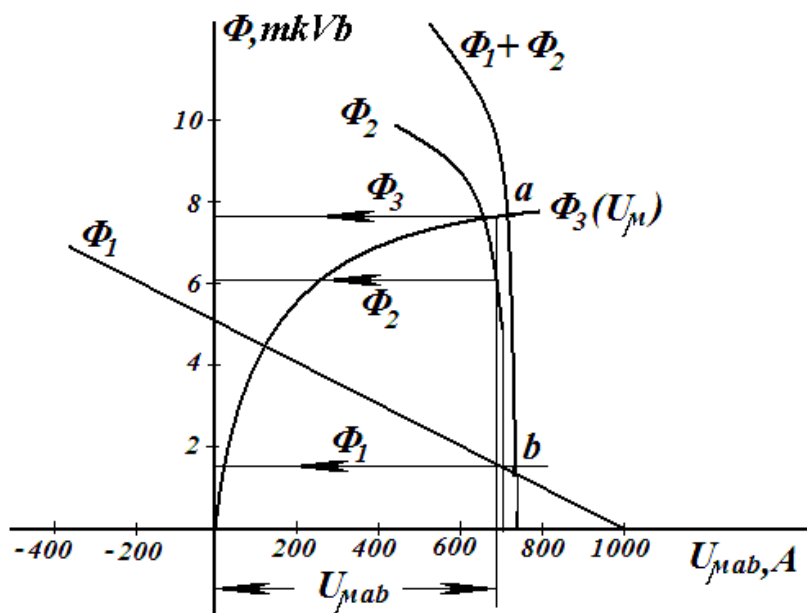
11.20- rasm



11.21- rasm

Hisoblash natijalarini jadval ko‘rinishida yozamiz.

6. Bitta koordinatalar sistemasiga $\Phi_1 = f(U_{\mu ab})$, $\Phi_2 = f(U_{\mu ab})$, $\Phi_3 = f(U_{\mu ab})$ egri chiziqlar grafiklarini quramiz va Φ_1 va Φ_2 grafiklar ordinatalarini o‘zaro qo‘shish natijasida $\Phi_1 + \Phi_2 = f(U_{\mu ab})$ ni hosil qilamiz (11.22- rasm).



11.22- rasm

7. Magnit zanjiri uchun Kirxgof 1- qonuni ($\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_3$) bajariladigan a nuqtani topamiz va undan absissa o‘qiga ab perpendikular tushiramiz. Bu perpendikularning absissa o‘qi bilan kesishgan nuqtasi berilgan zanjir uchun $U_{\mu ab}$ kuchlanishning haqiqiy qiymatiga teng bo‘ladi.

To'g'ri chiziqning magnit oqimlari grafiklari bilan kesishgan nuqtalari esa shoxobchalardagi magnit oqimlarining quyidagi haqiqiy qiymatlarini beradi:

$$\Phi_1 = 1,3 \text{ mkVb}, \Phi_2 = 6 \text{ mkVb}, \Phi_3 = 7,3 \text{ mkVb}.$$

Havo oralig'iga ega bo'lmagan oddiy (shohobchalanmagan) magnit zanjiri analitik usulda hisoblanadi.

Nazorat savollari

1. Nochiziq elementga ta'rif bering. 2. Statik va differensial qarshiliklar nima? 3. Nochiziq elementlar xususiyatlarini aytib bering va chiziqli element xossalari bilan taqqoslang. 4. Nochiziq zanjirlarni ekvivalent generator usuli yordamida hisoblash tartibini aytib bering. 5. Nochiziq zanjirlar analitik usul yordamida qanday hisoblanadi? 6. Iteratsiya usulining mohiyatini aytib bering. 7. Linearizatsiya usuli qanday tartibda tadbiq etiladi? 8. Nochiziq zanjirlar grafik usul yordamida qanday hisoblanadi? 9. Nochiziq o'zgarmas tok elektr zanjirlarini hisoblash usullarini qiyosiy taqqoslang. 10. Nochiziq zanjirlarni chiziqli zanjirlarni hisoblashdagiga nisbatan murakkabligi nimada? 11. Magnit maydonini tavsiflovchi asosiy kattaliklarni, ularni fizik ma'nosi va o'lchov birliklarini aytib bering. 12. Noferromagnit va ferromagnit materiallar xususiyatlarini ayting. 13. Gisterezis sirtmog'i nima? 14. Magnit zanjirlarining qonunlarini izohlab bering. 15. Magnit zanjirlari qanday tartibda hisoblanadi? 16. Birinchi va ikkinchi tur masalalarni yechilish tartibini aytib bering. 17. Elektr va magnit zanjirlaridagi o'xshashlik(analogiya)ni izohlang.

12- BOB. O'ZGARUVCHAN TOK NOCHIZIQ ELEKTR ZANJIRLARI

12.1. Umumiy ma'lumotlar

Avvalgi paragraflarda aytib o'tilganidek, nochiziq qarshilik chiziqli qarshilikdan quyidagi umumiy xossalari bilan tubdan farq qiladi:

1) *VAX ning bir bo'lagidan boshqa bo'lagiga o'tganda statik va dinamik qarshiliklar qiymatlari o'zgarishsiz saqlanmaydi;*

2) *statik va dinamik qarshiliklar umumiy holda bir-biriga teng emas (ular VAX ning ayrim nuqtalari va bo'laklarida bir xil bo'lishi mumkin);*

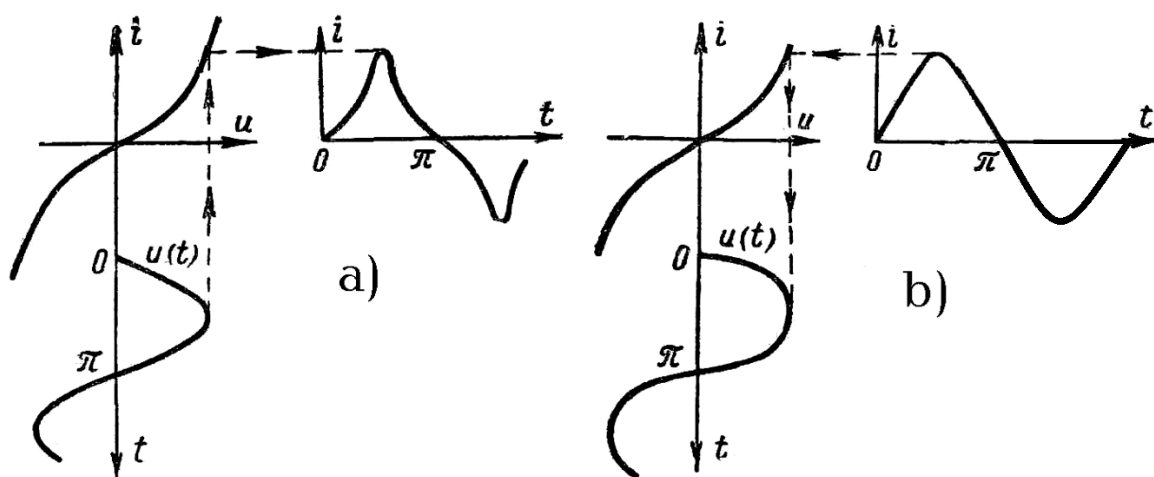
3) *nozichiq element nosimmetrik xarakteristikaga ega bo'lishi mumkin: qarshilikning qiymati elementga berilgan kuchlanish ishorasiga bog'liq bo'ladi, boshqacha qilib aytganda, nochiziq element ventilyususiyyatiga ega bo'ladi.*

Nochiziq elementlarning o'zgarmas va o'zgaruvchan toklarda olingan xarakteristikalari ko'pchilik hollarda bir-biridan tubdan farq qiladi. Ammo ayrim guruh nochiziq elementlarda VAX, kulon-volt va veber-amper xarakteristikalari o'zgarmas va o'zgaruvchan toklarda bir xil bo'ladi. Bunday nochiziq elementlar *noinersion nochiziq elementlar* deb ataladi. Shu nuqtai nazardan o'zgaruvchan tok zanjiridagi nochiziq elementlar aktiv, induktiv va sig'im elementlariga bo'linadi. Bu elementlarning har biri *boshqarilmaydigan* va *boshqariladigan* turlarga bo'linadi.

Nochiziq va nosimmetrik VAXli element yordamida o'zgaruvchan tokni to'g'rilash, ya'ni o'zgarmas tokka o'zgartirish, signalni modulyatsiyalash yoki demodulyatsiyalash mumkin. Simmetrik xarakteristikaga ega bo'lgan nochiziq reaktiv elementlar yordamida chastotani ko'paytirish, kuchlanishni mutadillash va boshqa amallarni bajarish mumkin.

Agar noinersion nochiziq elementga sinusoidal kuchlanish berilsa, u holda xarakteristikaning nochiziqligi tufayli elementdan o'tadigan tok nosinusoidal bo'ladi (12.1- rasm, a). O'z navbatida nochiziq element orqali sinusoidal tok o'tkazilsa, undagi kuchlanish pasayishi nosinusoidal bo'ladi (12.1- rasm, b). Shunday qilib, aytish mumkinki, nochiziq element nosinusoidal kuchlanish va tok manbai bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Ayrim nochiziq qarshiliklarda xarakteristikaning nochiziqligi elementni tokdan qizishi natijasida undagi harorat o'zgarishi tufayli yuz beradi. Harorat o'zgarishi inersion jarayon bo'lganligi sababli nisbatan kichik ($f=50$ Gs) chastotalarda ham nochiziq element harorati va qarshiligi o'zgaruvchan tok davri mobaynida o'zgarmay qoladi.



12.1- rasm

Shuning uchun ham kuchlanish va tok oniy qiymatlari orasidagi bog‘lanish chiziqli bo‘lib, ularning ta’sir etuvchi qiymatlari orasidagi bog‘lanish esa nochiziqli bo‘ladi. Bunday nochiziqli elementlar *inersion elementlar* deyilib, ularga cho‘g‘lanish lampasi, baretterlar, yarim o‘tkazgichli termoqarshiliklar va boshqalar kiradi.

12.2. Nochiziqli xarakteristikalarini approksimatsiyalash

Nochiziqli element VAX sini analitik funksiya bilan ifodalash approksimatsiyalash deb ataladi. Xarakteristikani aniq approksimatsiyalash uni ifodalovchi analitik funksiyaning murakkablashtiradi. Shuning uchun amalda soddaroq analitik funksiyalardan foydalaniladi. Bularga darajali polinom, ko‘rsatkichli funksiya, bo‘laklab-chiziqli approksimatsiyalash va boshqalar kiradi.

1. Darajali polinom yordamida approksimatsiyalash. Bunda $i = f(u)$ bog‘lanish uzluksiz va $f'(u_0)$, $f''(u_0)$ va hokazo hosilalari mavjud bo‘lganda u Teylor yoki Makloren qatoriga yoyiladi. Qator hadlari qancha ko‘p bo‘lsa, u berilgan xarakteristikani shuncha aniq ifodalaydi. Ko‘pincha, hisoblashlarda 3- darajali had bilan chegaralaniladi. Masalan, agar xarakteristikasi 3- darajali polinom bilan approksimatsiyalangan nochiziqli elementga $u = U_m \sin \omega t$ kuchlanish berilgan bo‘lsa, u holda elementdan o‘tayotgan tok quyidagicha aniqlanadi:

$$i = a_0 + a_1 U_m \sin \omega t + a_2 U_m^2 \sin^2 \omega t + a_3 U_m^3 \sin^3 \omega t.$$

Bu ifodadagi $\sin^2 \omega t$ va $\sin^3 \omega t$ o‘rniga tegishli trigonometrik ayniyatlarni qo‘yib

$$i = \left(a_0 + \frac{a_2 U_m}{2} \right) + \left(a_1 U_m + \frac{3}{4} a_3 U_m^3 \right) \sin \omega t - \frac{1}{2} a_2 U_m^2 \cos 2\omega t - \frac{1}{4} a_3 U_m^3 \sin 3\omega t.$$

2. *Ko'rsatkichli funksiya yordamida approksimatsiyalash.* Ayrim hollarda, nohiziqliq element xarakteristikasini ko'rsatkichli funksiya bilan approksimatsiyalash qulay bo'ladi. Masalan, yarim o'tkazgichli diod VAX si quyidagi analitik funksiya bilan ifodalash mumkin:

$$i = a(e^{bu} - 1),$$

bu yerda a va b - o'zgarmas sonlar.

Matematika kursidan ma'lumki, ko'rsatkichli funksiya qatorga quyidagicha yoyiladi:

$$e^{bu} = 1 + \frac{bu}{1!} + \frac{(bu)^2}{2!} + \frac{(bu)^3}{3!} + \dots$$

Nohiziqliq elementdagi tok:

$$i = a(e^{bu} - 1) = a \left(\frac{bu}{1!} + \frac{(bu)^2}{2!} + \frac{(bu)^3}{3!} + \dots \right).$$

Agar $u = U_m \sin \omega t$ bo'lsa, u holda:

$$i = a \left(b U_m \sin \omega t + \frac{b^2 U_m^2}{2!} \sin^2 \omega t + \frac{b^3 U_m^3}{3!} \sin^3 \omega t + \dots \right).$$

Trigonometrik ayniyatlardan foydalanib va 3- darajali had bilan chegaralanib, tok uchun quyidagi ifodani hosil qilamiz:

$$i = A_0 + A_1 \sin \omega t + A_2 \cos 2\omega t + A_3 \sin 3\omega t.$$

3. *Bo'laklab-chiziqli approksimatsiyalash.* Bu usul berilgan nohiziqliq xarakteristikani bir yoki bir nechta siniqliq chiziqliklar bilan almashtirishga asoslangan. Bunday almashtirish zanjirni chiziqli tenglamalar yordamida ifodalash va hisoblash imkonini beradi. Xarakteristikaning har bir chiziqli bo'lagi uchun chiziqli tenglama tuziladi. Bunda har bir bo'lak oxiridagi kattalik keyingi bo'lakning boshlanish kattaligi bo'lib xizmat qiladi.

Bo'laklab-chiziqli approksimatsiyalash nohiziqliq zanjirlardagi turg'un va o'tkinchi jarayonlarni hisoblashda foydalaniladi.

12.3. Ekvivalent chiziqlashtirish usuli

Agar tadqiq qilinayotgan nohiziqliq zanjirda nohiziqliq elementlar xarakteristikalarining nohiziqliqlik darajasi nisbatan kichik, ya'ni yuqori

garmonikalar ulushi kam bo'lsa, u holda bunday zanjir nohiziq elementlarini chiziqlashtirish mumkin.

Zanjirdagi nohiziq element garmonik yoki energetik balans prinsipi asosida ekvivalent chiziqli element bilan almashtirilishi mumkin. Bunda ikkala elementdan ham bir xil $i = I_m \sin \omega t$ sinusoidal tok o'tadi, deb hisoblanadi.

Ekvivalent chiziqli elementni garmonik balans prinsipi asosida tanlashda nohiziq elementdagi kuchlanish asosiy(birinchi) garmonikasining amplitudasi chiziqli elementdagi kuchlanish amplitudasiga teng qilib olinadi.

Energetik balans prinsipiga ko'ra esa ekvivalent chiziqli qarshilik yoki energiya to'plovchi elementni tanlashda chiziqli va nohiziq elementlardagi aktiv yoki mos reaktiv quvvatlar teng qilib olinadi.

Shu narsaga etibor berish joizki, ikkala prinsip ham bir xil natija beradi.

1. *Ekvivalent chiziqli qarshilik.* Garmonik balans prinsipiga ko'ra:

$$\frac{2}{T} \int_0^T u_R \sin \omega t dt = RI_m,$$

bu yerda $\frac{2}{T} \int_0^T u_R \sin \omega t dt$ - nohiziq elementdagi kuchlanish asosiy garmonikasining amplituda qiymati; RI_m - ekvivalent chiziqli qarshilikdagi sinusoidal kuchlanish amplitudasi; $u_R = f(i)$ - sinusoidal tokning funksiyasi.

Energetik balans prinsipiga ko'ra:

$$\frac{I_m}{T} \int_0^T u_R \sin \omega t dt = \frac{RI_m^2}{2},$$

bunda $\frac{I_m}{T} \int_0^T u_R \sin \omega t dt$ nohiziq qarshilikdagi aktiv quvvat; $\frac{RI_m^2}{2}$ - ekvivalent chiziqli qarshilikdagi aktiv quvvat.

Zanjirdagi nohiziq qarshilik xarakteristikasi $u_R(i) = a_1 i + a_2 i^3$ ikki hadli toq polinom ko'rinishida berilgan bo'lsin ($a_1 \gg a_2$). Nohiziq qarshilikdagi tok $i = I_m \sin \omega t$ bo'lganda

$$\begin{aligned} u_R(i) &= a_1 I_m \sin \omega t + a_2 I_m^3 \sin^3 \omega t = \\ &= \left(a_1 I_m + \frac{3a_2}{4} I_m^3 \right) \sin \omega t - \frac{a_2}{4} I_m^3 \sin 3\omega t. \end{aligned}$$

Yuqoridagi tenglikdagi asosiy garmonika amplitudasini RI_m ga tenglab, ekvivalent chiziqli qarshilik qiymatini topamiz, yani:

$$R = a_1 + \frac{3a_2}{4} I_m^2.$$

Bu natijani energetik balans prinsipi asosida ham hosil qilishimiz mumkin.

2. *Ekvivalent chiziqli induktivlik.* Garmonik balans prinsipiga ko'ra, nochiziqli induktivlikdagi kuchlanish asosiy garmonikasi kosinus tashkil etuvchisining (bunda tok sinusoidal qonuniyat bilan o'zgaradi, deb qabul qilinadi) amplitudasi chiziqli induktivlikdagi kuchlanish amplitudasiga teng bo'lishi lozim, yani:

$$\frac{2}{T} \int_0^T u_L \cos \omega t dt = \omega L I_m.$$

Energetik balans prinsipiga ko'ra esa nochiziqli va ekvivalent chiziqli induktivliklarga bir xil reaktiv quvvat berilishi lozim, yani:

$$\frac{I_m}{T} \int_0^T u_L \cos \omega t dt = \frac{\omega L I_m^2}{2}. \quad \omega = 2\pi f$$

Yuqoridagi ikkala tenglamadan ham bir xil natija hosil bo'ladi. Unga ko'ra ekvivalent induktivlik:

$$L = \frac{1}{\pi I_m} \int_0^T u_L \cos \omega t dt. \quad L = \frac{2}{I_m 2\pi f} \int_0^T u_L \cos \omega t dt.$$

Aytaylik, zanjirdagi nochiziqli induktiv element xarakteristikasi $\Psi(i) = b_1 i - b_2 i^3$ analitik ifoda bilan aniqlansin, bu yerda $b_1 \gg b_2$.

Tok $i = I_m \sin \omega t$ bo'lganda

$$\Psi(i) = \left(b_1 I_m - \frac{3b_2 I_m^3}{4} \right) \sin \omega t + \frac{b_2 I_m^3}{4} \sin 3\omega t$$

va nochiziqli induktiv elementdagi kuchlanish quyidagicha bo'ladi:

$$u_L = \frac{d\Psi(i)}{dt} = \omega \left(b_1 I_m - \frac{3b_2 I_m^3}{4} \right) \cos \omega t + \frac{3\omega b_2 I_m^3}{4} \cos 3\omega t.$$

Asosiy garmonika amplitudasini $\omega L I_m$ ga tenglashtirib, ekvivalent chiziqli induktivlikni I_m funksiyasi ko'rinishida aniqlaymiz:

$$L = b_1 - \frac{3b_2}{4} I_m^2.$$

Bu natijani energetik balans prinsipiga ko'ra ham hosil qilishimiz mumkin.

3. *Ekvivalent chiziqli sig‘im.* Garmonik balans prinsipiga ko‘ra chiziqli sig‘im quyidagi shart asosida aniqlanadi:

$$\frac{2}{T} \int_0^T u_C \cos \omega t dt \frac{I_m}{2} = \frac{1}{\omega C} \frac{I_m^2}{2}.$$

Bu tengliklardan:

$$C = \frac{TI_m}{2\omega \int_0^T u_C \cos \omega t dt}.$$

Nochiziqli sig‘im elementi $u_C = c_1 q + c_2 q^3$ ($c_1 \gg c_2$) xarakteristikaga ega bo‘lsin. Agar bu elementdan o‘tayotgan tok $i = I_m \sin \omega t$ bo‘lsa, u holda

$$q = \int i dt = -\frac{I_m}{\omega} \cos \omega t$$

$$u_C = -\left(\frac{C_1}{\omega} I_m + \frac{3C_2}{4\omega^3} I_m^3\right) \cos \omega t = \frac{C_2 I_m^3}{4\omega^3} \cos 3\omega t.$$

Asosiy garmonika amplitudasini $\frac{I_m}{\omega C}$ ga tenglab, ekvivalent chiziqli sig‘imni topamiz:

$$C = \frac{1}{C_1 + \frac{3C_2}{4\omega^2} I_m^2}.$$

Shuni takidlab o‘tish lozimki, ekvivalent chiziqli qarshilik, induktivlik va sig‘im qiymatlari mos nochiziqli element differensial qarshilik, induktivlik va sig‘im minimal va maksimal qiymatlari oralig‘ida o‘zgaradi.

Masalan, nochiziqli qarshilikda $i=0$ da $R_\phi(0) = \frac{du_R}{di}(0) = a_1$ va $i = I_m$ da

$R_\phi(I_m) = \frac{du_R}{di}(I_m) = a_1 + 3a_2 I_m^2$ larga teng bo‘lsa, ekvivalent chiziqli qarshilik $R_\phi(0) < R < R_\phi(I_m)$ oralig‘idagi qiymatga teng bo‘ladi.

Shoxobchalangan nochiziqli zanjirlarni ekvivalent linearizatsiya usuli yordamida hisoblash kompleks shaklda yozilgan tenglamalar sistemasini yechishni talab qiladi.

Bunday hollarda asosiy garmonikalar usuli yordamida hisoblash ancha qulay bo‘lib, hisoblash tartibi quyidagicha: nochiziqli elementdan o‘tayotgan tok asosiy garmonikasining amplitudasi I_{1m} ga ixtiyoriy qiymat berilib, nochiziqli element xarakteristikasi (grafigi) dan I_{1m} tokka mos keluvchi U_{1m} kuchlanish amplituda qiymati topiladi va asosiy garmonika

uchun zanjirning vektor diagrammasi quriladi. Vektor diagrammadan zanjir kirishidagi kuchlanish asosiy garmonikasining amplitudasi topiladi. Yuqorida qayt etilgan amallar I_{1m} ning yana bir nechta ixtiyoriy qiymatlari uchun bajariladi va $U_{1m}(I_{1m})$ xarakteristika quriladi hamda undan U_{1m} ning berilgan qiymatiga mos keluvchi I_{1m} qiymati aniqlanadi.

12.4. O'zgaruvchan tok zanjirlarida nochiziq sig'im

Agar kondensator qoplamalari orasidagi izolyatsion material dielektrik singdiruvchanligi elekt maydoni kuchlanganligiga bog'liq bo'lsa, u holda kondensator sig'imi ham undagi kuchlanishga bog'liq bo'ladi. Ko'pchilik hollarda kondensator zaryadi undagi kuchlanish bilan nochiziq bog'langan bo'ladi.

$\varepsilon = f(E)$ bog'lanish birinchi marta segnetik tuz ($NaKC_4H_4O_6$) da kuzatilganligi bois, bu xossaga ega bo'lgan dielektriklar *segnetoelektriklar* deb nom olgan. $q(u)$ bog'lanishning xarakteri ferromagnit o'zakli induktiv g'altakdagi $\Psi(i)$ bog'lanishga o'xshab ketadi.

Kondensatorga davriy o'zgaruvchan kuchlanish berilganda $q(u)$ bog'lanish gesterezis sirtmog'ini hosil qiladi. Bunda sirtmoq yuzasi dielektrikda bir sikldagi energiya isrofiga proporsional bo'ladi.

$q(u)$ bog'lanish gesterezis sirtmog'i ko'rinishida bo'lganligi sababli kondensatorning elektr almashlash sxemasi faqat uning sig'imi bilan aniqlanmay, balki unga parallel ulangan va dielektrikdagi isroflarni belgilovchi qarshilik bilan ham aniqlanadi.

Bu sxemaga quyidagi differensial tenglama mos keladi:

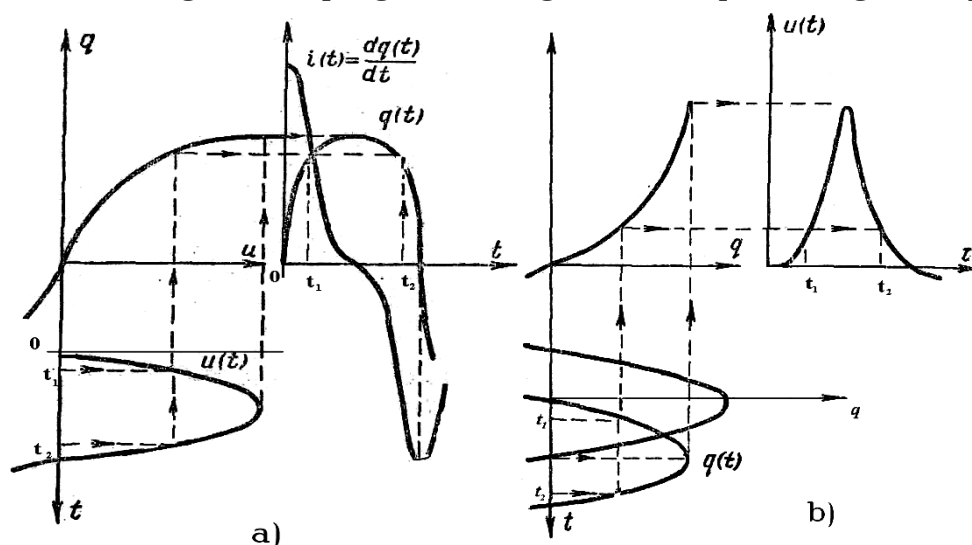
$$i = \frac{dq}{dt} + \frac{1}{R}u.$$

Ferromagnit o'zakli induktiv g'altakda bu bog'lanish $u = \frac{d\Psi}{dt} + Ri$ ko'rinishda bo'ladi.

Yuqorida keltirilgan ikkita tenglamadan ko'rinib turibdiki, nochiziq sig'im va induktiv elementlar o'zaro *dual zanjirlar* sifatida qaralishi mumkin.

Agar nochiziq sig'im elementiga sinusoidal kuchlanish berilsa, u holda undagi tok nosinusoidal bo'lib, tarkibida toq garmonikalar mavjud bo'ladi va ayniqsa uchinchi garmonikaning ta'siri sezilarli bo'ladi (12.2-rasm, a). Tok egri chizig'ini qurish tartibi quyidagicha: avval berilgan

$q(u)$ xarakteristika bo'yicha $q(t)$ egri chiziqli quriladi, keyin esa $i = \frac{dq}{dt}$ bo'yicha $q(t)$ egri chiziqni grafik integrallash orqali $i(t)$ grafik quriladi.



12.2- rasm

Agar nochiziqliq sig'im orqali sinusoidal tok o'tkazilsa, u holda undagi nosinusoidal kuchlanish tarkibida uchinchi garmonikaning tasiri katta bo'ladi. Kuchlanish egri chizig'ini qurish 12.2- rasm, *b* da ko'rsatilgan. Nochiziqliq sig'im elementlari yordamida chastota uchlantirgich sxemalarini hosil qilish mumkin.

12.5. O'zgaruvchan tokni nochiziqliq elementlar yordamida to'g'rilash

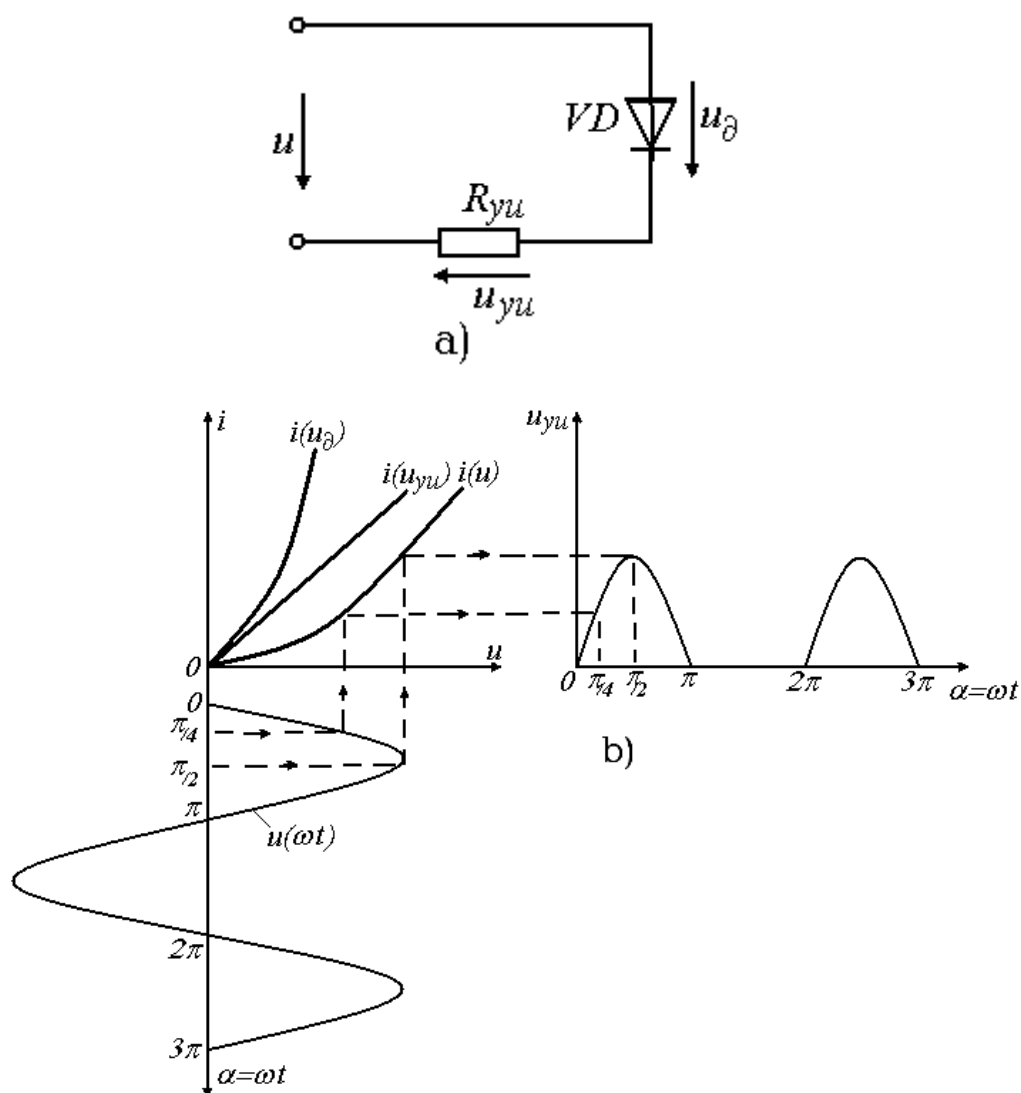
O'zgaruvchan tokni to'g'rilash, ya'ni uni o'zgarmas tokka o'zgartirish nochiziqliq rezistiv element – ventil yordamida amalga oshiriladi. Ventil – tokning to'g'ri yo'nalishida juda kichik qarshilikka va uning teskari yo'nalishida esa juda katta qarshilikka, ya'ni kichik o'tkazuvchanlikka ega.

So'nggi yillarda to'g'rilagich sxemalarida asosan yarim o'tkazgichli diodlardan foydalanilmoqdi.

1. *Yarim davrli to'g'rilagich.* To'g'rilagich sxemasi 12.3- rasm, *a* da keltirilgan bo'lib, u ideal VAX ga ega yarim o'tkazgichli ventil-diod va chiziqli qarshilikli yuklama R_{yu} dan iborat. Sxema $u = U_m \sin \omega t$ sinusoidal kuchlanish manbayiga ulangan.

Agar teskari yo'nalishda diod orqali o'tadigan tok nolga teng bo'lsa, u holda R_{yu} yuklamadan faqat musbat yarim davr mobaynida tok o'tadi.

Yuklamadan o'tadigan to'g'rilangan tok shaklini grafik usulda hosil qilish 12.3- rasm, b da ko'rsatilgan.



12.3- rasm

Diodning to'g'ri yo'nalishdagi qarshiligi VAXning tikligiga bog'liq bo'ladi. Hisoblashlarni osonlashtirish maqsadida diod xarakteristikasi koordinata boshidan va dioddan o'tadigan maksimal tokka mos keluvchi nuqtadan o'tadigan to'g'ri chiziq bilan almashtiriladi, ya'ni VAX ma'lum darajada chiziqlashtiriladi.

Yarim davrli to'g'rilagich yuklamasidagi tok davriy nosinusoidal bo'lib, uning doimiy tashkil etuvchisi quyidagiga teng bo'ladi:

$$I_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t d\omega t = \frac{I_m}{\pi}.$$

Ta'sir etuvchi qiymat esa:

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m^2 \sin^2 \omega t d\omega t} = \frac{I_m}{2}.$$

To'g'rilagich sxemasiga manbadan berilayotgan aktiv quvvat:

$$P = (R_d + R_{yu}) I^2 = \frac{R_d + R_{yu}}{4} I_m^2,$$

bu yerda R_d - diodning to'g'ri yo'nalishdagi tokka qarshiligi.

Zanjirning to'la quvvati

$$S = UI = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{2} = \frac{(R_d + R_{yu})}{\sqrt{2}} I_m \frac{I_m}{2} = \frac{R_d + R_{yu}}{2\sqrt{2}} I_m^2.$$

Zanjir uchun quvvat koeffitsiyenti $\frac{P}{S} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$ ning birdan kichikligiga sabab zanjirda reaktiv quvvat paydo bo'lganligidan emas, balki, tok tarkibida yuqori garmonikalar paydo bo'lishi natijasida buzilish quvvatining yuzaga kelishidir. Zanjirdagi kuchlanish va tok shakllarining bir xil emasligi natijasidagi buzilish quvvati quyidagicha aniqlanadi:

$$T = \sqrt{S^2 - Q^2 - P^2} = \frac{R_d + R_{yu}}{4} I_m^2.$$

To'g'rilagich sxemasi chiqishi(yuklama)dagi foydali quvvat:

$$P_{yu} = R_{yu} I_0^2 = \frac{R_{yu}}{\pi^2} I_m^2.$$

To'g'rilagich sxemasining foydali ish koeffitsiyenti quyidagi koeffitsiyent orqali baholanadi:

$$\eta = \frac{P_{yu}}{P} 100\% = \frac{4R_{yu}}{\pi^2(R_e + R_{yu})} 100\% = \frac{1}{1 + \frac{R_e}{R_{yu}}} 40,6\%.$$

Masala. Qarshiliklari $R = 25 \text{ Om}$ bo'lgan chiziqli rezistor, $R_{yu} = 500 \text{ Om}$ bo'lgan yuklama va ideal diod o'zaro ketma-ket ulangan hamda $e = 950 \sin 314t$ EYK manbadan ta'minlanmoqda. Yuklamadagi kuchlanish o'zgarmas tashkil etuvchisini va aktiv quvvatni toping.

Yechish. Manba EYKning musbat yarim davrida yuklamadagi kuchlanish oniy qiymati:

$$u_{yu} = \frac{R_{yu}}{R + R_{yu}} e = \frac{500}{250 + 500} 950 \sin 314t = 632 \sin \alpha \quad (0 < \alpha < \pi).$$

Kuchlanishning doimiy tashkil etuvchisi:

$$U_{yu(0)} = U_{yu(o'r)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{yu} d\alpha = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} 632 \sin \alpha d\alpha = \frac{632}{\pi} \approx 200 \text{ V}.$$

Yuklamadagi aktiv quvvat:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p d\alpha = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{U_{yu}^2}{R_{yu}} d\alpha = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{632^2}{500} \sin^2 \alpha d\alpha = \\ &= \frac{800}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin^2 \alpha d\alpha = \frac{800}{4\pi} \int_0^{\pi} (1 - \cos 2\alpha) d\alpha = \\ &= \frac{200}{\pi} \int_0^{\pi} d\alpha - \frac{200}{\pi} \int_0^{\pi} \cos 2\alpha d\alpha = 200 - \frac{200}{2\pi} (0 - 0) = 200 \text{ Vt}. \end{aligned}$$

2. *Ikkita yarim (to'liq) davrli to'g'rilagich.* O'zgaruvchan tokni to'g'rilash jarayonida ikkala yarim davr mobaynida ham yuklamadan tok o'tishini ta'minlash hamda to'g'rilangan tok o'rtacha qiymatini oshirish maqsadida ikkita (nol chiqishli sxema) yoki to'rtta (ko'prik sxema) diodli to'g'rilagich sxemalaridan foydalaniladi (12.4- rasm, *a* va *b*).

Ikkita diodli sxemada sinusoidal kuchlanishning birinchi yarim davrida bitta diod ochiq, ikkinchisi – yopiq, ikkinchi yarim davrda esa aksincha. Shuning uchun ham yuklamada manba kuchlanishining ikkala yarim davrida ham yuklamadan bitta yo'nalishda tok o'tadi (12.4- rasm, *v*). Bu tokning o'rtacha va ta'sir etuvchi qiymatlari quyidagilarga teng:

$$I_{o'r} = I_0 = \frac{2}{\pi} I_m = 0,637 I_m, \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m,$$

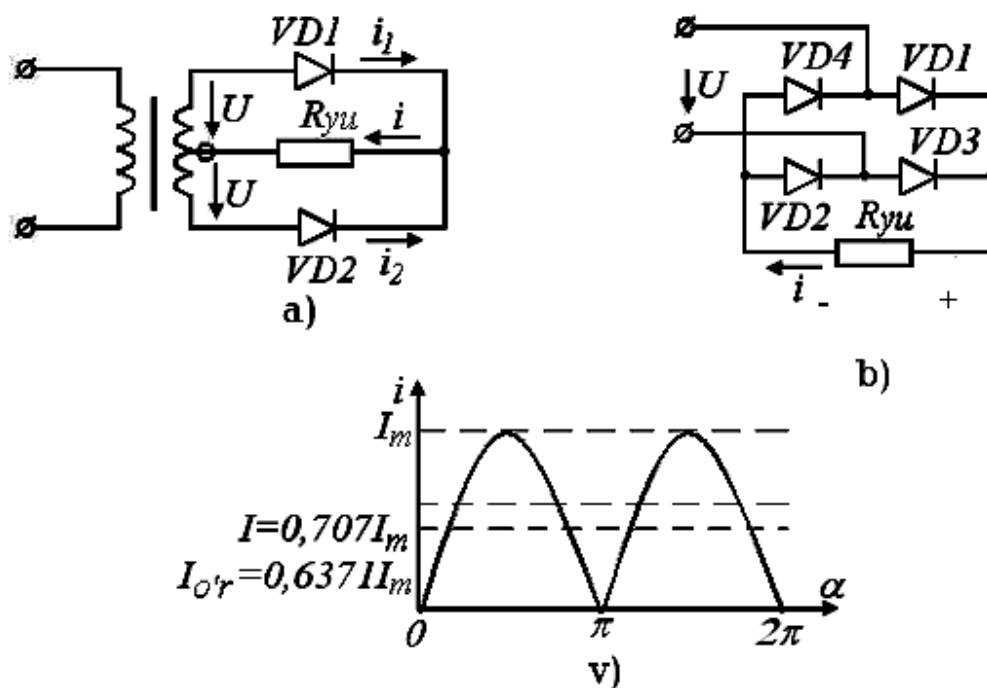
bu yerda $I_m = \frac{U_m}{R_d + R_{yu}}$ bo'lib, to'g'rilangan tok doimiy tashkil etuvchisi bitta yarim davrli to'g'rilagich sxemasidagidan ikki marta katta.

Bu sxema uchun yuklamadagi aktiv quvvat $P_{yu} = R_{yu} I_{o'r}^2 = R_{yu} \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 I_m^2$ ifoda bilan, to'g'rilagichga berilayotgan aktiv quvvat esa quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$P = (R_d + R_{yu}) I^2 = (R_d + R_{yu}) \frac{I_m^2}{2}.$$

To'g'rilagich sxemasining samarasi:

$$\eta = \frac{P_{yu}}{P} 100\% = \frac{8R_{yu}}{\pi^2 (R_d + R_{yu})} 100\% = \frac{1}{1 + \frac{R_d}{R_{yu}}} 81,2\%.$$



12.4- rasm

$\frac{R_d}{R_{yu}} \rightarrow 0$ da $\eta \rightarrow 81,2\%$. η koefitsiyentni yanada oshirish uchun

to'g'rilangan tok egri chizig'ini silliqlovchi filtrlardan foydalaniladi.

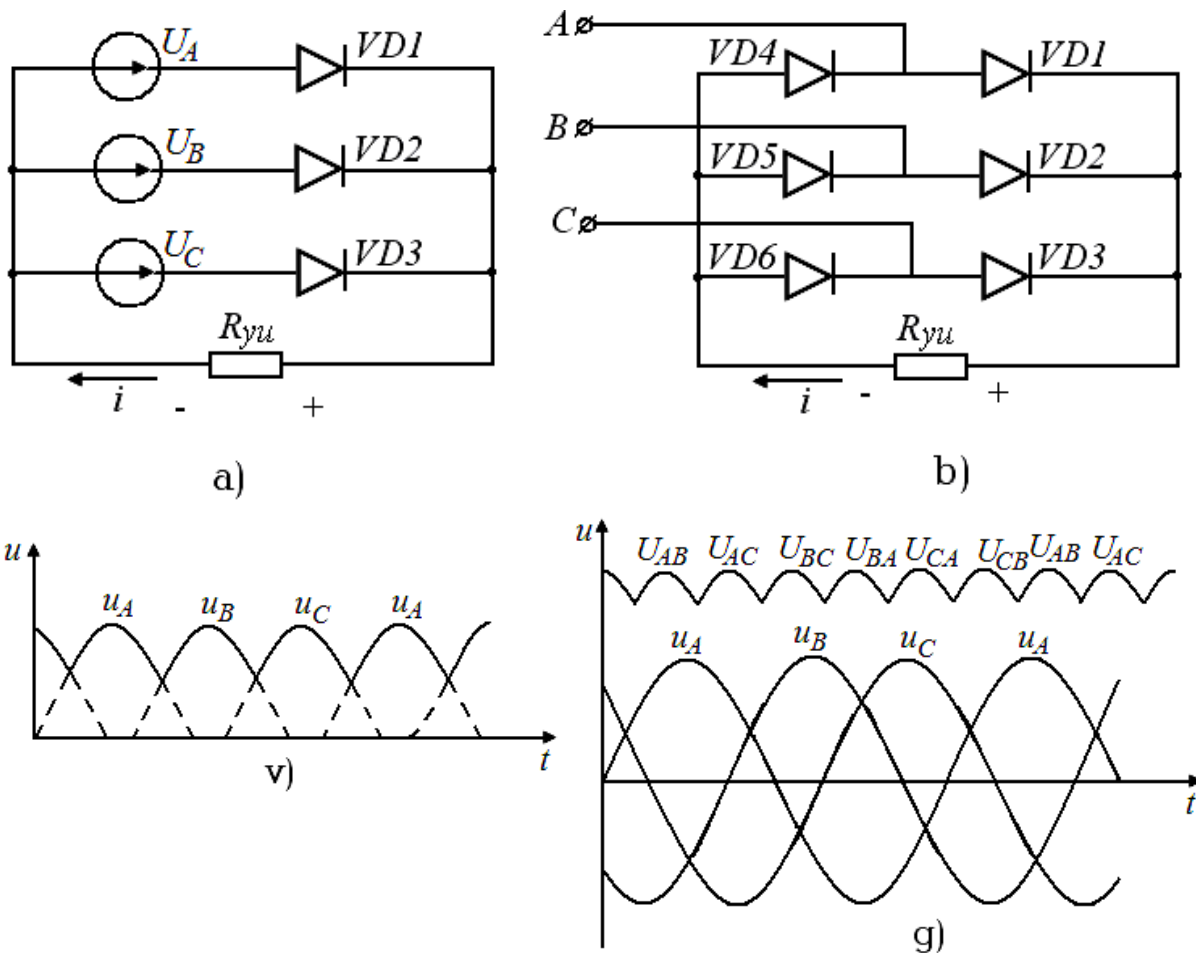
Ko'prik sxemali to'g'rilagichlarda har bir yarim davrda tok ikkita dioddan o'tadi. Shuning uchun to'g'rilangan tok qiymatini aniqlashda R_d ikki martaga oshadi, diodda pasayadigan teskari kuchlanish esa ikki marta kamayadi.

3. *Uch fazali to'g'rilagichlar.* Bir fazali to'g'rilagich sxemalarida to'g'rilangan tok sezilarli darajada pulsatsiyalanib turadi. Ushbu pulsatsiyani kamaytirish uchun uch fazali toklar sistemasidan foydalaniladi.

12.5- rasmda uchta(nol chiqishli) va oltita(ko'prik sxemali) diodli uch fazali to'g'rilagich sxemalari va ularga tegishli diagrammalar keltirilgan.

Nol chiqishli uch fazali to'g'rilagich V.F. Mitkevich, ko'prik sxemali uch fazali to'g'rilagich esa A.N. Larionov tomonidan taklif etilgan.

Bu sxemalar «Elektronika asoslari» kursida batafsil bayon etilganligini inobatga olib, biz ularning sxemalari va vaqt diagrammalarini keltirish bilan cheklanamiz.



12.5- rasm

12.6. Ferromagnit elementli o'zgaruvchan tok elektr zanjirlari

12.6.1. Umumiy ma'lumotlar

Ferromagnit elementli o'zgaruvchan tok zanjirlarida ferromagnit o'zakli chulg'am asosiy rolni o'ynaydi. Bunday chulg'am nochiziq induktiv element bo'lib, ferromagnit o'zakdagi magnit oqimi chulg'amdan o'tayotgan tok bilan nochiziq bog'langan.

Bu paragrafda ko'riladigan nochiziq elektromagnit zanjirlarni avvalgi paragraflarda o'rganilgan o'zgaruvchan tok nochiziq elektr zanjirlaridan farqi shundaki, chulg'amdagi tok va ferromagnit o'zakdagi magnit oqimi bir-biri bilan nochiziq bog'langan. Bu o'zaro bog'liqlik hisoblashlarni ancha murakkablashtiradi.

12.6- rasm, a da ferromagnit o'zakli induktiv g'altak keltirilgan. Bu g'altakda o'ramlar soni w_1 , magnit oqimi yo'lidagi o'zak ko'ndalang kesimining yuzasi S va magnit oqimi yo'lining o'rtacha uzunligi l . Agar

ferromagnit o'zakdagi magnit maydoni tekis taqsimlangan bo'lsa, u holda g'altakdagi ilashish oqimi quyidagicha aniqlanadi:

$$\psi = w\Phi = wSB,$$

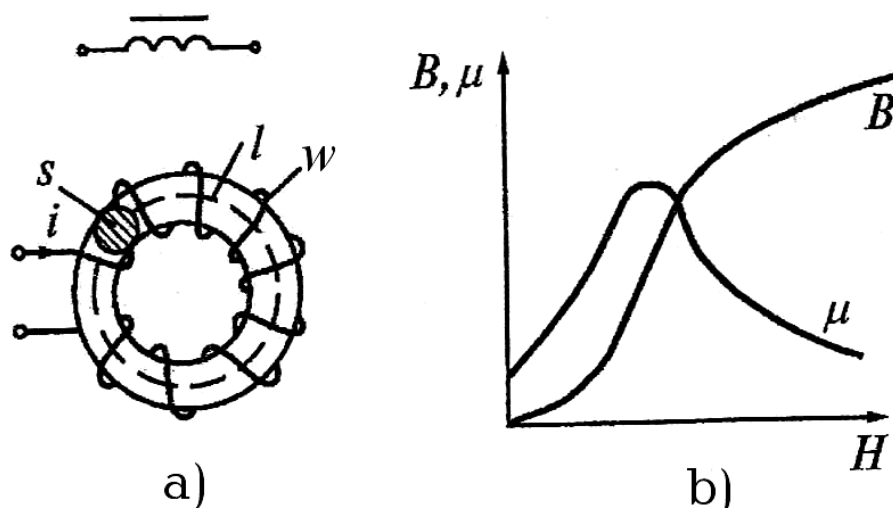
bu yerda Φ va B – mos ravishda o'zakdagi magnit oqimi va induksiyasi (magnit oqimining zichligi).

Magnit induksiyasi va kuchlanganlik bizga ma'lum bo'lgan quyidagi qonuniyat bilan bog'langan:

$$B = \mu_a H = \mu \mu_0 H,$$

bu yerda μ_a - magnit materialning absolut magnit singdiruvchanligi $\frac{H}{m}$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$ - magnit doimiysi; μ - materialning nisbiy magnit singdiruvchanligi.

Ferromagnit material magnit singdiruvchanligi materialda hosil qilingan magnit maydoni kuchlanganligiga bog'liq bo'lib, $B(H)$ va $\mu(H)$ xarakteristikalar nochiqliqligining asosiy manbai hisoblanadi (12.6- rasm, b).



12.6- rasm

O'zgaruvchan magnit maydoni ta'sirida bo'lgan ferromagnit materiallarining asosiy xossalari «Elektrotexnika materiallari» kursida batafsil bayon etilganligini inobatga olib, biz bu yerda ushbu masalaga qisqacha to'xtalib o'tamiz.

Ferromagnit materialda magnit maydonining vaqt bo'yicha o'zgarishi natijasida magnit maydoni energiyasining bir qismi magnit gisterezis va uyurmaviy toklar hosil bo'lishiga sarflanadi. Gisterezis sirtmog'ini hosil bo'lishiga sarflanadigan quvvat magnit maydoni o'zgarishining chastotasi (f) ga, gisterezis sirtmog'i yuzasi (S) ga, po'lat o'zak massasi (m) ga proporsional, ya'ni:

$$P_g = \sigma_g f B_m^{1,6} m, \quad B_m = 0,1 \dots 1,0 \text{ Tl},$$

$$P_g = \sigma_g f B_m^2 m, \quad B_m = 1,0 \dots 1,6 \text{ Tl},$$

bu yerda σ_g - elektrotexnik po'lat nav(sort)iga bog'liq bo'lgan koeffitsiyent.

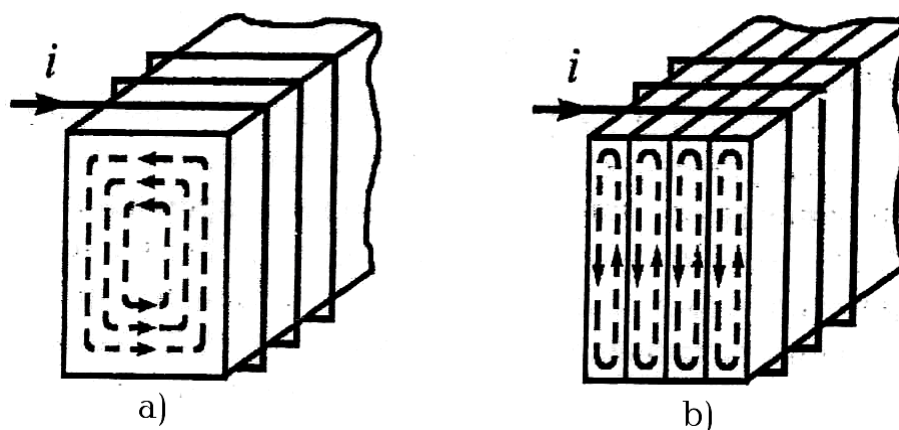
O'zgaruvchan magnit oqimi magnit materialda EYK hosil qiladi. Bu EYK ta'sirida magnit materialida uyurmaviy toklar yuzaga keladi (12.7-rasm, a). Uyurmaviy toklar materialning qizishiga va asosiy magnit oqimini kamayishiga olib keladi.

Uyurmaviy toklar ta'siri natijasida yuzaga keladigan quvvat isrofi *dinamik isroflar* deyiladi va quyidagi emperik formula yordamida hisoblanadi:

$$P_{uyur} = \sigma_{o'z} f^2 B_m^2 m,$$

bu yerda $\sigma_{o'z}$ - elektrotexnik po'lat tunuka materialining naviga va qalinligiga bog'liq bo'lgan koeffitsiyent.

Ferromagnit o'zakli qurilma(induktiv g'altak, transformator va boshqa)lardagi uyurmaviy toklarni kamaytirish maqsadida o'zak o'zaro



12.7- rasm

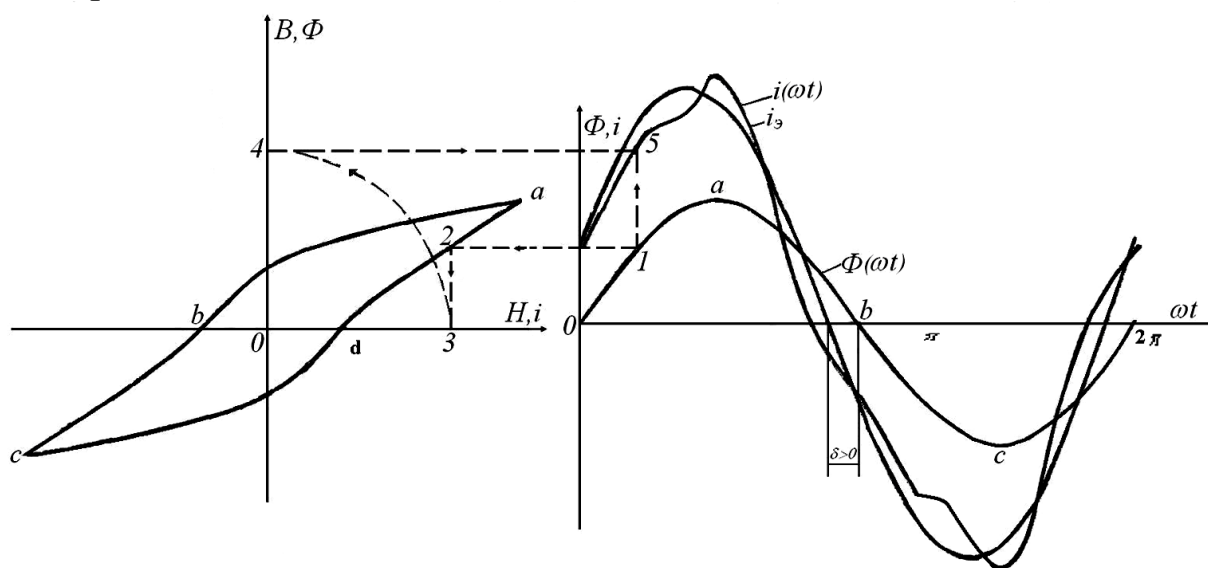
izolatsiyalangan yupqa po'lat tunukalardan yig'iladi (12.7- rasm, b). Bunda uyurmaviy toklar birlashadigan zanjir ko'ndalang kesimining yuzasi keskin kamayishi natijasida uning elektr qarshiligi ortadi.

12.6.2. Gisterezisni tok egri chizig'i shakliga ta'siri

Avvalgi paragraflarda aytib o'tganimizdek, ferromagnit o'zakli o'zgaruvchan tok zanjiri nochiziq zanjir bo'lib, unda o'zakdagi gisterezis natijasida tok egri chizig'ining shakli o'zgaradi. Bu o'zgarishga ishonch hosil qilish uchun ferromagnit o'zakli induktiv g'altakdan o'tayotgan tok

egri chizig'ini grafik usulda quramiz. Zanjir tahlilini soddalashtirish maqsadida g'altak aktiv qarshiligini inobatga olmaymiz.

Agar induktiv g'altakka sinusoidal kuchlanish berilsa, u holda $R_L = 0$ bo'lganda o'zinduksiya EYK va o'zakdagi magnit oqimi sinusoidal qonuniyat bilan o'zgaradi. G'altakdagi tok $i(\omega t)$ egri chizig'ini qurish tartibi 12.8- rasmda ko'rsatilgan. Buning uchun magnit oqimi $\Phi(\omega t)$ egri chizig'idan istalgan nuqta(1)ni tanlaymiz va undan gorizontal (1-2) to'g'ri chiziq o'tkazamiz.



12.8- rasm

Bu to'g'ri chiziqni $\Phi(i)$ gisterezis sirtmog'ining ad qismi bilan kesishgan nuqtasi(2)dan absissa o'qiga vertikal (2-3) chiziq tushiramiz. Markazi koordinata boshida va 3 – nuqtadan o'tuvchi yoy (3- 4) chizamiz va bu yoini ordinata o'qi bilan kesishgan nuqtasi(4)dan gorizontal (4-5) to'g'ri chiziq o'tkazamiz. Bu to'g'ri chiziqni 1 nuqtadan o'tkazilgan vertikal to'g'ri chiziq bilan kesishgan nuqtasi 5 $i(\omega t)$ tok egri chizig'iga tegishli va $\Phi(\omega t)$ magnit oqimi egri chizig'ining nuqtasi 1 ga mos keladigan nuqtasi bo'ladi.

Tok egri chizig'ining ko'tariluvchi qismiga to'g'ri keluvchi nuqtalarning koordinatalari gisterezis sirtmog'ining ko'tariluvchi adc bo'lagidan, pasayuvchi qismiga to'g'ri keluvchi nuqtalarining koordinatalari esa sirtmoqning pasayuvchi abs bo'lagidan aniqlanadi. Ushbu grafik usul yordamida qurilgan $i(\omega t)$ tok egri chizig'i nosinusoidal bo'lib, absissa o'qiga nisbatan simmetrikdir (12.8- rasm). Qurilgan tok egri chizig'ining tahlili shuni ko'rsatadiki, g'altakdagi tok nolga teng bo'lgan paytda ferromagnit o'zakdagi magnit oqimi faza jihatidan orqada qoladi. Agar tok egri chizig'i ekvivalent sinusoida bilan almashtirilsa, u holda magnit oqimi

tokka nisbatan δ burchakka orqada qoladi. Bu burchak gisterezis burchagi yoki magnit kechikish burchagi deb ataladi. Amalda bu burchak $3^0 \dots 5^0$ ni tashkil etadi.

Nosinusoidal tok egri chizig'ini ekvivalent sinusoida bilan almashtirish zanjirni tahlil qilishda kompleks usul va vektor diagrammalarni qo'llash imkonini beradi. Tok ta'sir etuvchi qiymatini topish uchun nosinusoidal tok funksiyasini Furiye qatoriga yoyish zarur.

12.6.3. Ferromagnit o'zakli induktiv g'altak almashlash sxemasi va vektor diagrammasi

Berk ferromagnit o'zakka o'ralgan g'altakdagi elektromagnit jarayonni tahlil qilamiz (12.9- rasm, a). G'altakdan o'tayotgan tok o'zakda magnit oqimini hosil qiladi. Bu oqimning asosiy qismi Φ_0 berk ferromagnit o'zak bo'ylab birlashadi. Oqimning kamroq qismi Φ_s g'altak atrofidagi havo orqali sochilib tutashadi. Odatda, Φ_s sochilgan magnit oqimi Φ_0 magnit oqimini bir necha foizini tashkil etadi. Ammo ferromagnit o'zak to'yinganda yoki havo oralig'iga ega bo'lganda Φ_s oqimning ulushi keskin ortadi.

Agar induktiv g'altak simining aktiv qarshiligi va sochilgan magnit oqimi Φ_s hisobga olinmasa, u holda $\Phi_0 = \Phi_m \sin \omega t$ bo'lganda g'altakdagi o'zinduksiya EYK

$$e_0 = -w \frac{d\Phi_0}{dt} = -w\omega\Phi_m \cos \omega t = -w\omega\Phi_m \sin(\omega t + 90^0)$$

ifoda bilan aniqlanadi va bu EYK manba kuchlanishiga teng, ya'ni:

$$u_0 = -e_0 = w\omega\Phi_m \sin(\omega t + 90^0) = U_m \sin(\omega t + 90^0).$$

Kuchlanish ta'sir etuvchi qiymati:

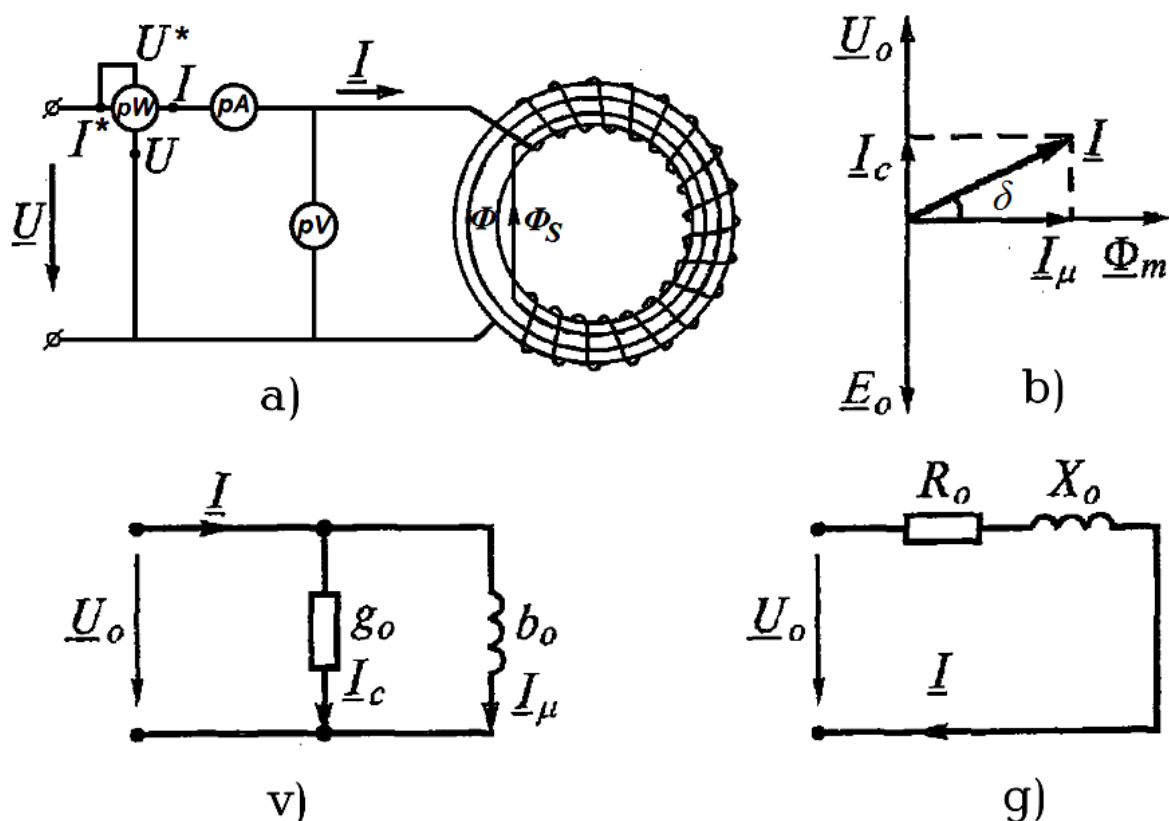
$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{w\omega\Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{w2\pi f\Phi_m}{\sqrt{2}} \approx 4,44 f w \Phi_m.$$

Ideal induktiv g'altak ($R_L = 0$, $\Phi_s = 0$) uchun vektor diagramma quramiz. Magnit oqimining kompleks amplitudasi Φ_m berilgan, deb hisoblaymiz (12.9- rasm, b). Kuchlanish vektori $\underline{U}$ $\underline{\Phi_m}$ magnit oqimi vektoridan 90^0 ga ilgarilaydi, o'zinduksiya EYK vektori $\underline{E}$ kuchlanish vektoriga qiymat jihatdan teng, yo'nalishi jihatdan esa qarama-qarshi bo'ladi. Tok vektori $\underline{I}$ $\underline{\Phi_m}$ vektoridan δ burchakka ilgarilaydi. Tok

vektorini aktiv I_a va reaktiv I_μ toklar vektorlarining yig'indisi ko'rinishida tasvirlaymiz, ya'ni:

$$\underline{I} = I_a + \underline{I}_\mu.$$

Yuqoridagi tenglamaga 12.9- rasm, v dagi almashlash sxemasi mos keladi. Bunda $I_a = \frac{P_{o'z}}{U}$ - po'lat o'zakdagi isroflarni tavsiflaydi. I_μ - tokning po'lat o'zakni magnitlanishini tavsiflovchi tashkil etuvchisi yoki ideal (isrofsiz) g'altakdan o'tadigan tok.



12.9- rasm

12.9- rasm, v dagi sxemani boshqa almashlash sxemasiga o'zgartirish mumkin (11.9- rasm, g). Bu sxemada

$$R_0 = \frac{g_0}{g_0^2 + b_0^2}; \quad X_0 = \frac{b_0}{g_0^2 + b_0^2}.$$

12.9- rasm, v va g larda keltirilgan sxemalardagi R_0 , g_0 - po'lat o'zakdagi quvvat isrofini hisobga oluvchi qarshilik va o'tkazuvchanlikning aktiv tashkil etuvchilari; x_0 , b_0 - asosiy magnit oqimi hisobidan yuzaga keladigan yoki boshqacha qilib aytganda, magnitlanish zanjiri qarshiligi va o'tkazuvchanliklarining reaktiv tashkil etuvchilari.

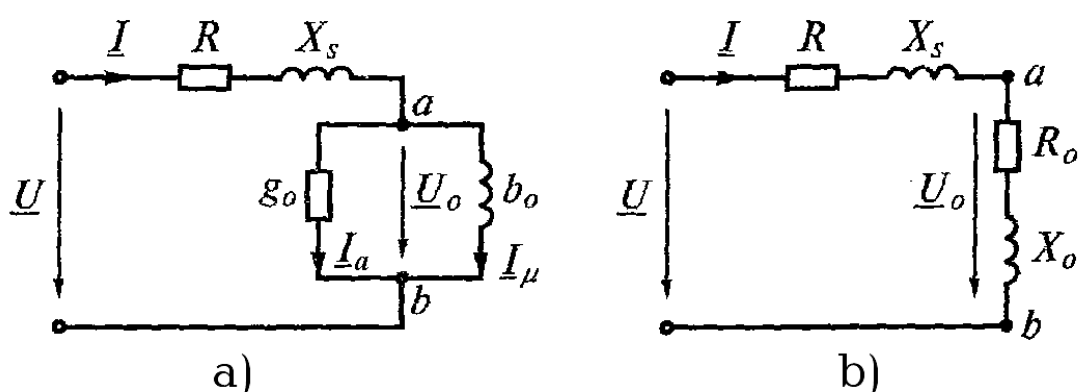
Real sharoitda ferromagnit o'zakli induktiv g'altakning aktiv qarshiligi R_L ni va sochilgan magnit oqimi hisobiga yuzaga keladigan induktiv qarshilik X_s ni hisobga olish lozim bo'ladi (12.10- rasm, a va b). Sxemaning ab qismi magnitlovchi shoxobcha deb ataladi.

Bu shoxobchanning to'la qarshiligi

$$Z_0 = \frac{U_0}{I} = \sqrt{R_0^2 + X_0^2}.$$

12.10- rasm, a dagi zanjir uchun Kirxgof 2- qonuni asosida quyidagi tenglamani tuzamiz:

$$\underline{U} = \underline{U}_0 + \underline{I}R + j\underline{I}X_s.$$



12.10- rasm

Real induktiv g'altak vektor diagrammasini yuqoridagi tenglama asosida quramiz (12.11- rasm).

Magnit gisterezis natijasida yuzaga keladigan burchak quyidagicha aniqlanadi:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_\mu}.$$

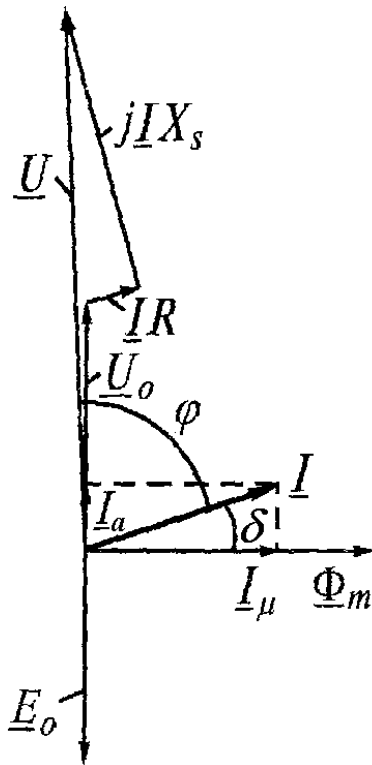
Amalda $\varphi + \delta = 90^\circ$ yoki $\delta = 90^\circ - \varphi$.

$$\text{Quvvat koeffitsiyenti: } \cos \varphi = \frac{P}{UI} = \frac{R_L + R_0}{\sqrt{(R_L + R_0)^2 + (X_s + X_0)^2}}.$$

Ferromagnit o'zakli induktiv g'altakning umumiy aktiv quvvati g'altak simlaridagi quvvat isrofi P_{sim} va o'zakdagi quvvat isrofi $P_{o'z}$ dan tashkil topgan bo'ladi:

$$P = P_{sim} + P_{o'z} = I^2 R_L + I^2 R_0,$$

$$P_{o'z} = UI \sin \delta = E_0 I \cos(90^\circ - \delta).$$



12.11- rasm

δ burchak qancha katta bo'lsa, g'altakdagi tokning aktiv tashkil etuvchisi I_a va o'zakdagi isrof shuncha katta bo'ladi. Shuning uchun ham δ burchak ferromagnit o'zakdagi isrof burchagi deb ataladi.

Masala. 12.9- rasm, a da keltirilgan ferromagnit o'zakli induktiv g'altak uchun quyidagilar berilgan:

$$U = 120 \text{ V}, I = 0,3 \text{ A}, P = 10 \text{ Wt},$$

$f = 400 \text{ Hz}$. Ferromagnit o'zak yupqa po'lat tunukalardan yig'ilgan bo'lib, $d_{ich} = 56 \text{ mm}$, $d_t = 83,5 \text{ mm}$, qalinligi $b = 20 \text{ mm}$, o'zak ko'ndalang kesimini po'lat bilan to'ldirish koeffitsiyenti $k_p = 0,9$. Chulg'amni o'zgarmas tokka

qarshiligi $R = 20 \Omega$. O'zakdagi B_m va H_m qiymatlari hamda solishtirma quvvat isrofi topilsin. B_m va H_m larni hisoblashda chulg'am qarshiligi hisobga olinmasin.

Yechish. Ferromagnit o'zakdagi magnit oqimi:

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44 f w} = \frac{120}{4,44 \cdot 400 \cdot 200} = 3,38 \cdot 10^{-4} \text{ Vb}.$$

Po'lat o'zakning aktiv yuzasi:

$$S_p = \frac{d_t - d_{ich}}{2} b k_p = \frac{83,5 - 56}{2} 20 \cdot 0,9 \cdot 10^{-6} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

O'zakdagi magnit induksiyasining amplituda qiymati:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S_n} = \frac{3,38 \cdot 10^{-4}}{2,4 \cdot 10^{-4}} = 1,41 \text{ Tl}.$$

Magnit maydoni kuchlanganligi chiziqlarining o'rtacha uzunligi:

$$l_{or} = \frac{d_t - d_{ich}}{2} \pi = \frac{83,5 - 56}{2} 3,14 \cdot 10^{-3} = 0,219 \text{ m}.$$

Ferromagnit o'zakdagi magnit maydoni kuchlanganligining amplituda qiymati:

$$H_m = \frac{I w \sqrt{2}}{l_{or}} = \frac{0,3 \cdot 200 \cdot \sqrt{2}}{0,219} = 387 \text{ A/m}.$$

O‘zakdagi solishtirma quvvat isrofini topish uchun avval po‘lat o‘zak massasini topamiz:

$$m_{o'r} = \gamma_p S_p l_{o'r} = 7,8 \cdot 0,24 \cdot 0,219 = 0,41 \text{ kg},$$

bu yerda $\gamma_p = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ - po‘latning zichligi.

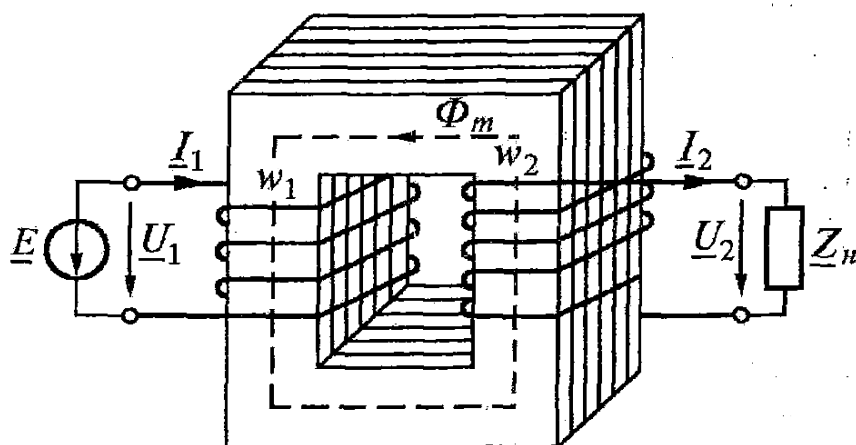
O‘zakdagi solishtirma quvvat isrofi:

$$p_{o'r} = \frac{P - RI^2}{m_{o'r}} = \frac{10 - 20 \cdot (0,3)^2}{0,41} = 20 \text{ Vt / kg}.$$

12.6.4. Ferromagnit o‘zakli transformator

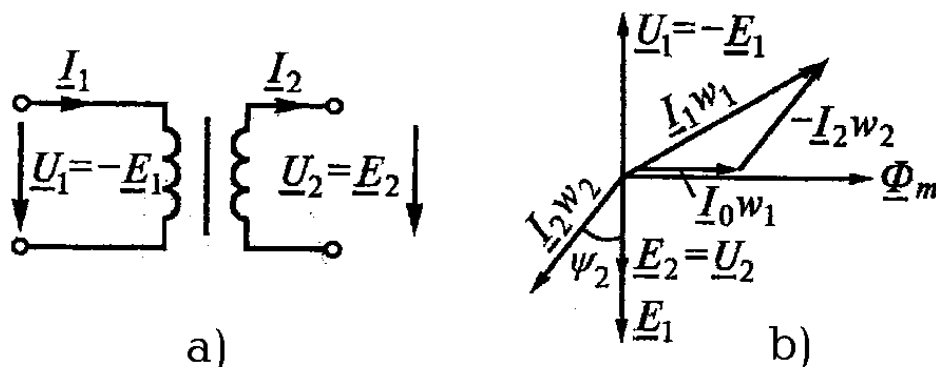
Transformator tarkibiga ferromagnit o‘zakning kiritilishi undagi magnit oqimini keskin ortishiga olib keladi. Bu esa transformator birinchi chulg‘amidan ikkinchi chulg‘amiga uzatiladigan quvvatni oshiradi. Shuning bilan bir qatorda, o‘zakli transformator nochiziqliq element bo‘lib, unda qo‘shimcha isroflar paydo bo‘ladi. Ko‘pchilik hollarda transformator shunday yasaladiki, unda nochiziqlik kam bo‘lib, ferromagnit o‘zak to‘yinishgacha bormaydi. Shuning uchun bunday transformatorlardagi kuchlanish, tok va magnit oqim egri chiziqlari ekvivalent sinusoidalar bilan almashtiriladi.

Transformatorlar vazifasiga ko‘ra kuch, o‘lchash va maxsus transformatorlarga bo‘linadi. Transformatorlar turli-tuman rusumli bo‘lsa-da, ularning ish faoliyatini belgilovchi jarayonlar bir xil. Shuning uchun quyidagi ikkita chulg‘amdan iborat bo‘lgan kuch transformatori ishini ko‘rib chiqamiz (12.12- rasm). Transformatorning tuzilishi, ishlash asoslari va undagi shartli belgilanishlar ushbu kitobning ikkinchi bobida keltirilgan edi.



12.12- rasm

Ideal transformatoridagi asosiy munosabatlar. Ikkinchi bobda ta'kidlanganidek, ideal transformatorlarda chulg'amlarning aktiv qarshiligi, sochilgan magnit oqimi va o'zakdagi quvvat isroflari nolga teng bo'ladi (12.13- rasm, a).



12.13- rasm

Agar ideal transformatorning birlamchi chulg'amiga sinusoidal kuchlanish berilsa, u holda birlamchi chulg'amda $E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m$ o'zinduksiya, ikkilamchi chulg'amida esa, $E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m$ o'zarinduksiya EYKlari induksiyanadi. Chulg'amlar qarshiliklari nolga teng bo'lganligi uchun

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1; \underline{U}_2 = \underline{E}_2.$$

Bu holat uchun transformatsiya koeffitsiyenti:

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Agar $(U_2 > U_1, w_2 > w_1)$ bo'lsa, u holda $n < 1$ bo'lib, transformator kuchlanishni oshiruvchi, aks holda $(U_2 < U_1, w_2 < w_1)$ esa $n > 1$ bo'lib, kuchlanishni pasaytiruvchi bo'ladi.

Magnit zanjiri uchun quyidagi tenglamani yozishimiz mumkin:

$$U_{\mu 0} = I_0 w_1 = U_{\mu 1} + U_{\mu 2} = I_1 w_1 + I_2 w_2, \quad (12.1)$$

bu yerda $U_{\mu 0} = I_0 w_0$ - transformator salt ish rejimi uchun magnitlovchi kuch; $U_{\mu 1} = I_1 w_1$ va $U_{\mu 2} = I_2 w_2$ - mos ravishda birinchi va ikkinchi chulg'amdagi toklar hisobidan hosil bo'lgan magnitlovchi kuchlar.

Ideal transformator vektor diagrammasini $\underline{I}_2$ tok vektori $\underline{E}_2$ EYK vektoridan ψ_2 burchakka orqada bo'lgan holat uchun quramiz (12.13- rasm, b). $\underline{I}_1 w_1$ vektorni hosil qilish uchun $\underline{I}_0 w_1$ vektordan $\underline{I}_0 w_0$ vektorni ayirish lozim bo'ladi. $\underline{I}_1$ va $\underline{I}_2$ vektorlar bir-biriga qarama-qarshi

yoʻnalgan. Fizik nuqtai nazardan qaraganda, ikkilamchi chulgʻam tokining magnit maydoni oʻzaka magnitsizlovchi taʼsir koʻrsatadi va natijada birlamchi zanjirdagi tok ortadi, yaʼni yuklamadagi tok ortishi oʻzinduksiya EYK hisobiga transformator birlamchi chulgʻamidagi tokni ortishiga olib keladi.

Agar salt ish rejimidagi I_0 tokni nolga teng deb hisoblasak, u holda

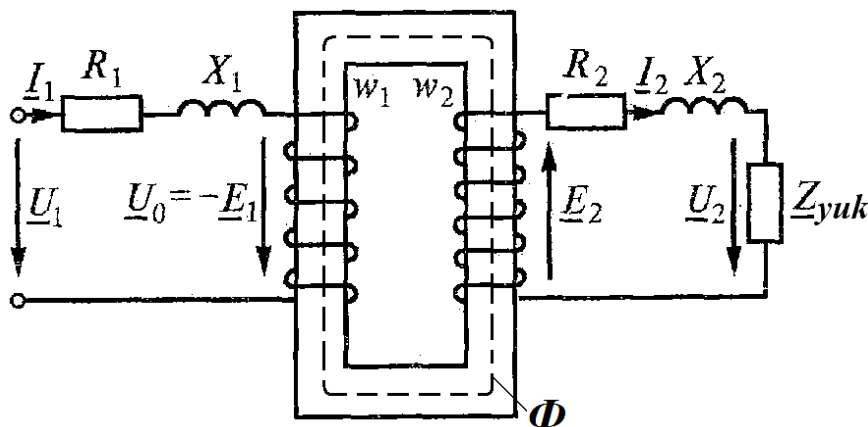
$$\underline{I}_1 w_1 + \underline{I}_2 w_2 = 0.$$

Bundan

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2} = n.$$

Oxirgi tenglikdan koʻrinib turibdiki, ideal transformatorlarda toklar nisbati oʻramlar sonining teskari nisbatiga teng. Real transformatorlarda bu tenglik bajarilmaydi.

Ferromagnit oʻzakli transformator kuchlanishlari tenglamasi va vektor diagrammasi. Real transformator uchun chulgʻamlar qarshiliklari, oʻzakdagi quvvat isrofi va sochilgan magnit oqimi hisobga olinadi. 12.14-rasmda real transformator sxemasi keltirilgan. Undagi R_1, R_2 – chulgʻamlar aktiv qarshiliklari, X_1, X_2 – chulgʻamlarning sochilgan magnit oqimi hisobidan hosil boʻladigan induktivliklari.



12.14- rasm

Keltirilgan sxema uchun Kirxgof 2- qonuni asosida tenglama tuzamiz:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_0 + \underline{I}_1 R_1 + j \underline{I}_1 X_1, \quad (12.2)$$

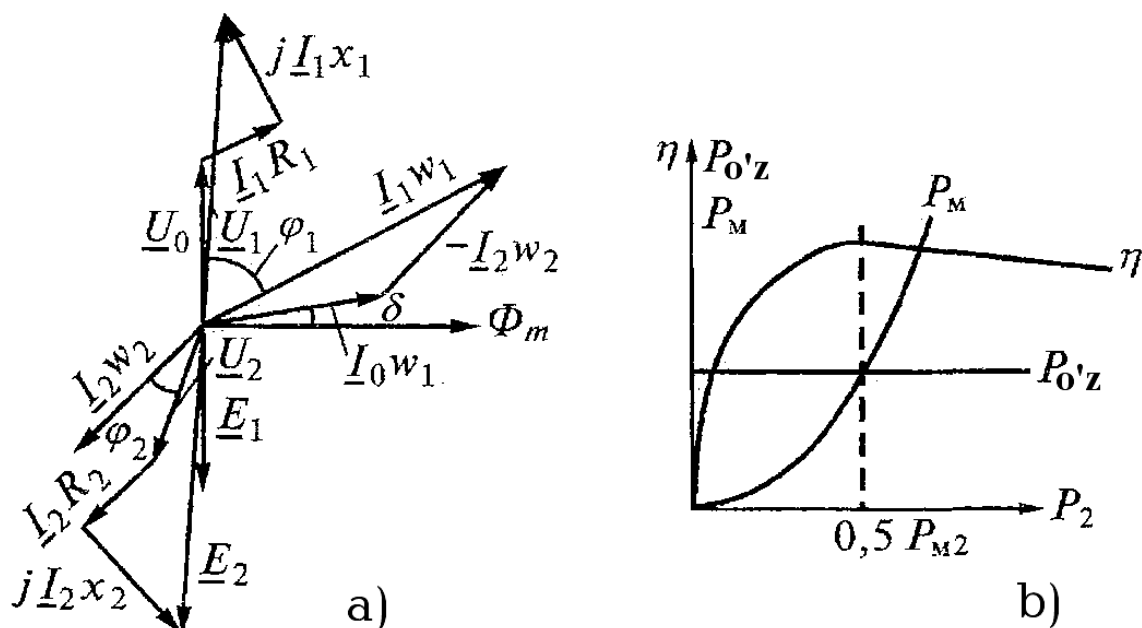
$$\underline{E}_2 = \underline{U}_2 + \underline{I}_2 R_2 + j \underline{I}_2 X_2. \quad (12.3)$$

(12.1) ... (12.3) tenglamalar asosida aktiv-induktiv yuklamali transformator vektor diagrammasini quramiz. Diagramma qurishni $\underline{\Phi}_m$ magnit oqimi vektorini qurishdan boshlaymiz (12.15- rasm, a).

$\underline{I}_2 w_2$ vektor yoʻnalishini ixtiyoriy tanlaymiz. Unga φ_2 burchak ostida $\underline{U}_2$ vektorni joylashtiramiz va (12.3) tenglama asosida kuchlanishlar koʻpburchagini quramiz. Magnit oqimi vektori $\underline{\Phi}_m$ ga nisbatan δ burchak ostida $\underline{I}_0 w_1$ vektorni joylashtirib, (12.1) tenglama asosida magnitlovchi kuchlar uchburchagini quramiz. $\underline{E}_1$ EYK vektori $\underline{\Phi}_m$ vektordan 90° ga orqada qolishini bilgan holda $\underline{E}_1$ vektorni diagrammaga joylashtiramiz. $\underline{E}_1$ va $\underline{U}_0$ vektorlar oʻzaro qarama-qarshi ekanligidan $\underline{U}_0$ vektorni quramiz va (12.2) tenglama asosida kuchlanishlar toʻrtburchagini hosil qilamiz.

Vektor diagrammadan koʻrinib turibdiki, $\underline{I}_2$ tok ortishi bilan $\underline{I}_1$ tok ortadi va yuklamaning oshishi quvvat koefitsiyentini oshishiga olib keladi.

Salt ish rejimida sochilgan magnit oqimi juda kam va asosiy magnit oqimining taxminan 0,25% ni tashkil etadi. Yuklama rejimida ikkilamchi chulgʻam tokidan hosil boʻlgan magnit oqimi asosiy magnit oqimini kamaytirishi sababli sochilgan magnit oqimi toklarga proporsional ravishda ortadi va nominal yuklamada 5% gacha yetadi, yaʼni salt ish



12.15- rasm

rejimiga nisbatan 20 marta ortadi. Bunda asosiy magnit oqimi oʻzgarmay qolishi tufayli poʻlat oʻzakdagi isroflar oʻzgarmasa-da, chulgʻamdagi isroflar toklar kvadratiga proporsional ravishda oʻzgaradi (12.15- rasm, b).

Transformator FIK quyidagi formula yordamida aniqlanadi:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{ch} + P_{o'z}},$$

bu yerda $P_{ch} = P_{ch1} + P_{ch2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$ - chulgʻamlardagi quvvat isrofi, $P_{o'z}$ - poʻlat oʻzakdagi quvvat isrofi.

$P_{ch} = P_{o'z}$ boʻlganda FIK eng katta boʻlib, u nominal yuklamaning 50% ida hosil boʻladi (12.15- rasm, b).

Transformatorning almashlash sxemasi. Transformator toʻrtqutblik boʻlganligi sababli T – yoki P – simon ekvivalent almashlash sxema bilan tavsiflanishi mumkin. Buning uchun oʻzaro magnit maydoni yordamida bogʻlangan va elektr jihatdan oʻzaro bogʻlanmagan konturlarni elektr zanjiri bilan almashtirish lozim boʻladi. Bunda ikkala chulgʻam parametrlari bitta chulgʻam, odatda, birlamchi chulgʻam oʻramlar soniga keltiriladi. Ikkilamchi zanjir parametrlari shtrix bilan ajratiladi.

Aytaylik, transformator ikkilamchi chulgʻamiga uzatilayotgan quvvat $E_2 I_2 \cos \psi_2 = E_2' I_2' \cos \psi_2$ (12.4) ga, ikkilamchi chulgʻamdan yuklamaga berilayotgan quvvat esa $U_2 I_2 \cos \psi_2 = U_2' I_2' \cos \psi_2$ (12.5) ga teng boʻlsin. Ikkilamchi chulgʻam qizishiga sarf boʻlayotgan quvvat:

$$I_2^2 R_2 = (I_2')^2 R_2', \quad (12.6)$$

φ_2 va ψ_2 fazalar siljishi burchaklari $(X_2/R_2) = (X_2'/R_2')$ (12.7) tenglikka proporsional ravishda oʻzgaradi.

Shuning uchun ham $w_2' = w_1$ boʻlganda $E_2' = E_1 = nE_2$ (12.8) boʻladi. (12.4) va (12.8) tengliklardan quyidagini hosil qilish mumkin:

$$I_2' = \frac{E_2}{E_1} I_2 = \frac{I_2}{n}. \quad (12.9)$$

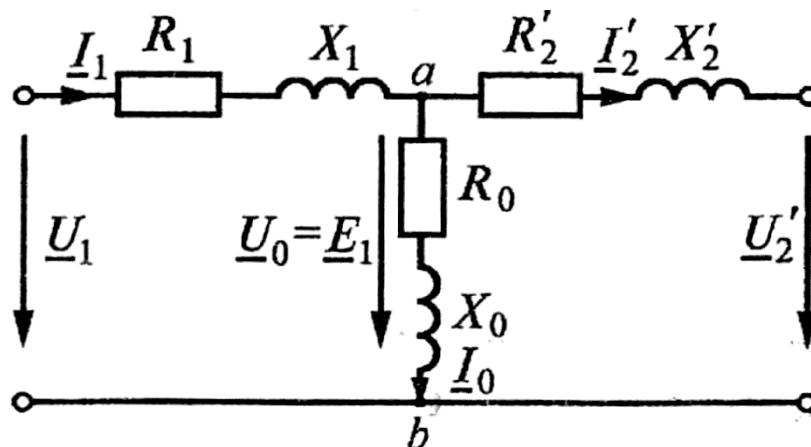
(12.5) va (12.9) tengliklardan esa $U_2' = nU_2$ ni hosil qilish mumkin.

(12.6), (12.7) va (12.9) tenglamalarni birgalikda yechib, quyidagilarni hosil qilamiz:

$$R_2' = n^2 R_2, \quad X_2' = n^2 X_2.$$

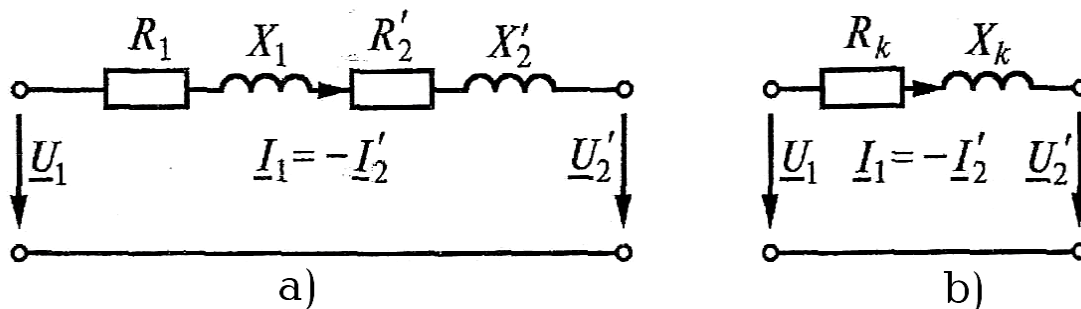
Birlamchi va ikkilamchi chulgʻamlar EYKlarini *tengligi sharti* asosida chulgʻamlarni bitta elektr zanjiriga birlashtirish imkoniyati kelib chiqadi (12.16- rasm).

Bu sxemada *ab* shoxobcha magnitlanish shoxobchasi deb ataladi. R_0 - poʻlat oʻzakdagi quvvat isroflarini belgilovchi aktiv qarshilik; X_0 - poʻlat oʻzakdagi asosiy magnit oqimini tavsiflovchi reaktiv qarshilik; R_2', X_2' - birlamchi chulgʻam oʻramlar soniga keltirilgan ikkilamchi chulgʻam aktiv va reaktiv qarshiliklari. Shuni aytib oʻtish joizki, yuqorida keltirilgan ekvivalent sxema uchinchi bobda keltirilgan sxema (3.20- rasm)dan R_0 qarshilik mavjudligi bilan farq qiladi.



12.16- rasm

Ayrim hollarda, transformatorning soddalashtirilgan ekvivalent almashlash sxemasidan foydalaniladi. Bunday sxema 12.16- rasmdagi sxemadan magnitlovchi shoxobcha bo'lmashligi ($I_0 = 0$) bilan farq qiladi (12.17- rasm, a). $I_0 = 0$ da $I_1 = I_2'$ bo'lib, $R_1 + R_2' = R_k$ va $X_1 + X_2' = X_k$ belgilashlarni hisobga olsak, almashlash sxemasi yanada sodda ko'rinishda bo'ladi (12.17- rasm, b).



12.17- rasm

Transformatorning soddalashtirilgan almashlash sxemasidan yuklama nominal qiymatga yaqin bo'lgan hollarda foydalaniladi. Kichik yuklamalarda salt ish tokini hisobga olmaslik hisoblashlarda katta xatoliklarga olib keladi.

12.7. Ferrorezonans hodisasi

12.7.1. Umumiy ma'lumotlar

Po'lat o'zakli induktiv g'altak (nochiziqli element) va kondensator (chiziqli element) o'zaro ketma-ket yoki parallel ulangan zanjirda yuz beradigan rezonans *ferrerezonans* deb ataladi. *Chiziqli zanjirlardagi rezonansdan farqli o'laroq, nochiziqli zanjirlarda rezonans rejimini nafaqat*

zanjir parametr(L, C)larini, balki manba kuchlanishi yoki toki qiymatini rostlab ham hosil qilish mumkin. Bunda tok va kuchlanish asosiy garmonika orasidagi faza siljish burchagini ishorasi o'zgarishi kuzatiladi. Quyida ferreazonans hodisasiga 1963 yilda akademik G'.R. Raximov tomonidan berilgan ta'rifni keltiramiz: «*Ferreazonans – noxiziq induktivlik va chiziqli kondensatordan iborat konturning ma'lum parametrlaridagi chastotasi manba chastotasiga teng, amplitudasi esa maksimumga yaqinlashadigan davriy avtoparametrik ravishda qo'zg'aladigan elektromagnit tebranishlar paydo bo'lish hodisasidir*». Ferreazonans hodisasini o'rganishda tahlilni soddalashtirish maqsadida induktiv g'altakdagi nosinusoidal tok va kuchlanishlar ekvivalent sinusoidal bilan almashtiriladi. Reaktiv elementlarning o'zaro ketma-ket yoki parallel ulanishiga qarab, zanjirda kuchlanishlar yoki toklar ferreazonansi kuzatiladi.

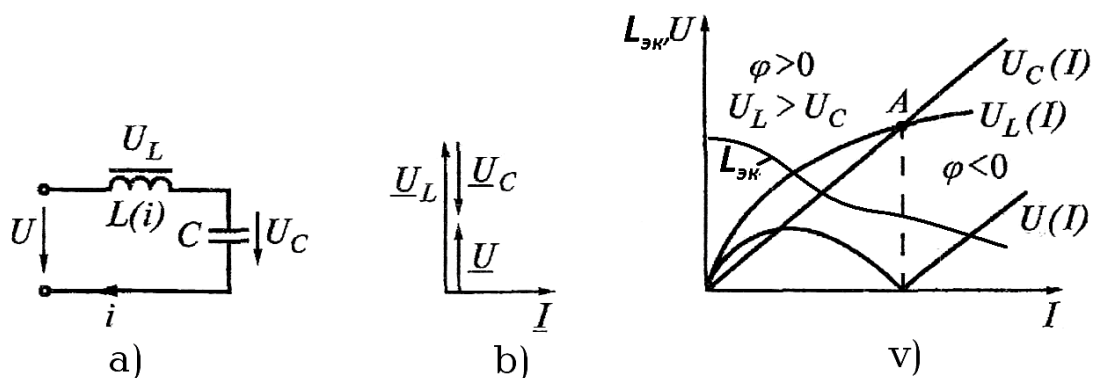
11.7.2. Kuchlanishlar ferreazonansi

Noxiziq induktivlik va chiziqli kondensator ketma-ket ulangan zanjir sinusoidal kuchlanish manbayiga ulangan bo'lsin (12.18- rasm, a). Tahlilni osonlashtirish maqsadida po'lat o'zak va chulg'amdagi quvvat isroflarini hamda sochilgan magnit oqimini hisobga olmaymiz. Tok va kuchlanishlar vaqt bo'yicha sinusoidal qonuniyat bilan o'zgaradi, deb hisoblaymiz (12.18- rasm, b).

Kirish kuchlanishining kompleks ta'sir etuvchi qiymati Kirxgof 2-qonuni bo'yicha quyidagicha yoziladi:

$$U = |\underline{U}_L + \underline{U}_C| = |\underline{U}_L - \underline{U}_C|. \quad (12.10)$$

12.18- rasm, v da $U_L(I)$ va $U_C(I)$ bog'lanishlar grafiklari qurilgan. Undagi $U_L(I)$ bog'lanish magnitlanish egri chizig'i



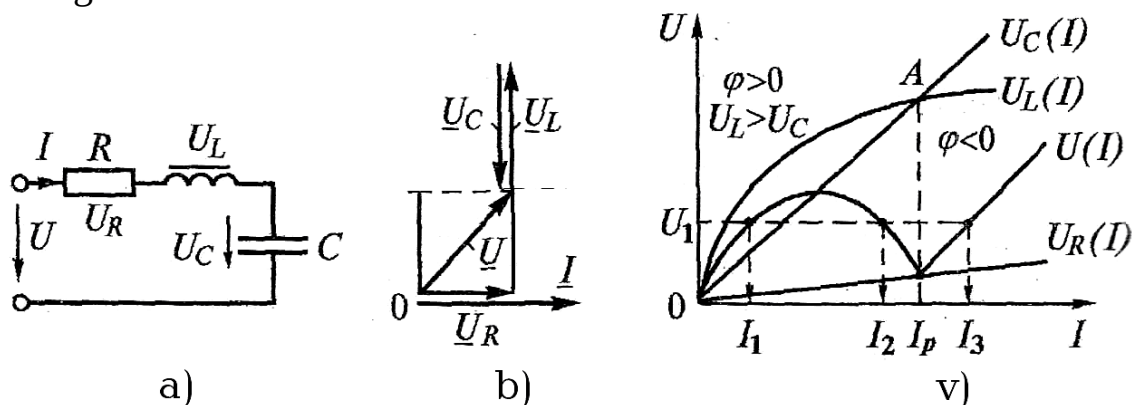
12.18- rasm

$B(H)$ ga o'xshash bo'ladi, ya'ni chulq'amdan o'tayotgan tok ortishi bilan g'altakning to'la qarshiligi kamayib boradi. Zanjir umumiy kuchlanishi va toki orasidagi $U(I)$ xarakteristikani qurish uchun (12.10) tenglamadan foydalanamiz. Ideal holat uchun A nuqtada reaktiv elementlardagi kuchlanishlar qiymatlari o'zaro teng, yo'nalishlari esa qarama-qarshi bo'ladi. Zanjirdagi bunday rejim chiziqli zanjirlardagi mos rejimga o'xshash bo'lganligi sababli kuchlanishlar ferrezonansi deb ataladi.

Agar zanjir $L(i)$, S elementlardan tashqari R aktiv qarshilikka ham ega bo'lsa, u holda (12.10) tenglik quyidagicha yoziladi (12.19- rasm, a):

$$U = |\underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C| = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}.$$

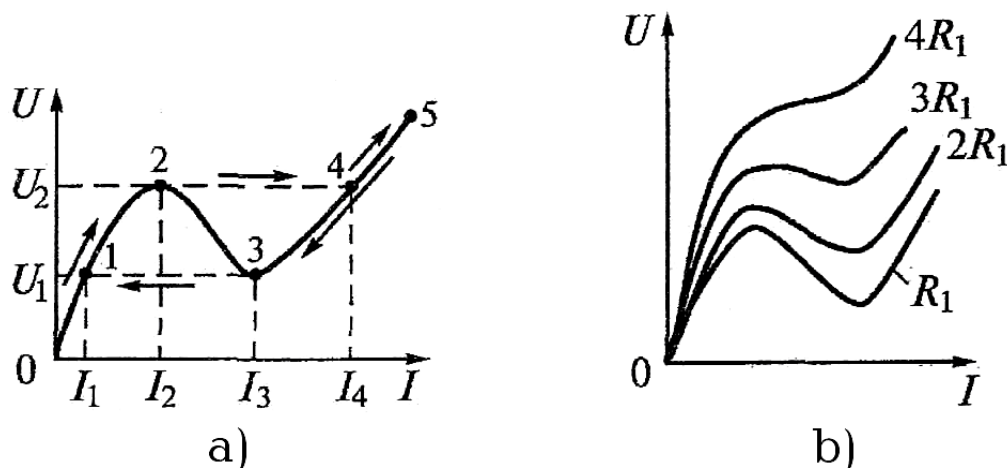
Oxirgi tenglikka mos keluvchi vektor diagramma 12.19- rasm, b da, VAX lar esa 12.19- rasm, v da keltirilgan. natijaviy VAX $U(I)$ ning o'ziga xos xususiyati shundan iboratki, u absissa o'qiga nisbatan yuqorida joylashgan.



12.19- rasm

Rezonansgacha $|u_L| > |u_C|$ bo'lganligi sababli, zanjir induktiv xarakterga, rezonansdan keyin esa, $|u_L| < |u_C|$ bo'lganligi sababli sig'im xarakterga ega. $U(I)$ xarakteristikani olinishini tahlil qiladigan bo'lsak, agar manba kuchlanishi noldan oshirib borilsa, VAX dagi nuqta 0-1-2 yo'l bo'ylab harakatlanadi (12.20- rasm, a). Manba kuchlanishi yanada oshirilsa, bu nuqta 2 dan 4 ga sakrab o'zgaradi. Bunda 2- nuqtada zanjir induktiv xarakterdan 4- nuqtada sig'im xarakterga o'zgaradi, faza siljishi burchagining esa ishorasi o'zgaradi, ya'ni faza to'ntarilishi yuzaga keladi. Manba kuchlanishining keyingi ortishida nuqtaning 4-5 yo'l bo'ylab harakatlanishi kuzatiladi. Manba kuchlanishi kamaytirilganda, VAX dagi nuqta 5-4-3 yo'l bo'ylab harakatlanadi, keyin esa 1- nuqtaga sakrash yuz beradi. Sakrashlar paytida zanjirdagi tok o'z qiymatini sakrab o'zgartiradi va bu *trigger effekti* deb ataladi. Bu effektning yuzaga kelishiga asosiy

sabab VAX ning 2-3 qismida pasayish, ya'ni kuchlanish va tok o'rtasidagi to'g'ri proporsionallikning buzilishidir. Elektrotexnikada VAX ning bu qismi *nobarqaror qism* deb ataladi.



12.20- rasm

VAX dagi 2-3 nobarqaror qismni tajribada sakrachsiz hosil qilish uchun zanjirni qiymati rostlanuvchi tok manbayidan ta'minlash lozim bo'ladi.

Shuni aytish joizki, zanjirda aktiv qarshilikning orttirilishi VAXni absissa o'qidan yuqoriga ko'tarilishiga va pasayuvchi qismni kamayishiga olib keladi (12.20- rasm, b). Aktiv qarshilik juda katta bo'lganda esa pasayuvchi qism umuman yo'qoladi. Kondensator sig'imining o'zgarishi ham rezonans jarayoniga ta'sir ko'rsatadi: agar $U_C(I)$ xarakteristika $U_L(I)$ egri chiziqdan yuqorida yoki juda pastda joylashib, u bilan kesishmasa, u holda ferreazonans umuman yuzaga kelmaydi.

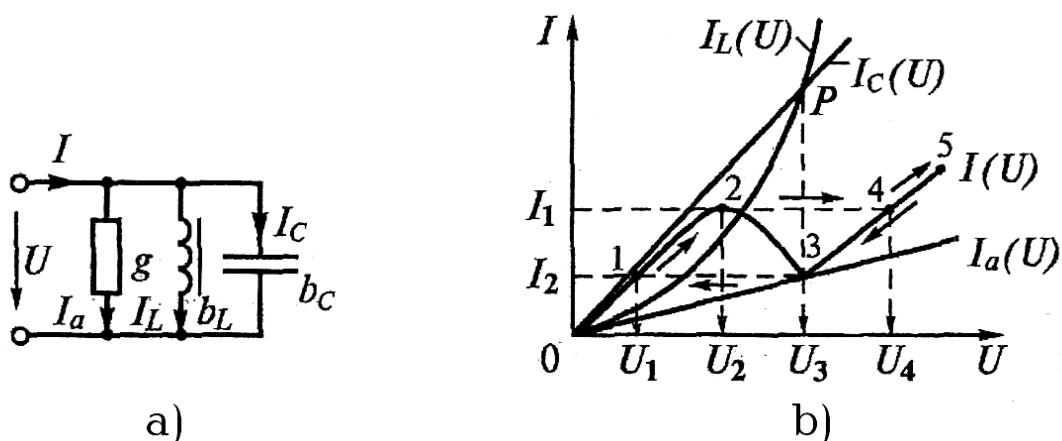
11.7.3. Toklar ferreazonansi

Po'lat o'zakli induktiv g'altak va kondensator o'zaro parallel ulangan zanjirda toklar ferreazonansi kuzatilishi mumkin (12.21- rasm, a). $I_a(U)$, $I_L(U)$ va $I_C(U)$ bog'lanishlarning o'zgarish xarakteri ketma-ket ulangan zanjir elementlaridagi kuchlanishlarning tokka bog'liqlik grafiklariga o'xshash bo'ladi (12.21- rasm, b).

Zanjir natijaviy VAX sini qurish uchun Kirxgof 1- qonunidan foydalaniladi:

$$\underline{I} = \underline{I}_a + \underline{I}_L + \underline{I}_C \text{ yoki } I = \sqrt{I_a^2 + (I_L - I_C)^2}.$$

$I_L(U)$ va $I_C(U)$ grafiklarning kesishgan nuqtasi (P) zanjirdagi toklar rezonansi rejimiga mos keladi. Bunda induktivlikdagi tok birinchi garmonikasi sig'imdagi tokka teng bo'ladi. Zanjir umumiy toki aktiv tashkil etuvchi I_a va induktiv tashkil etuvchi I_L tok yuqori garmonikalarining yig'indisiga teng bo'ladi.



12.21- rasm

Parallel zanjirda ham trigger effekti kuzatilishi mumkin. Agar manba tokining qiymati sekin asta oshirib borilsa, u holda U va I lar bog'lanishini belgilovchi nuqta avval grafikdagi 0-1-2 qism bo'ylab harakatlanadi (12.21- rasm, b). Keyin esa kuchlanish qiymati bo'yicha 2- nuqtadan 4- nuqtaga sakraydi. Manba tokining qiymati yanada oshirilishi natijasida nuqta grafikning 4-5 qismi bo'ylab siljiydi. Tok kamaytirilganda esa qaralayotgan nuqta 5-4-3 yo'l bo'ylab siljib, keyin sakrab 1- nuqtaga o'tadi va nolgacha kamayadi. Toklar ferreazonansida kuchlanish o'z qiymatini sakrab o'zgartiradi.

Parallel zanjirning natijaviy VAX sidagi pasayuvchi qismini tajribada olish uchun zanjirni kuchlanish manbayidan ta'minlash lozim bo'ladi.

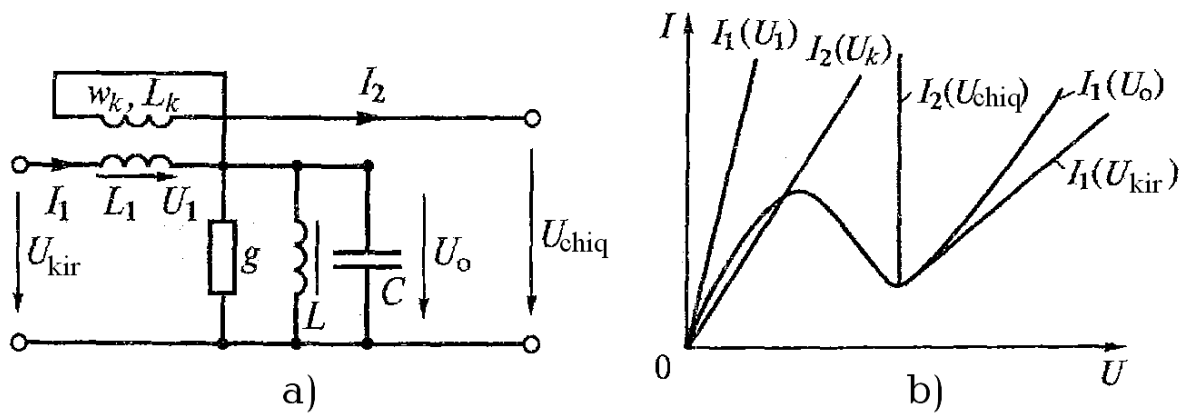
Rezonans rejimida zanjir umumiy toki uchinchi garmonikasining amplitudasi birinchi garmonika amplitudasidan bir necha marta ortib ketishi mumkin.

Shuni aytib o'tish lozimki, ferreazonans hodisasiga o'xshash effektini chiziqli induktivlik nochiziqli sig'im elementlaridan tashkil topgan zanjirda ham kuzatish mumkin.

12.7.4. Ferrerezonansli kuchlanish stabilizatori

Ferrerezonansli zanjirlar yordamida o'zgaruvchan tok kuchlanishini stabillash, ya'ni me'yorlash mumkin. Energetika va avtomatika tizimlarida kuchlanishlar va toklar ferrerezonansiga asoslangan va xilma-xil sxemali kuchlanish stabilizatorlari keng qo'llaniladi.

12.22- rasm, a da ferrerezonansli kuchlanish stabilizatorining eng oddiy sxemalaridan biri keltirilgan. U parallel LC konturga ketma-ket ulangan L_1 induktivlik va u bilan induktiv bog'langan L_k kompensatsiyalovchi induktivlikdan tashkil topgan. L_1 va L_k g'altaklar



12.22- rasm

bitta o'zakka o'ralgan bo'lib, induktiv jihatdan o'zaro qarama-qarshi ulangan. L_k g'altakdagi U_k kuchlanish tok bilan chiziqli bog'langan. Shuning uchun $U_{chiq} = U_0 + U_k$. Stabilizator chiqish xarakteristikasi $I_2(U_{chiq})$ ni olish uchun rezonans konturining $I_1(U_0)$, chiziqli induktivlikning $I_1(U_1)$ va kompensatsiyalovchi g'altakning $I_2(U_k)$ VAX larini quramiz (12.22- rasm, b). Bunda $I_1 \approx I_2 = I$ deb hisoblaymiz. $I_1(U_1)$ va $I_1(U_0)$ VAX larni kuchlanish o'qi bo'ylab qo'shamiz. $I_2(U_{chiq})$ bog'lanishni hosil qilish uchun $I_1(U_0)$ egri chizig'idan $I_2(U_k)$ VAX sini ayiramiz.

Ko'rib chiqilgan sxemada kirish kuchlanishining ma'lum diapazonda o'zgarishi sxemaning chiqishidagi kuchlanishni deyarli o'zgartirmaydi, ya'ni chiqish kuchlanishi stabil saqlanadi.

Nazorat savollari

1. O'zgaruvchan tok nochiziq zanjirlaridagi nochiziq elementlar xususiyatlarini aytib bering. 2. Approksimatsiyalash deganda nimani tushunasiz? 3. O'zgaruvchan tokni to'g'rilashda nochiziq element qanday vazifani bajaradi? 4. Ekvivalent linearizatsiya usulining mohiyatini aytib bering. 5. Ferromagnit o'zakli o'zgaruvchan tok zanjirlarini o'ziga xos xususiyatlarini ayting! 6. O'zgaruvchan magnit maydoni ta'sirida bo'lgan ferromagnit materiallar asosiy xossalarini izohlang! 7. Elektrotexnik po'latdagi isroflar qanday aniqlanadi va ularni kamaytirish yo'llarini aytib bering! 8. Elektrotexnik po'lat o'zakli g'altakning ekvivalent sxemasi va vektor diagrammasini chizing hamda tushuntirib bering! 9. O'zakli transformatorlarga xos bo'lgan xususiyatlarni izohlab bering! 10. Ferrerezonans nima? 11. Trigger effektini tushuntirib bering! 12. Ferrerezonans hodisasini chiziqli zanjirlarda yuz beradigan rezonans hodisasi bilan qiyosiy taqqoslang! 13. Ferrerezonansli kuchlanish stabilizatori qanday ishlaydi?

III- BO‘LIM. ELEKTROMAGNIT MAYDON

13- BOB. ELEKTROSTATIK MAYDON

13.1. Elektrostatik maydonni tavsiflovchi asosiy kattalik va munosabatlar

Statsionar elektr maydoni vaqt bo'yicha o'zgarmaydigan va qo'zg'almas elektr zaryadlarning maydoni bo'lib, u *elektrostatik maydon* deb ataladi.

Elektrostatik maydon – elektromagnit maydonning xususiy ko'rinishidir. Elektr zaryadlangan kondensator elektrodleri orasidagi elektr maydoni elektrostatik maydonga misol bo'la oladi. Bunda magnit maydoni hosil bo'lmaydi, deb qabul qilinadi. Aslida esa, modda tarkibidagi elementar zaryad (elektron va proton)larning uzluksiz harakati natijasida elektromagnit maydon hosil bo'ladi. Bu maydondagi magnit maydonning umumiy maydondagi ulushi juda kam bo'lganligi sababli, u hisobga olinmaydi.

Elektrostatik maydonni o'rganishda nuqtaviy elektr zaryadi yoki elektr zaryadlarning elektr maydoni *bir jinsli va izotrop* (barcha yo'nalishlar bo'yicha bir xil xossaga ega bo'lgan) muhitda yuzaga keladi, deb hisoblanadi.

Agar q elektr zaryadi V hajmli fazoda taqsimlangan bo'lsa, u holda elektr zaryadining *hajmiy zichligi* $\rho = \frac{dq}{dV}$ va elektr zaryadi $q = \int_V \rho V$ ifoda bilan aniqlanadi.

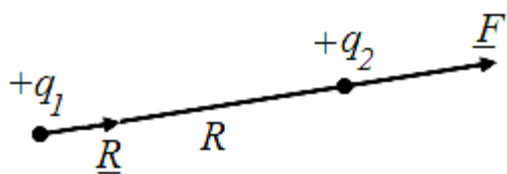
Agar q elektr zaryadi S yuzali sirt bo'ylab taqsimlangan bo'lsa, u holda elektr zaryadining *sirt bo'yicha zichligi* $\sigma = \frac{dq}{dS}$ va elektr zaryadi $q = \int_S \sigma dS$ ifoda bilan aniqlanadi.

Agar zaryad l uzunlikdagi liniya bo'ylab taqsimlangan bo'lsa, u holda elektr zaryadining *liniya bo'ylab zichligi* $\tau = \frac{dq}{dl}$ va elektr zaryadi $q = \int_l \tau dl$ ifoda bilan aniqlanadi.

Bizga fizika kursidan ma'lumki, agar elektr zaryadlangan jism o'lchamlari u joylashgan joydan maydon o'rganilayotgan nuqtagacha bo'lgan masofadan juda kichik bo'lsa, u holda bunday jism elektr zaryadi

nuqtaviy elektr zaryadi deb ataladi. Tabiiyki, nuqtaviy elektr zaryadi zichligi cheksiz katta bo‘ladi.

Elektrostatik maydonni o‘rganishda Kulon qonunini bilish muhim ahamiyatga ega. Unga ko‘ra «Vakuumdagi ikkita nuqtaviy q_1 va q_2 elektr zaryadlari bir-biri bilan shu elektr zaryadlarining ko‘paytmasiga to‘g‘ri



13.1- rasm

proporsional va ular orasidagi masofaning kvadratiga teskari proporsional bo‘lgan kuch bilan o‘zaro ta‘sir qiladi» (13.1- rasm), ya‘ni:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \varepsilon_0 R^2}, [N], \text{ bu yerda } q_1, q_2 -$$

elektr zaryadlari, [C]; R – ular orasidagi masofa, [m],

$\varepsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi \cdot c^2} \approx \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 8,856 \cdot 10^{-12} [\frac{F}{m}]$, - elektr doimiysi, s – yorug‘lik tezligi, [m/s]; F – kuch, [N].

Shuni esda tutish lozimki, Kulon qonuni faqat nuqtaviy elektr zaryadlar uchun o‘rinli. Elektr zaryadlari nuqtaviy bo‘lmaganda elektr zaryadlangan jismlar shakli o‘zaro ta‘sir kuchi kattaligini o‘zgarishiga olib keladi.

Agar elektr zaryadlangan zarrachalar vakuumda emas, balki bir jinsli, izotrop va elektr tokini o‘tkazmaydigan muhitda joylashgan bo‘lsa, u holda ular o‘rtasidagi o‘zaro ta‘sir kuchi vakuumdagiga nisbatan ε marta kichik bo‘ladi, ya‘ni:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 R^2}, [C]$$

bu yerda ε - zaryadlangan zarrachalar joylashgan muhitning nisbiy dielektrik singdiruvchanligi.

Kulon kuchining yo‘nalishi q_1 va q_2 elektr zaryadlarini tutashtiruvchi to‘g‘ri chiziq bo‘ylab yo‘nalgan bo‘lib, elektr zaryadlar ishorasi bir xil bo‘lganda ular bir-biridan itariladi, aks holda esa – tortiladi.

O‘zaro ta‘sir kuchi vektor ko‘rinishda quyidagicha yoziladi:

$$\underline{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi \varepsilon \varepsilon_0 R^2} \underline{R},$$

bu yerda $\underline{R}$ – elektr zaryadi q_1 joylashgan nuqtadan q_2 elektr zaryadi joylashgan nuqtaga yo‘nalgan birlik vektor.

Elektr maydoni, shu jumladan elektrostatik maydon ham maydon kuchlanganligi bilan tavsiflanadi. U elektr zaryadiga maydon tomonidan ta‘sir etayotgan kuchning shu elektr zaryadi miqdoriga nisbati bilan aniqlanadi:

$$E = \frac{F}{q}, \quad \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$$

Nuqtaviy elektr zaryadi elektr maydoni kuchlanganligining ifodasini Kulon qonuni yordamida quyidagicha yozish mumkin:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2}.$$

Maydon kuchlanganligi – vektor kattalik va maydonning kuch xarakteristikasidir.

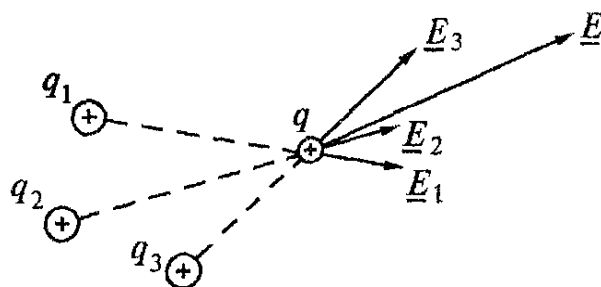
Elektrostatik maydon kuchlanganligi vektor ko‘rinishida quyidagicha aniqlanadi:

$$\underline{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \underline{R}.$$

Shuning uchun ham elektrostatik maydon kuchlanganlik vektorining maydoni sifatida qaralishi mumkin.

Agar elektr maydoni bir nechta elektr zaryadlari hisobiga hosil qilinsa, u holda natijaviy kuchlanganlik, ustma-ustlash (superpozitiya) prinsipiga ko‘ra har bir elektr zaryadi elektr maydoni kuchlanganlik vektorining yig‘indisiga teng (13.2- rasm), ya’ni:

$$\underline{E} = \underline{E}_1 + \underline{E}_2 + \underline{E}_3. \quad (13.1)$$

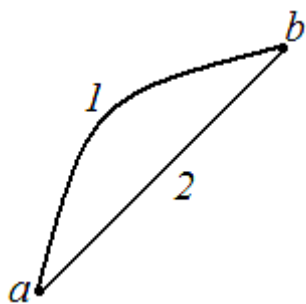


13.2- rasm

Agar fazoda elektr zaryadlarining taqsimlanishi ma’lum bo‘lsa, u holda (13.1) formula yordamida maydon kuchlanganligini qaralayotgan nuqtada aniqlash mumkin bo‘ladi. (13.1) tenglama elektrostatik maydonni hisoblashda ustma-ustlash prinsipini qo‘llash mumkinligini bildiradi.

Elektrostatik maydon xossalarini to‘liq aniqlash uchun uning har bir nuqtasi uchun kuchlanganlik vektori kattaligini topish (hisoblash) kerak bo‘ladi.

Agar elektr maydoniga q nuqtaviy elektr zaryadi kiritilsa, u holda maydon tomonidan elektr zaryadiga kuch ta’sir qilishi natijasida elektr zaryadi maydon bo‘ylab siljiydi. Bunda bajarilgan ish (13.3- rasm):



13.3- rasm

$$A = \int_1^2 \underline{F} d\underline{l} = q \int_1^2 \underline{E} d\underline{l}, [J].$$

Elektrostatik maydon quyidagi xossaga ega: «Berk kontur bo‘ylab maydon bajarigan ish nolga teng». Elektrostatik maydon uchun quyidagi munosabatlarni isbotsiz keltiramiz:

$$\oint \underline{E} d\underline{l} = 0.$$

Stoks teoremasiga ko‘ra:

$$\oint \underline{E} d\underline{l} = \int_S \text{rot} \underline{E} dS.$$

$W_E = \oint \underline{E} d\underline{l} = 0$, ya’ni maydon kuchlanganligi vektorining sirkulatsiyasi nolga teng bo‘lganligi sababi $\text{rot} \underline{E} = 0$. (13.2)

Maydon nazariyasida rotor – maydonning ko‘rilayotgan nuqtasida uyurma hosil bo‘lishi qobiliyatini tavsiflaydigan, uning har bir nuqtasini aniqlaydigan va uni tavsiflovchi vektor kattalikning hajmiy hosilasiga teng bo‘lgan hamda teskari ishora bilan olinadigan vektor kattalik.

(13.2) munosabat elektrostatik maydonning uyurmasiz maydon ekanligini ifodalaydi.

Maydon nazariyasida skalyar funksiyaning gradiyenti deb, shu funksiyaning eng katta o‘shish yo‘nalishi bo‘yicha olingan tezligiga aytiladi.

(13.2) munosabat o‘rinli bo‘lgan maydon uchun shunday skalyar funksiyaning topish mumkinki, uning musbat yoki manfiy ishorali gradiyenti maydon kuchlanganligi vektoriga teng bo‘ladi, ya’ni:

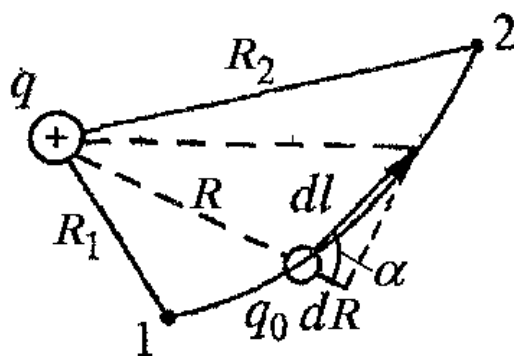
$$\text{grad} \varphi = \pm \underline{E}.$$

$\underline{E}$ ning oldidagi minus ishora uning yo‘nalishi φ funksiyaning kamayish tomoniga yo‘nalganligini bildiradi. φ funksiya potensial funksiya yoki potensial deb ataladi. Elektr potensial maydondagi elektr zaryadini uning biror nuqtasidan maydon chegarasidan tashqariga chiqarishda maydon tomonidan bajarilgan ish bilan tavsiflanadi.

Vakuumda hosil qilingan elektrostatik maydonning 1 nuqtasidan 2 nuqtasiga q_0 elektr zaryadni siljishini ko‘rib chiqamiz (13.4- rasm).

Elektr zaryadini maydon bo‘ylab $d\underline{l}$ uzunlik bo‘ylab siljishida bajarilgan ish:

$$dA = \underline{F} d\underline{l} = F \cos \alpha d\underline{l} = F dR = Eq_0 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} q_0 dR.$$



13.4- rasm

q_0 elektr zaryadini 1 nuqtadan 2 nuqtaga ko'chirishda bajarilgan ish:

$$A = \int_1^2 dA = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0} \int_1^2 \frac{dR}{R^2} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), [J].$$

Bu tenglik ikki tomonini q_0 ga bo'lib, potentsiallar ayirmasini hosil qilamiz:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), [V].$$

Bu formuladan ko'rinib turibdiki, potentsiallar ayirmasi faqat 1 va 2 nuqtalarning holatiga bog'liq bo'lib, elektr zaryadining qaysi trayektoriya bo'ylab siljishiga bog'liq emas. Bu prinsip bir jinsli va izotrop, ya'ni tanlangan barcha yo'nalishlarda parametrlari bir xil bo'lgan dielektrlarda hamda bir nechta nuqtaviy elektr zaryadlari uchun ham o'rinli.

Agar $R_2 = 0$ bo'lsa, u holda $E_2 = 0$, $\varphi_2 = 0$ bo'lib, elektr zaryadidan R masofadagi nuqtaning potentsiali $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R}$ ga teng bo'ladi.

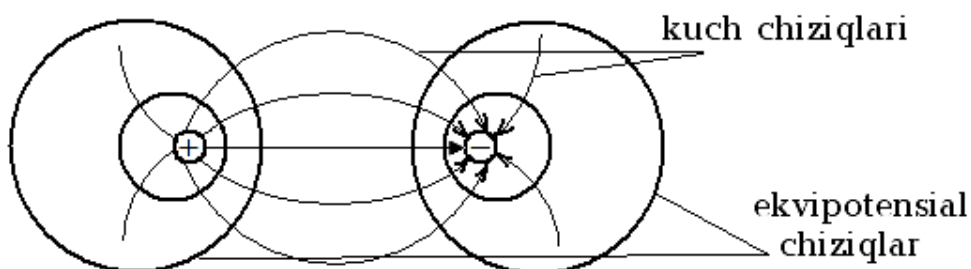
Potensialni maydon kuchlanganligi orqali aniqlash ham mumkin:

$$dA = \underline{F} d\underline{l} = q_0 \underline{E} d\underline{l}; A_{12} = \int_1^2 \underline{F} d\underline{l} = q_0 \int_1^2 \underline{E} d\underline{l}; \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q_0} = \int_1^2 \underline{E} d\underline{l}.$$

Elektrostatik maydondagi elektr zaryadi berk kontur bo'ylab siljiganda $\varphi_1 - \varphi_2 = \oint \underline{E} d\underline{l} = 0$ shart bajariladi.

Elektrostatik maydon kuch va ekvipotensial chiziqlar bilan tavsiflanadi. Bu maydonning kuch chiziqlari musbat elektr zaryadlangan jismdan boshlanib, manfiy elektr zaryadlangan jismda tugaydi. Kuch chizig'ini shunday o'tkazish kerakki, uning har qanday nuqtasidan o'tkazilgan urinma shu nuqtadagi kuchlanganlik yo'nalishi bilan bir xil bo'lsin. Elektrostatik maydonda teng potentsialga ega bo'lgan nuqtalar ekvipotensial sirtini tashkil etadi. 13.5- rasmda sirtlarning tekislik bilan

kesishgan chiziqlari tasvirlangan. *Bu chiziqlar ekvipotensial, ya'ni teng potentsialli chiziqlar deb ataladi. Maydonning har qanday nuqtasida ekvipotensial va kuch chiziqlari o'zaro 90° burchak ostida kesishadi.*



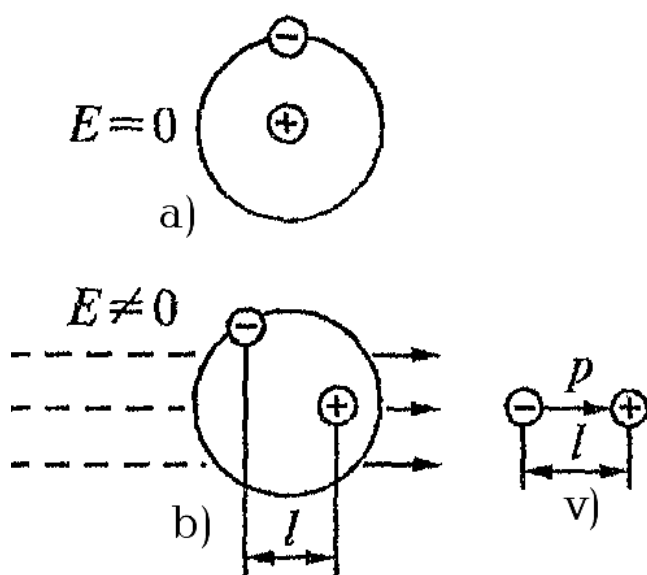
13.5- rasm

13.2. Elektr maydonidagi materiallarning xarakteristiklari

Bir xil elektr zaryadi turli muhitda har xil kattalikdagi elektr maydonini hosil qiladi. Chunki muhit (material) elektr maydoniga ta'sir ko'rsatadi. Bu holat materialdagi qo'shimcha elektr zaryadlarining harakatga kelishi natijasida o'zlarining elektr maydonini hosil bo'lishi bilan tushuntiriladi.

O'tkazgich materiallarda tashqi elektr maydoni ta'sirida erkin elektr zaryadlarining qayta taqsimlanishi yuz beradi va material ichida qo'shimcha elektr maydoni hosil bo'ladi. Bu maydon tashqi elektr maydonini to'la kompensatsiyalaydi. Shuning uchun ham o'tkazgich materialdagi natijaviy maydon kuchlanganligi nolga teng bo'ladi. O'tkazgich materiallarda elektr maydoni ta'sirida elektr zaryadlarining qayta taqsimlanish hodisasi *elektrostatik induksiya* deb ataladi. Bu hodisadan elektrotexnik qurilmalarni tashqi elektrostatik maydon ta'siridan himoyalash (elektrostatik ekranlar yasash)da foydalaniladi.

Elektr maydoni bilan o'zaro ta'siriga ko'ra dielektriklar *qutblanmagan* va *qutblangan* dielektriklarga bo'linadi. Qutblanmagan dielektriklarda bog'langan elektr zaryadlari mavjud bo'lib, tashqi elektr maydoni bo'lmaganda ular elektr neytral holatda bo'ladi. Musbat elektr zaryadi markazda, manfiy elektr zaryadi esa markaz atrofidagi aylanada joylashgan bo'ladi (13.6- rasm, a). Tashqi elektr maydoni ta'sirida bu elektr zaryadlari o'zaro siljiydi (13.6- rasm, b va v), natijada $m = ql$ elektr momenti bilan tavsiflanadigan dipol hosil bo'ladi. Bog'langan elektr zaryadlarini elektr maydoni ta'sirida siljishi *qutblanish* deb ataladi.



13.6- rasm

Qutblangan dielektrlarda tashqi elektr maydoni bo'lmagan holatda ham o'zaro siljigan bog'langan elektr zaryadlari mavjud bo'ladi. Ammo tashqi elektr maydoni bo'lmaganda tartibsiz joylashgan bu elektr zaryadlarining natijaviy elektr momenti nolga teng bo'ladi. Tashqi elektr maydoni ta'sirida dipollar joylashuvi o'zgaradi, natijada ular tashqi maydonga qarama-qarshi yo'nalgan

maydon hosil qiladi. Dielektrikdagi natijaviy elektr maydoni quyidagicha aniqlanadi:

$$E = E_{ich} - E_r,$$

bu yerda E_{ich} - dielektrik ichki elektr maydoni kuchlanganligi, E_r - tashqi elektr maydoni kuchlanganligi.

Shuni ta'kidlash joizki, qutblanish qancha kuchli bo'lsa, dielektrikdagi natijaviy elektr maydoni shuncha kuchsiz bo'ladi. Ya'ni maydonning natijaviy kuchlanganligi kam bo'ladi. Dielektrikning bu xossasini son jihatdan tavsiflash qutublanish intensivligi, ya'ni dipollar elektr momentlarini hajmiga nisbati uchun *qutblanganlik* deb ataluvchi kattalikdan foydalaniladi:

$$\underline{P} = \frac{P}{V} = \alpha \varepsilon_0 \underline{E}, \left[\frac{C}{m^2} \right]$$

bu yerda α - qutblanish koefitsiyenti.

Elektr maydonini tavsiflashda elektr induksiyasi yoki elektrik siljish vektoridan foydalaniladi:

$$\underline{D} = \varepsilon_0 \underline{E} + \underline{P} = \varepsilon_0 \underline{E} + \alpha \varepsilon_0 \underline{E} = (1 + k) \varepsilon_0 \underline{E} = \varepsilon_a \underline{E} = \varepsilon_a \underline{E},$$

bu yerda $\varepsilon = 1 + k$ - muhitning nisbiy dielektrik singdiruvchanligi, $\varepsilon_a = \varepsilon \varepsilon_0$ - muhitning absolut dielektrik singdiruvchanligi.

Elektr induksiyasi – vektor kattalik bo'lib, dielektrikdagi elektr zaryadlarini tashqi elektr maydoni ta'sirida yuza birligi bo'yicha siljishini son jihatdan tavsiflaydi. Elektr induksiyasi elektr maydoni kuchlanganligidan farqli ravishda muhitning xossalariga bog'liq emas.

13.3. Elektr maydoni kuchlanganligi vektorining oqimi. Gauss teoremasi

Gauss teoremasi elektrostatiikaning asosiy teoremlaridan biri bo'lib, Kulon qonuni va ustma-ustlash prinsipiga asoslanadi. S sirtidan o'tuvchi elektr maydoni kuchlanganlik vektori oqimini ko'rib chiqaylik (13.7-rasm, a).

Elementar oqim $d\psi_E = \underline{E}d\underline{S}$ ga teng bo'lib, to'la oqim quyidagicha aniqlanadi:

$$\psi_E = \int_S \underline{E}d\underline{S}, [\text{V} \cdot \text{m}]. \quad (13.3)$$

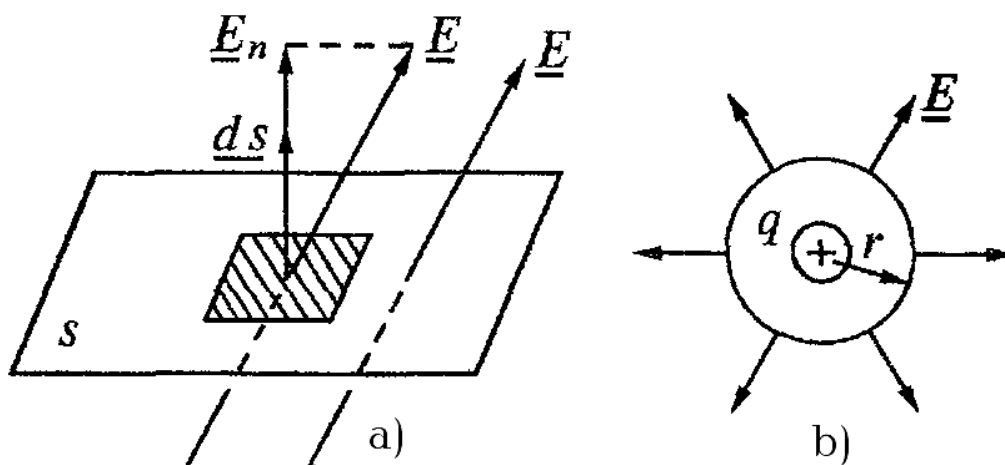
Agar elektr zaryadi yopiq sferik sirt ichida joylashgan bo'lsa, u holda (13.3) ga ko'ra:

$$\oint_S \underline{E}d\underline{S} = E \oint dS = E \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_a} \quad (13.4)$$

yoki

$$\oint_S \underline{D}d\underline{S} = \oint \epsilon_a \underline{E}d\underline{S} = q \quad (13.5)$$

bo'ladi.



13.7- rasm

(13.4) va (13.5) tenglamalar Gauss teoremasini ifodalaydi va quyidagicha ta'riflanadi. «Yopiq sirtni kesib o'tuvchi elektr induksiya oqimining vektori shu sirt ichidagi hajmda joylashgan erkin elektr zaryadlarining algebraik yig'indisiga teng yoki boshqacha qilib aytganda, yopiq sirtni kesib o'tuvchi elektr maydoni kuchlanganligi vektorining oqimi shu sirt chegaralab turgan hajmdagi erkin elektr zaryadlari algebraik yig'indisini muhitning absolut dielektrik singdiruvchanligiga nisbatiga teng».

Gauss teoremasi elektrostatik maydonning biror bir nuqtasidagi kuchlanganlik va potensialni topishda keng qo'llaniladi.

(13.4) va (13.5) tenglamalar *Gauss teoremasining integral shakllari deb ataladi*. Integral shakldagi Gauss teoremasi yordamida elektr induksiya $\underline{D}$ chiziqlarining bulog'i(chiqishi)ni *elektr* maydonining shu nuqtadagi elektr zaryadi zichligi bilan qanday bog'langanligini aniqlab bo'lmaydi. Bunday holda Gauss teoremasining differensial shaklidan foydalaniladi. Uni hosil qilish uchun (13.5) tenglamaning ikki tomonini S yopiq sirt bilan chegaralangan V hajmga bo'lamiz:

$$\oint_S \underline{D} d\underline{S} = \frac{q}{V}.$$

$$\text{Bundan } \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\oint_S \underline{D} d\underline{S}}{V} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{q}{V}.$$

Yopiq sirtni kesib o'tuvchi $\underline{D}$ vektor kattalikni shu sirt bilan chegaralangan hajmga nisbati hajm o'lchamlari nolga intilgandagi limiti $\underline{D}$ vektorning divergensiya (div) deb ataladi. Aytib o'tish joizki, div – bu hajmiy hosila olish demakdir.

Shunday qilib, Gauss teoremasi differensial shaklda quyidagicha yoziladi:

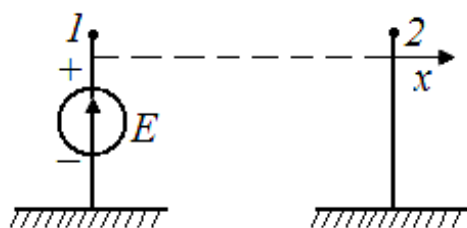
$$\text{div} \underline{D} = \rho,$$

ya'ni elektr maydonining manbayi uning elektr zaryadi joylashgan qismida mavjud bo'ladi.

$\epsilon_a = \text{const}$ bo'lgan muhit uchun quyidagi tenglama o'rinli:

$$\text{div} \underline{E} = \frac{\rho}{\epsilon_a}.$$

Masala. Oraliq masofasi $a = 2 \text{ sm}$ bo'lgan ikkita yassi elektrod vakuumda joylashgan (13.8- rasm). O'ngdagi elektrod yerlangan, chapdagisi esa EYKi 220 V bo'lgan batareyaning musbat qismasiga ulangan, manfiy qismasi esa yerlangan. Elektrodlar orasiga zichligi (bunda $a = 30 \text{ kV/sm}^3$) qonuniyat bilan o'zgaradigan hajmiy elektr zaryadi



13.8- rasm

joylashtirilgan. x – chap plastinadan boshlanadigan masofa. Elektrodlar orasidagi fazoda potensialning o'zgarish qonuniyatini aniqlang.

Yechish. Elektrodning o'lchami ular orasidagi masofadan ancha katta, deb hisoblaymiz va x o'qini 13.8- rasmdagidek

yoʻnaltiramiz. Masala shartiga koʻra potensial faqat x oʻqi boʻylab oʻzgaradi, y va z oʻqlari boʻylab esa oʻzgarmaydi. Binobarin,

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} = ax.$$

Yuqoridagi ifodani x boʻyicha ikki marta integrallab quyidagi ifodalarni hosil qilamiz: $\frac{d\varphi}{dx} = \frac{ax^2}{2} + C_1$, $\varphi = \frac{ax^3}{6} + C_1x + C_2$.

Chegaraviy shartlardan foydalanib, integrallash doimiylarini aniqlaymiz:

$x=0$ da $\varphi=200=C_2, V$; $x=2$ sm da $\varphi=0=200 + 2C_1 + \frac{30 \cdot 10^3 \cdot 8}{6}$; bundan $C_1 = -20100, V/sm$.

Binobarin,

$$\varphi = \frac{30 \cdot 10^3 x^3}{6} - 20100x + 200 = 5000x^3 - 20100x + 200, V.$$

13.4. Gauss teoremasini sigʻim va elektr maydonini hisoblashda qoʻllanishi

Dielektrik bilan ajratilgan barcha oʻtkazgich(elektrod)lar elektr zaryadlarini toʻplash va saqlash xususiyatiga ega. Bunda $q = CU$ ifodada C elektr sigʻimi deb ataluvchi proporsionallik koeffitsiyenti boʻlib, «elektrodlar-dielektrik» sistemasini elektr zaryadlari toʻplash qobiliyatini tavsiflaydi. Shuning uchun ham elektr zaryadi va elektr sigʻimi dielektrikning oʻlchamlari va xossalriga bogʻliq boʻladi.

Elektrotexnik qurilmalarning elektr sigʻimlari quyidagi ketma-ketlikda hisoblanadi:

1) (13.3) va (13.4) tenglamalarning oʻng tomonlari oʻzaro tenglashtirilib, elektr maydoni kuchlanganligining elektr zaryadi orqali ifodasi topiladi, yaʼni:

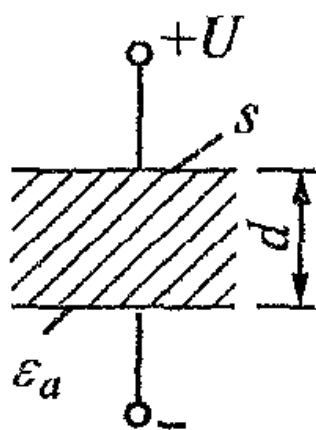
$$\int_s \underline{E} d\underline{S} = \frac{q}{\varepsilon_a};$$

2) elektr maydoni kuchlanganligi ifodasidan foydalanib elektrodlar orasidagi kuchlanish aniqlanadi;

3) yuqorida aniqlanganlar asosida elektr sigʻimi topiladi.

Quyida elektrodleri turli shaklga ega boʻlgan kondensatorlar, elektr uzatish liniyasi simlari elektr maydonlari va elektr sigʻimlarini hisoblash formulalarini koʻrib chiqamiz.

Yassi kondensator elektr maydoni va sig'imi (13.9- rasm). (13.3)



13.9- rasm

ifodaga ko'ra kondensator qoplamalari orasidagi elektr maydon kuchlanganligi vektorining oqimi $\psi_E = ES$ ga teng. Gauss teoremasiga ko'ra ushbu vektor oqimi $\psi_E = \frac{q}{\epsilon_a}$ ga teng. Ushbu tengliklar o'ng tomonlarini o'zaro tenglab va $E = \frac{U}{d}$, $U = \frac{q}{C}$ larni hisobga olib, yassi kondensator elektr sig'imi ifodasini hosil qilamiz, ya'ni:

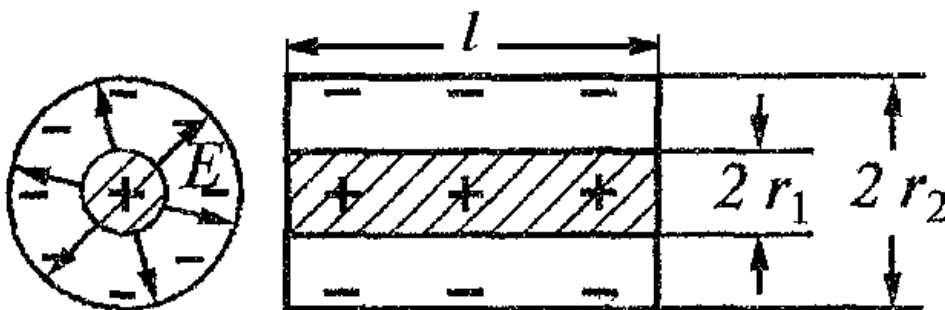
$$C = \frac{\epsilon_a S}{d}, [F].$$

Silindrsimon kondensator elektr maydoni va elektr sig'imi (13.10- rasm). (13.3) tenglamaga ko'ra $\psi_E = ES = E2\pi rl$. Gauss teoremasiga ko'ra esa $\psi_E = \frac{q}{\epsilon_a}$. Kondensator elektrodleri orasidagi kuchlanish quyidagicha topiladi:

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{q}{2\pi l \epsilon_a r} dr = \frac{q}{2\pi \epsilon_a l} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Silindrsimon kondensator elektr sig'imi $C = \frac{2\pi \epsilon_a l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$, elektr maydon

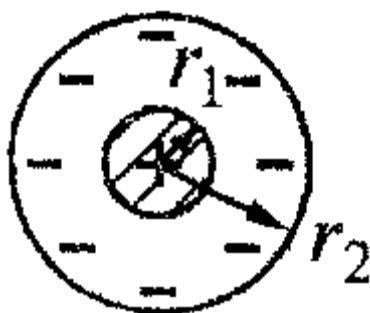
kuchlanganligi esa $E = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}}$ formulalar yordamida aniqlanadi.



13.10- rasm

Oxirgi tenglamadan ko‘rinib turibdiki, silindrsimon kondensator elektrodleri orasidagi elektr maydoni notekis taqsimlangan bo‘lib, uning maksimal qiymati ichki elektrod sirtida bo‘ladi. Bu maydon tekis taqsimlangan bo‘lishi uchun $\epsilon_a r = \text{const}$ yoki $rl = \text{const}$ shart bajarilishi lozim bo‘ladi.

Sferasimon kondensator elektr maydoni va elektr sig‘imi (13.11-rasm). Sferasimon kondensator biri ikkinchisini ichiga joylashgan va o‘zaro dielektrik bilan ajratilgan ikkita shardan iborat. Sferaning sirtidan



13.11- rasm

o‘tuvchi elektr maydoni kuchlanganligi vektorining oqimi (13.3) ga ko‘ra $\psi_E = \oint \underline{E} d\underline{S} = 4\pi r^2 E$ ga teng. Gauss teoremasini $\psi_E = \frac{q}{\epsilon_a}$ hisobga olib $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_a r}$ ni hosil qilamiz. Kondensatorning sferasimon elektrodleri orasidagi kuchlanish quyidagicha aniqlanadi:

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \frac{q}{4\pi\epsilon_a} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

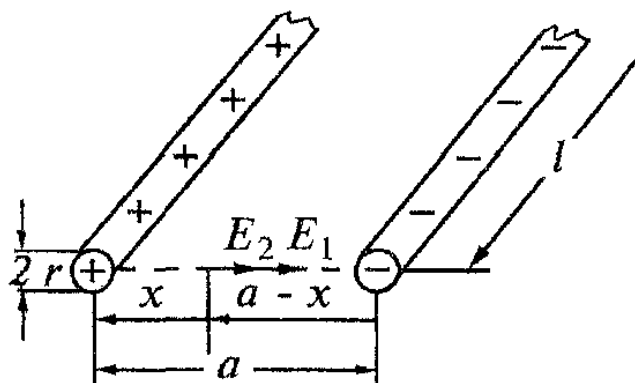
Bu ifodadan kondensator elektr sig‘imini quyidagicha topish mumkin:

$$C = \frac{4\pi\epsilon_a r_1 r_2}{r_2 - r_1}.$$

Xususiyl holda $r_2 = \infty$ bo‘lganda $C = 4\pi\epsilon_a r_1$ ga teng bo‘ladi.

Ikkita o‘tkazgich(sim)li elektr uzatish liniyasining elektr maydoni va elektr sig‘imi (13.12- rasm). Ikkita sim orasidagi elektr maydoni simlardagi zaryadlar hisobidan hosil bo‘ladi.

Birinchi simning elektr maydoni kuchlanganligi vektorining oqimi $\psi_E = \oint \underline{E}_1 d\underline{S} = E_1 2\pi x l$. Gauss teoremasiga ko‘ra



13.12- rasm

$\psi_{E_1} = \frac{q}{\epsilon_0}$. Unga ko‘ra birinchi

sim hosil qilgan maydonning

kuchlanganligi: $E_1 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 l x}$.

Shu nuqtadagi ikkinchi sim hosil qilgan kuchlanganlik:

$$E_1 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 l(a-x)}.$$

Natijaviy kuchlanganlik esa:

$$E_1 = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{a-x} \right).$$

Maydon kuchlanganligi simlarning sirtida maksimal qiymatga teng bo'ladi:

$$E_{\max} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 l} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{a-r} \right).$$

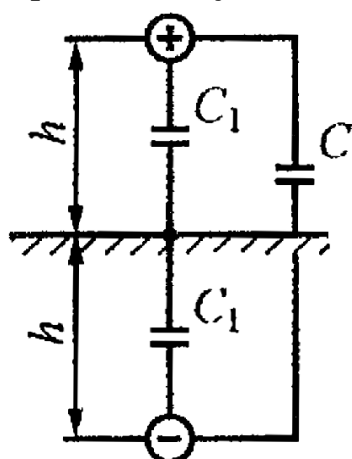
Simlar orasidagi kuchlanish:

$$U = \int_r^{a-r} E dx = \int_r^{a-r} \frac{q}{2\pi\epsilon_0 l} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{a-x} \right) dx = \frac{q}{\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{a-r}{r} \approx \frac{q}{\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{a}{r}.$$

So'ngi ifodadan simlar orasidagi sig'imni topish mumkin:

$$C = \frac{\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{a-r}{r}} \approx \frac{\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{a}{r}}.$$

Bitta simli liniya (sim-yer) ning elektr sig'imi. Bunda elektr sig'imni topish uchun yerdan h balandlikda joylashgan q elektr zaryadli simga



13.13- rasm

yerga nisbatan ko'zguda aks ettirilgan kabi simmetrik ravishda qarama-qarshi ishorali q elektr zaryadi joylashtiriladi (13.13- rasm). Hosil bo'lgan ikkita simli liniyaning modelidan foydalanib elektr sig'imi ifodasini yozamiz:

$$C = \frac{\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{2h}{r}}.$$

Bu elektr sig'imi ikkita C_1 sig'imli kondensatorlar o'zaro ketma-ket ulangan zanjirning umumiy sig'imiga teng bo'ladi. Demak, bitta simli liniyaning elektr sig'imi:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{2h}{r}}.$$

13.5. Elektrostatik maydon energiyasi

Elektrostatik maydon energiyasi umumiy holda quyidagicha yoziladi:

$$W_E = \int_V \frac{\varphi\rho}{2} dV + \oint_S \frac{\varphi\sigma}{2} dS.$$

Oliy matematika kursidan ma'lumki, skalyar va vektor funksiyalar ko'paytmasining divergensiya quyidagiga teng:

$$\operatorname{div}(\varphi \underline{D}) = \varphi \operatorname{div} \underline{D} + \underline{D} \operatorname{grad} \varphi.$$

Bu tenglikdan foydalanib, quyidagini yozishimiz mumkin:

$$\frac{1}{2} \int_V \operatorname{div}(\varphi \underline{D}) dV = \frac{\varphi \operatorname{div} \underline{D}}{2} dV + \int_V \frac{\underline{D} \operatorname{grad} \varphi}{2} dV.$$

$$\operatorname{div} \underline{D} = \rho, \operatorname{grad} \varphi = -\underline{E}, \int_V \operatorname{div}(\varphi \underline{D}) dV = \oint_S \varphi \underline{D} dS.$$

Ushbu tengliklarni inobatga olib quyidagi ifodani yozamiz:

$$\oint_S \frac{\varphi \underline{D}}{2} dS = \int_V \frac{\varphi \rho}{2} dV - \int_V \frac{\underline{E} \underline{D}}{2} dV.$$

O'tkazgich sirtidagi elektr zaryadining zichligi elektr induksiyasiga teng. Agar o'tkazgich sirtidagi nuqta qaralsa, u holda sirtga yo'nalgan musbat normal va $\underline{D}$ vektor o'zaro qarama-qarshi bo'lganda $\underline{D} dS = -D dS = -\sigma dS$ bo'ladi.

Unda:

$$-\oint_S \frac{\varphi \sigma}{2} dS = \int_V \frac{\varphi \rho}{2} dV - \int_V \frac{\underline{E} \underline{D}}{2} dV$$

bo'ladi va elektr maydonining energiyasi:

$$W_E = \int_V \frac{\varphi \rho}{2} dV + \oint_S \frac{\varphi \sigma}{2} dS = \int_V \frac{\underline{E} \underline{D}}{2} dV.$$

Bir jinsli va izotrop muhitda $\underline{D} = \epsilon_a \underline{E}$ va shuning uchun:

$$W_E = \int_V \frac{\epsilon_a E^2}{2} dV. \quad (13.6)$$

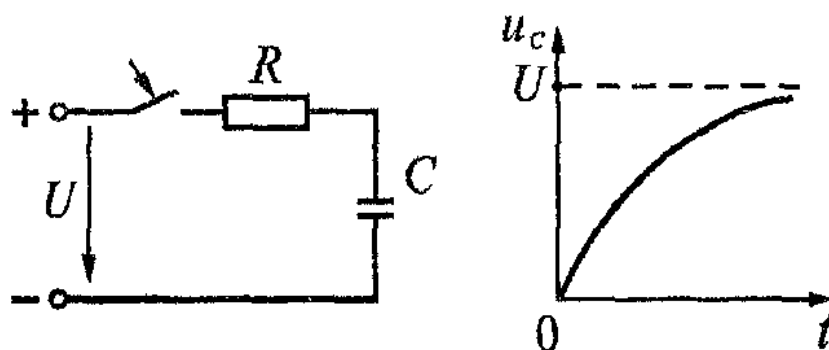
(13.6) formula elektr maydoni energiyasini uning biror sohasi yoki barcha qismi uchun aniqlash imkonini beradi. (13.6) tenglamaning fizik ma'nosi shundaki, elektr maydoni elektr energiyasini tashuvchi bo'lib

xizmat qiladi. Bunda energiya fazoda $\frac{dW_E}{dV} = \frac{\underline{E} \underline{D}}{2} = \frac{\epsilon_a E^2}{2}$ hajmiy zichlik bilan taqsimlanadi.

Xususiyl holida o'zgarmas tok manbayidan zaryadlangan kondensator energiyasini hisoblaymiz (13.14- rasm).

Kirxgofning ikkinchi qonuniga ko'ra $U = iR + u_C$. Bu tenglikni ikkita tomonini idt ga ko'paytirib va $i = C \frac{du_C}{dt}$ ni hisobga olib, quyidagini hosil qilamiz:

$$UC du_C = i^2 R dt + C u_C du_C \quad \text{yoki} \quad dW_M = dW_R + dW_e.$$



13.14- rasm

Manbadan zanjirga uzatilayotgan elektr energiyasi:

$$W_{\mu} = \int_0^U UC du_c = U^2 C = UQ. \quad (13.7)$$

Kondensator elektrodleri orasida to'plangan elektr energiyasi:

$$W_E = \int_0^U C u_c du_c = \frac{CU^2}{2} = \frac{UQ}{2}. \quad (13.8)$$

(13.7) va (13.8) tenglamalarni o'zaro taqqoslash shuni ko'rsatadiki, manba energiyasining yarmi rezistorda issiqlikka aylanadi:

$$W_R = W_{\mu} - W_E = CU^2 - \frac{CU^2}{2} = \frac{CU^2}{2}.$$

Kondensator elektrodleri orasidagi elektr energiyasining hajmiy zichligi:

$$W_E = \frac{W_E}{V} = \frac{\frac{CU^2}{2}}{Sd} = \frac{\frac{\epsilon_a S}{d} \cdot \frac{U^2}{2}}{Sd} = \frac{\epsilon_a E^2}{2} = \frac{ED}{2}, \left[\frac{J}{m^3} \right],$$

bu yerda $C = \frac{\epsilon_a S}{d}$ - kondensator sig'imi, $V = Sd$ - elektrodlar orasidagi muhitning hajmi.

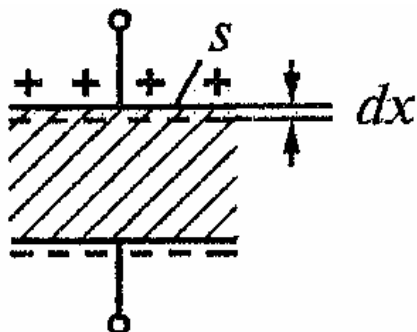
Elektr maydoni kuchlanganligi noldan farqli bo'lgan joyda maydon o'zining energiyasi hisobidan ma'lum ish bajara olishi mumkin.

13.6. Elektrostatik maydonda mexanik kuchlar

Elektr maydonini o'zining energiyasi hisobidan mexanik ish bajara olish qobiliyati Kulon qonuni va maydonning nuqtaviy elektr zaryadiga ko'rsatadigan ta'siri asosida baholanadi. Mexanik kuchni aniqlashda energiyaning saqlanish qonunidan foydalaniladi: elektr energiyasi manbayidan berilayotgan energiya maydon energiyasini va mexanik ishni

o'zgarishiga sarflanadi. Mexanik kuch elektr energiyasini koordinata bo'yicha hosilasiga teng:

$$F = - \left. \frac{dW_e}{dx} \right|_{Q=\text{const}} = \left. \frac{dW_e}{dx} \right|_{U=\text{const}}.$$



13.15- rasm
hajmni o'zgarishi,

Elektr maydonidagi kuchni aniqlash uchun zaryadlangan kondensatorni ko'rib chiqamiz (13.15- rasm).

Kondensator elektrodleri o'zaro dx masofaga siljiganda elektr energiyasining o'zgarishi quyidagiga teng bo'ladi:

$$dW_e = w_e dV,$$

bu yerda $dV = Sdx$ - elektrodler orasidagi

$$w_e = \frac{\epsilon_a E^2}{2} \text{ - elektr energiyasining hajmiy zichligi.}$$

$Fdx = dW_e$ tenglik shartidan mexanik kuch ifodasini hosil qilamiz:

$$F = \frac{\epsilon_a E^2}{2} S, \quad [\text{N}].$$

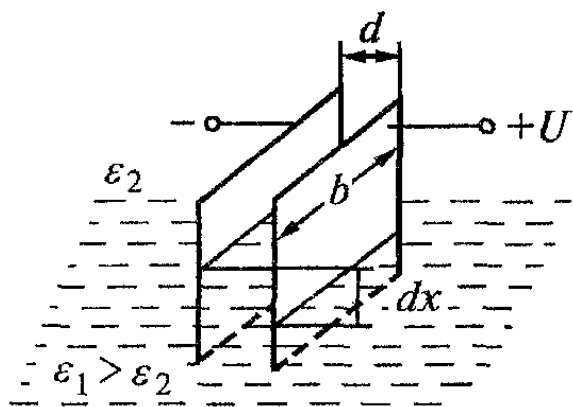
Birlik yuzasidagi kuchning solishtirma qiymati:

$$F_0 = \frac{\epsilon_a E^2}{2}, \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right].$$

Shunday qilib, elektr maydonidagi mexanik kuch elektr energiyasi zichligi oqimining shu oqim o'tadigan yuzaga ko'paytmasiga teng.

Agar ikkita dielektrik elektr maydoni ta'sirida bo'lsa, u holda singdiruvchanligi kattaroq bo'lgan dielektrikni elektr maydoniga tortuvchi kuch paydo bo'ladi. 13.16- rasmda havoli kondensatorning elektrodleri dielektrik singdiruvchanligi yuqori bo'lgan suyuqlikka qisman botirilgan holati keltirilgan. Kondensator qoplamalari orasidagi elektr maydoni tomonidan suyuqlikning tortilishi natijasida uning sathi kondensator tashqarisidagi sathdan yuqoriroq bo'ladi.

Buning natijasida maydon tomonidan kattaligi $dA = Fdx = F_0 S_0 dx = F_0 b dx$ ga bo'lgan ish bajariladi va elektr maydoni energiyasi $dW_e = \frac{1}{2} U^2 dC = \frac{1}{2} U^2 \frac{\epsilon_0 (\epsilon_1 - \epsilon_2) b}{d} dx$ kattalikka o'zgaradi.



13.16- rasm

Oxirgi tenglamalarning o'ng tomonlarini tenglab, suyuq dielektrik sirtiga maydon tomonidan ta'sir etadigan kuchning solishtirma qiymatini topamiz:

$$F_0 = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)E^2}{2} = \frac{(D_1 - D_2)E}{2}, \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right].$$

Amalda bu hodisadan suyuqliklar dielektrik singdiruvchanligini o'lchashda, materiallarni elektr separatsiya qilishda, xususan, qishloq xo'jalik mahsulotlari urug'larini saralashda va boshqa holatlarda keng foydalaniladi.

13.7. Ikkita dielektrik chegarasidagi elektr maydoni

Ikkita dielektrik chegarasidagi elektr maydoni uchun $\oint \underline{E} d\underline{l}$ tenglama o'rinli (13.17- rasm).

Integrallash konturi qalinligi va balandligini cheksiz ingichka deb hisoblab, quyidagini yozishimiz mumkin:

$$E_{1t} dl - E_{2t} dl = 0.$$

Bundan

$$E_{1t} = E_{2t}; E_1 \sin \alpha_1 = E_2 \sin \alpha_2. \quad (13.9)$$

Ikkita dielektrik chegarasida elektr maydonining urinma tashkil etuvchilari o'zaro teng bo'ladi.

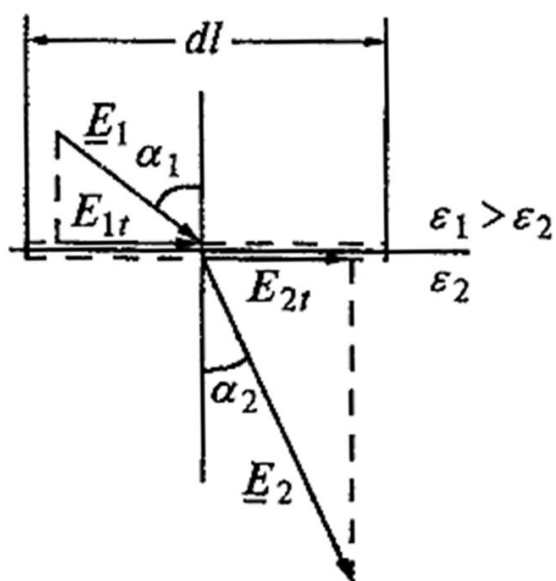
Dielektriklar chegarasidagi maydon induksiyasi vektori oqimini aniqlash uchun quyidagi tenglikdan foydalanamiz (13.18- rasm):

$$\underline{D}_1 d\underline{S}_1 + \underline{D}_2 \underline{S}_2 = 0 \text{ yoki } D_{1n} dS_1 \cos 180^\circ + D_{2n} dS_2 = 0.$$

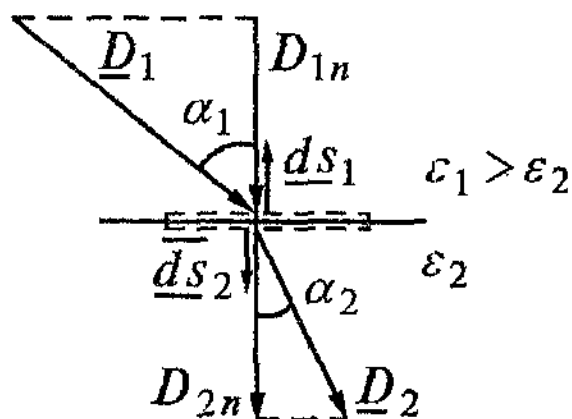
$dS_1 = dS_2$ ekanligini hisobga olib:

$D_{1n} = D_{2n}; \varepsilon_1 E_{1n} = \varepsilon_2 E_{2n}; \varepsilon_1 E_1 \cos \alpha_1 = \varepsilon_2 E_2 \cos \alpha_2$ (13.10) larni yozish mumkin.

Ikkita dielektrikning chegaraviy sirtida erkin elektr zaryadlari bo'lmaganda elektr maydoni induksiyasi vektorlarining perpendikular tashkil etuvchilari o'zaro teng bo'lib, maydon kuchlanganliklari



13.17- rasm



13.18- rasm

vektorlarining normal tashkil etuvchilari ikkala muhit dielektrik singdiruvchanliklariga teskari proporsional bo'ladi.

(13.9) va (13.10) tengliklarni o'zaro bo'lib, elektr maydoni kuchlanganligi kuch chiziqlarining sinish qonunini hosil qilamiz:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}.$$

13.8. Elektrostatik maydonni hisoblash usullari

Elektrostatika masalalari berilishiga ko'ra quyidagi uch guruhga bo'linadi:

1) $\varphi(x, y, z)$ potensialni fazoda taqsimlanishi qonuniyatiga binoan shu potensialni hosil qilgan erkin elektr zaryadlar hajmiy zichligining taqsimlanishi qonuniyatini topish. Bu turdagi masalalar asosan Puasson tenglamasi yordamida yechiladi.

2) $\rho(x, y, z)$ erkin elektr zaryadlari hajmiy zichligi qonuniyati berilganda, shu elektr zaryadlari hosil qiladigan $\varphi(x, y, z)$ potensialning fazodagi o'zgarish qonuniyatini topish. Bu turdagi masalalarda ikkinchi darajali xususiy hosilali differensial tenglamalar yechiladi.

3) fazodagi bir nechta nuqtaning potenciallari va maydonni hosil qiluvchi zaryadlangan jismlar geometrik o'lchamlari berilganda maydonning har bir nuqtasidagi kuchlanganlikni va potensialni topish. Bu turdagi masalalar analitik yoki grafik usul yordamida yechiladi. Sodda hollarda Gauss teoremasining integral shaklidan, murakkab hollarda esa Laplas tenglamasidan foydalaniladi.

Elektrostatika masalalarini grafik usulda yechishning mazmuni shundan iboratki, tadqiq etilayotgan maydonning ba'zi xususiyatlarini hisobga olib, kuchlanish va ekvipotensial kuch chiziqlari o'tkaziladi. Bundan tashqari, modellash usullaridan keng foydalaniladi.

Shuni aytib o'tish lozimki, amalda birinchi va ikkinchi turdagi masalalar kam uchraydi.

Umumiy holda, elektrostatik maydon uni tavsiflovchi tenglamalarni integrallash orqali hisoblanadi. Ammo, ko'pchilik hollarda, maydonni hisoblashda xususiy usullardan qo'llanilish masalalar yechilishini ancha osonlashtiradi.

Quyida ana shunday usullardan ayrimlari bilan qisqacha tanishamiz:

1. *Ustma-ustlash usuli*. Bu usulga ko'ra, agar elektr zaryadining fazoda taqsimlanishi berilgan bo'lsa, u holda bu elektr zaryadini cheksiz kichik dQ nuqtaviy elektr zaryadlariga bo'laklab, maydonning potentsiali va kuchlanganliklarini quyidagi formulalar yordamida aniqlash mumkin:

$$d\varphi = \frac{dQ}{4\pi\epsilon_a R}, \quad d\underline{E} = \frac{dQ}{4\pi\epsilon_a R^2} \underline{l}_R.$$

Topilgan $d\varphi$ potentsiallarni ustma-ust qo'shib, maydonning natijaviy potentsialini aniqlaymiz:

$$\varphi = \int d\varphi = \int \frac{dQ}{4\pi\epsilon_a R}.$$

Elektr maydoni kuchlanganligi $\underline{E} = \int d\underline{E}$ yoki $\underline{E} = -\text{grad}\varphi$ formulalar yordamida aniqlanishi mumkin.

2. *Aks tasvir usuli*. Agar elektr zaryadi ikkita bir jinsli va parametrlari turlicha bo'lgan muhit chegarasiga yaqin joylashgan bo'lsa, u holda elektr maydoni vektorlarini aks tasvir deb ataluvchi sun'iy usul yordamida aniqlash mumkin. Izlanayotgan yechim maydonning asosiy tenglamasini va chegaraviy shartlarni qanoatlantirishi lozim. Bu usulga ko'ra ixtiyoriy ekvipotensial sirtni qalinligi cheksiz kichik va potentsiali berilgan sirt potentsialiga teng bo'lgan metall sirt bilan almashtirish mumkin.

3. *Maydon tenglamalarini integrallash usuli*. Ustma-ustlash usuli va Gauss teoremasining integral shakli yordamida faqat sodda konfiguratsiyali maydonlarni hisoblash mumkin. Umumiy holda esa, maydonni hisoblash Puasson va Laplas tenglamalarini integrallash bilan olib boriladi.

Umumiy holda Puasson tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$\text{div}\underline{E} = \text{divgrad}\varphi = \nabla^2\varphi = -\frac{\rho}{\epsilon_a}, \quad (13.11)$$

bu yerda $\operatorname{divgrad}\varphi = \nabla^2$ - gradiyentning divergensiya *laplasian* deb ataladi.

Maydonning elektr zaryadi joylashmagan nuqtalari uchun (13.11) tenglama quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\nabla^2\varphi = 0. \quad (13.12)$$

(13.12) tenglama *Laplas tenglamasi* deb ataladi.

(13.11) va (13.12) tenglamalarning yechimi quyidagi integral ko'rinishda yozilishi mumkin:

$$\varphi = \int_V \frac{\rho dV}{4\pi\epsilon_a R}.$$

Potensial tushunchasini kiritilishi elektrostatik maydonni hisoblashni osonlashtiradi. Chunki, skalyar kattalik bo'lgan potensialni topish kuchlanganlik vektorining uchta o'qdagi proyeksiyalarini topishga nisbatan osonroq. φ ma'lum bo'lsa, kuchlanganlikni $E = -\operatorname{grad}\varphi$ ifoda orqali topish mumkin bo'ladi.

Nazorat savollari

1. Elektromagnit maydonga ta'rif bering. 2. Elektr va magnit maydonlariga ta'rif bering. 3. Elektromagnit maydonning o'ziga xos xususiyatlarini aytib bering. 4. Elektrostatik maydonni tavsiflovchi asosiy kattaliklar va munosabatlarni izohlab bering. 5. Ekvipotensial sirt nima? 6. Elektrostatik maydon potentsiali va uning gradiyenti nima? 7. Gauss teoremasining integral va differensial shakllaridagi tenglamalarini yozing. 8. Elektrostatik induksiya hodisasi nima? 9. Puasson va Laplas tenglamalari qanday masalalarni yechishda qo'llaniladi? 10. Zaryadlangan ikkita o'tkazgich(sim)li liniyaning elektr maydoni va sig'imi qanday hisoblanadi?

14- BOB. O‘ZGARMAS TOKNING ELEKTR MAYDONI

14.1. O‘tkazuvchanlik toki va uning zichligi

Elektr o‘tkazuvchi muhitda elektr maydoni ta’siri ostida erkin zaryadlarning harakati vujudga keladi. O‘tkazgichlar(metallar)da o‘tkazuvchanlik tokini elektronlarning harakati vujudga keltiradi. Bu tok

$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}$, uning zichligi esa $\delta = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta i}{\Delta S} = \frac{di}{dS}$ ifodalar bilan aniqlanadi.

Tok skalyar, uning zichligi esa vektor kattalikdir. Tok zichligining yo‘nalishi musbat elektr zaryadlari harakatiga mos yoki manfiy elektr zaryadlari harakatiga qarama-qarshi tanlanadi.

Tok va uning zichligi o‘zaro quyidagicha bog‘langan:

$$i = \int_S \delta dS.$$

O‘zgarmas tokda o‘tkazgichdagi elektr zaryadlarining taqsimlanishi vaqt bo‘yicha o‘zgarmaydi. O‘zgarmas tokning elektr maydoni qo‘zg‘almas elektr zaryadining maydoniga o‘xshash bo‘ladi.

14.2. Om, Kirxgof va Joul-Lens qonunlarining differensial shakli

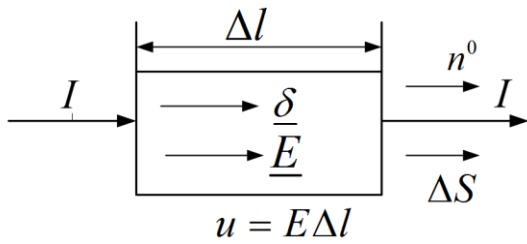
Uzunligi Δl va ko‘ndalang kesimining yuzasi ΔS bo‘lgan o‘tkazgich $U = \int_1^2 \underline{E} d\underline{l} = E \Delta l$ kuchlanish ta’siri ostida, deylik (14.1- rasm).

Om qonunining $U = IR$ integral shakliga ko‘ra, $I = \delta \Delta S$, $R = \frac{\Delta l}{\gamma \Delta S}$ larni inobatga olib va yuqoridagi ikkita tenglama o‘ng tomonlarini o‘zaro tenglab, tok zichligi ifodasini topamiz, ya’ni:

$$\underline{\delta} = \gamma \underline{E}, \left[\frac{A}{m^2} \right] \quad (14.1)$$

bu yerda γ - o‘tkazgichning solishtirma elektr o‘tkazuvchanligi, $[(Om \cdot m)^{-1}]$.

(14.1) tenglama *Om qonunining differensial shakli* deb ataladi. Bu ifoga o‘tkazuvchi muhitning ma’lum nuqtasidagi tok zichligi va shu nuqdagi maydon kuchlanganligi orasidagi bog‘lanishni bildiradi.



14.1- rasm

Agar elektr o'tkazgich muhitda tashqi EYK manbai bo'lsa, u holda natijaviy maydon kuchlanganligi $\underline{E} + \underline{E}_r$ bo'ladi. Buni e'tiborga olib (14.1) tenglamani quyidagicha yozamiz:

$$\underline{\delta} = \gamma(\underline{E} + \underline{E}_r). \quad (14.2)$$

(14.2) tenglama *umumlashgan Om qonunining differensial shakli deb ham ataladi.*

Shuni ta'kidlab o'tish lozimki, tashqi elektr maydoni deganda tabiati elektrostatik bo'lmagan elektr maydoni tushuniladi. Bunday maydonlarga kimyoviy, elektrokimyoviy va elektromagnit jarayonlar ta'sirida paydo bo'ladigan maydonlar misol bo'la oladi.

Agar (14.2) ifodadan yopiq kontur bo'yicha integral olinsa, u holda Kirxgof ikkinchi qonunining tenglamasi hosil bo'ladi. Shuning uchun (14.2) ifoda *Kirxgof ikkinchi qonunining differensial shakli deb ham ataladi.*

Agar o'zgaras tok o'tayotgan muhitdan biror bir hajmni ajratib olsak, u holda shu hajmga kiruvchi tok undan chiquvchi tokka teng bo'lishi lozim, aks holda hajmda elektr zaryadi to'planishi kuzatilar edi. Lekin tajriba elektr zaryadi to'planishini tasdiqlamaydi. Bu holat matematik jihatdan quyidagicha ifodalanadi:

$$\oint \underline{\delta} d\underline{S} = 0.$$

Bu tenglamaning ikkala tomonini hajm V ga bo'lib, uning nolga intilgandagi limiti olinsa, quyidagi ifoda hosil bo'ladi:

$$\lim_{V \rightarrow 0} \frac{\oint \underline{\delta} d\underline{S}}{V} = 0 \quad \text{yoki} \quad \text{div} \underline{\delta} = 0. \quad (14.3)$$

(14.3) ifoda *Kirxgof birinchi qonunining differensial shakli deb ataladi.*

Tok zichligi divergensiyasining nolga tengligi tok zichligi chiziqlarining uzluksizligini bildiradi.

O'tkazgichdagi quvvat isrofi $P = I^2 R$ ifoda bilan aniqlanadi. O'tkazgich muhitning ΔV hajmdagi ΔP quvvat isrofini $I = \delta \Delta S$, $R = \frac{\Delta l}{\gamma \Delta S}$ va $V = \Delta l \Delta S$ larni e'tiborga olib quyidagicha aniqlash mumkin (14.1-rasm):

$$\Delta P = \frac{I^2 R}{\Delta V} = \gamma E^2, \left[\frac{J}{m^3} \right]. \quad (14.4)$$

(14.4) tenglama *Joul-Lens qonunining differensial shakli* deb ataladi.

14.3. O'tkazuvchi muhitdagi elektr maydoni uchun Laplas tenglamasi

Elektrostatik maydon kabi o'tkazuvchi muhit elektr maydoni uchun ham $\underline{E} = -\text{grad}\varphi$ tenglik o'rinli bo'ladi. Vaqt bo'yicha o'zgarmaydigan elektr maydoni uchun $\text{div}\underline{\delta} = \text{div}\gamma\underline{E} = 0$ tenglamani yozish mumkin. Agar muhitning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi γ uning barcha nuqtalarida o'zgarmas, ya'ni muhit *bir jinsli va izotrop* bo'lsa, u holda γ ni yuqoridagi tenglamadagi divergensiya belgisidan tashqariga chiqarish mumkin bo'ladi. Shuning uchun $\text{div}\underline{E} = 0$ deb yozish mumkin. So'nggi tenglamani quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$\text{div}(-\text{grad}\varphi) = 0 \text{ yoki } \nabla^2\varphi = 0. \quad (14.5)$$

(14.5) ifoda *bir jinsli o'tkazuvchi muhitning elektr maydoni uchun Laplas tenglamasi* deb ataladi.

Shunday qilib, o'tkazuvchi muhitdagi o'zgarmas tokning elektr maydoni potensial maydondir. Bunday maydonning manba joylashmagan qismi uchun $\oint \underline{E} d\underline{l} = 0$ shart bajariladi.

14.4. Tokni bir o'tkazuvchi muhitdan boshqa o'tkazuvchi muhitga o'tishi

O'tkazuvchanliklari turlicha bo'lgan ikkita muhit chegarasidagi cheksiz kichik konturni ko'rib chiqamiz (14.2- rasm).

Elektr maydoni kuchlanganligi $\oint \underline{E} d\underline{l} = 0$. Ko'rib chiqilayotgan kontur uchun:

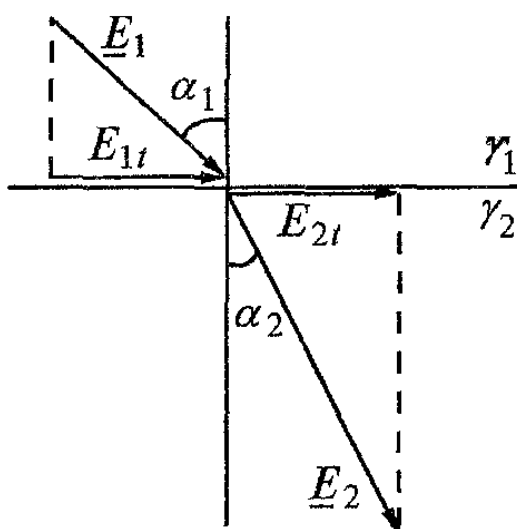
$$E_{1t} dl - E_{2t} dl = 0; E_{1t} = E_{2t}; E_1 \sin \alpha_1 = E_2 \sin \alpha_2. \quad (14.6)$$

Ikkita muhit chegarasidagi cheksiz kichik hajmni ko'rib chiqamiz (14.3- rasm). Tok zichligi:

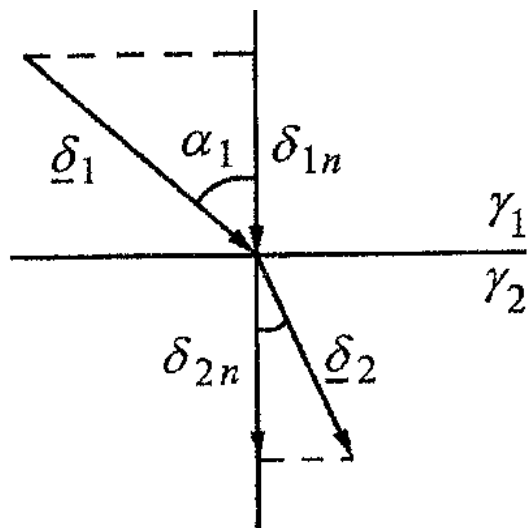
$$\oint \underline{\delta} d\underline{l} = 0.$$

Ko'rilayotgan hajm uchun:

$$-\delta_{1n} \Delta S + \delta_{2n} \Delta S = 0, \delta_{1n} = \delta_{2n} \text{ bo'lganda} \\ \gamma_1 E_1 \cos \alpha_1 = \gamma_2 E_2 \cos \alpha_2. \quad (14.7)$$



14.2- rasm



14.3- rasm

(14.6) ni (14.7) ga bo'lib, quyidagi munosabatni hosil qilamiz:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}.$$

$\gamma_1 \gg \gamma_2$ bo'lganda $\alpha_2 \approx 0$ bo'ladi. Masalan, metall yerlatkichdan yerga tok o'tganda yerlatkich sirtining istalgan nuqtasidagi tok zichligi chiziqlari yerlatkich sirtiga perpendikular yo'nalgan bo'ladi.

14.5. O'tkazuvchi muhitdagi elektr maydoni va elektrostatik maydon o'rtasidagi o'xshashlik

Elektrostatik maydon va o'zgarmas tok elektr maydonining tabiati har xil: elektrostatik maydon qo'zg'almas elektr zaryadlar atrofida paydo bo'lsa, o'zgarmas tokning elektr maydoni tashqi manba ta'sirida erkin elektr zaryadlarining tartibli harakati natijasida paydo bo'ladi. Shuning bilan birga bu ikki maydon o'rtasida quyidagi shaklan (formal) o'xshashlik (analogiya) mavjud.

№	Elektrostatik maydon	O'tkazuvchi muhitdagi elektr maydoni
1	$\nabla^2 \varphi = 0$	$\nabla^2 \varphi = 0$
2	E	E
3	$\underline{D} = \varepsilon_a \underline{E}$	$\underline{\delta} = \gamma \underline{E}$
4	$\psi_D = \int_S \underline{D} d\underline{S}$	$I = \int_S \underline{\delta} d\underline{S}$
5	$E_{1t} = E_{2t}$	$E_{1t} = E_{2t}$
6	$D_{1n} = D_{2n}$	$\delta_{1n} = \delta_{2n}$

Yuqorida keltirilgan o'xshashlikni quyidagicha izohlash mumkin:

1. Ikkala maydon ham Laplas tenglamasiga bo'yso'nadi.
2. Ikkala maydon ham kuchlanganlik vektori bilan tavsiflanadi.
3. Elektrostatik maydon induksiyasi vektori $\underline{D}$ ni o'zgarmas tokning elektr maydonidagi tok zichligi vektori $\underline{\delta}$ bilan taqqoslash mumkin.
4. Ikkita dielektrik orasidagi chegara sirtidagi chegaraviy shartlar: $E_{1t} = E_{2t}$ va $D_{1n} = D_{2n}$.
5. Turli elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan ikkita muhit oraliq sirtidagi chegaraviy shartlar: $E_{1t} = E_{2t}$ va $\delta_{1n} = \delta_{2n}$.

Shuni aytib o'tish joizki, agar ikkala maydon yagona $\nabla^2 \varphi = 0$ tenglama bilan ifodalansa va ulardagi o'xshash kattaliklar chegaraviy shartlarga bo'yso'nsa hamda chegaraviy sirtlar bir xil bo'lsa, u holda ikkala maydondagi kuch va ekvipotensial chiziqlar, ya'ni maydon kartinasi (surati) bir xil bo'ladi.

Bu shakliy o'xshashlikdan amaliyotda keng foydalaniladi. Masalan, biror bir elektrostatik maydon o'rganilgan bo'lsa, bu maydondagi barcha munosabatlar unga geometrik o'xshash bo'lgan o'tkazuvchi muhitdagi elektr maydoniga ham to'laligicha taalluqli bo'ladi.

Yuqorida keltirilgan o'xshashlikka asoslanib, o'tkazuvchi muhitdagi o'tkazuvchanlik va dielektrik muhitdagi sig'imning o'zaro munosabatlarini ko'rib chiqamiz.

$$\text{Elektr o'tkazuvchanlik: } G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U} = \frac{\int \underline{\delta} d\underline{s}}{\int_1^2 \underline{E} d\underline{l}} = \frac{\gamma \int \underline{E} d\underline{s}}{\int_1^2 \underline{E} d\underline{l}}.$$

$$\text{Elektr sig'im: } C = \frac{q}{U} = \frac{\varepsilon_a \int \underline{E} d\underline{s}}{\int_1^2 \underline{E} d\underline{l}}.$$

O'tkazuvchanlikni sig'imga bo'lib, quyidagi munosabatni hosil qilamiz:

$$\frac{G}{C} = \frac{\gamma}{\varepsilon_a}.$$

Yuqoridagi munosabatdan ko'rinib turibdiki, elektr sig'im formulasini bilgan holda elektr o'tkazuvchanlik formulasini yozish mumkin. Buning uchun elektr sig'im formulasidagi ε_a o'rniga γ ni qo'yish yetarli. Masalan:

yassi kondensator uchun	$C = \frac{\varepsilon_a S}{d}, [\text{F}];$	$G = \frac{\gamma S}{d}, [\text{S}];$
silindrik kondensator uchun	$C = \frac{2\pi\varepsilon_a l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \text{F};$	$G = \frac{2\pi\gamma l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \text{Sm};$
sferik kondensator uchun	$C = \frac{4\pi\varepsilon_a r_1 r_2}{r_2 - r_1}, \text{F};$	$G = \frac{4\pi\gamma r_1 r_2}{r_2 - r_1}, \text{Sm};$
sharsimon kondensator uchun	$C = 4\pi\varepsilon_a r, \text{F};$	$G = 4\pi\gamma r, \text{Sm};$
ikkita simli liniya uchun	$C = \frac{\pi\varepsilon_a l}{\ln \frac{a-r}{r}};$	$G = \frac{\pi\gamma l}{\ln \frac{a-r}{r}}.$

14.6. O'tkazuvchi muhitdagi elektr maydonini hisoblashga doir masalalar

1- masala. Ichki simining diametri 10 mm va tashqi simining diametri 20 mm bo'lgan koaksial kabel izolatsiyasining solishtirma elektr o'tkazuvchanligi $\gamma = 10^{-8} \frac{\text{S}}{\text{m}}$. Kabelning 1 km uzunligiga to'g'ri keladigan izolatsiya qarshiligini aniqlang.

Yechish. Koaksial kabel silindrsimon kondensatorga o'xshash. Uning sig'imi $C = \frac{2\pi\varepsilon_a l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$ formula yordamida hisoblanadi. Yuqorida ko'rib chiqilgan o'xshashlikdan foydalanib, 1 km uzunlikdagi kabel izolatsiyasining elektr o'tkazuvchanligini topamiz:

$$G = \frac{2\pi\gamma l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi \cdot 10^{-8} \cdot 10^3}{\ln \frac{20}{10}} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ Sm}.$$

Izolatsiya qarshiligi:

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{9 \cdot 10^{-5}} \approx 1,1 \cdot 10^4 \text{ Om}.$$

2- masala. Diametri 10 mm, uzunligi 1 m va o'zaro 20 sm masofada joylashgan ikkita parallel sim solishtirma elektr o'tkazuvchanligi $\gamma = 0,03 \frac{\text{S}}{\text{m}}$ bo'lgan suvga botirilgan. Simlar kuchlanishi 110 V bo'lgan

manbaga ulanganda ulardan o'tayotgan elektr toki va iste'mol qilinadigan quvvatni toping.

Yechish. Ikkita simli liniyadagi singari simlar orasidagi o'tkazuvchanlik:

$$G = \frac{2\pi\gamma l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{3,14 \cdot 0,03 \cdot 10^{-2} \cdot 10^2}{\ln \frac{20-1}{1}} = 0,025 \text{ Sm.}$$

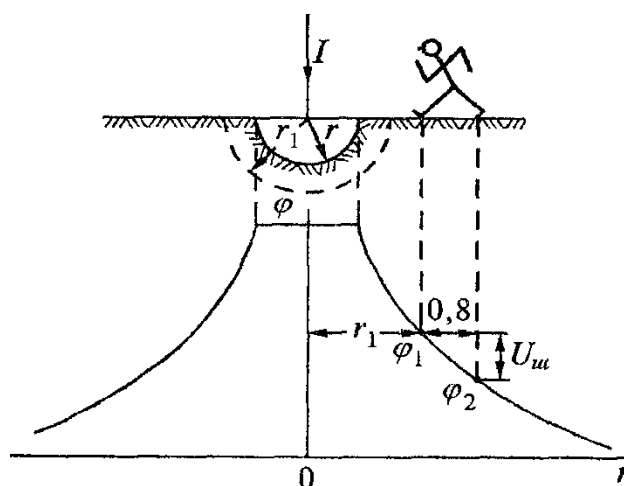
Zanjirdagi tok:

$$I = UG = 110 \cdot 0,025 = 2,8 \text{ A}$$

Quvvat esa:

$$P = UI = 110 \cdot 2,8 = 308 \text{ Vt.}$$

3- masala. Radiusi r bo'lgan yarim shar shaklidagi yerlatkich elektr maydonini, ya'ni yoyilish qarshiligi va kuchlanishini yer sirtidagi patensialning taqsimlanishi hamda qadam kuchlanishini aniqlang hisoblang (14.4- rasm).



13.4- rasm

Yechish. Yarim shar elektr sig'imi $C = 2\pi\epsilon_d r$. Yuqorida qayd etilgan o'xshashlikka ko'ra yerlatkich elektr o'tkazuvchanligi $G = 2\pi\gamma r$. Yoyilish qarshiligi esa: $R_{yo} = \frac{1}{G} = \frac{1}{2\pi\gamma r}$.

Yerlatkichdan yerga tok yoyilish kuchlanishi:

$$U_{yo} = IR_{yo} = \frac{I}{2\pi\gamma r}.$$

Yerlatkichdan aylana bo'ylab r_1 masofada joylashgan nuqtalardagi tok zichligi:

$$\delta = \frac{I}{2\pi r_1^2}.$$

Bu nuqtalardagi maydon kuchlanganligi: $E = \frac{\delta}{\gamma} = \frac{I}{2\pi\gamma r_1^2}.$

Yerlatkich bilan nuqtalar orasidagi kuchlanish:

$$U = \varphi_{r_1} - \varphi_r = \int_r^{r_1} E dr = \frac{I}{2\pi\gamma} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right).$$

Inson qadami (0,8 m)ga mos keluvchi kuchlanish:

$$U_q = \int_r^{r_1+0,8} E dr = \frac{I}{2\pi\gamma} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r+0,8} \right).$$

Yerlatkich qoqilgan yer atrofidagi potensialni taqsimlanishi:

$$\varphi = \frac{I}{2\pi\gamma r_1} = U_{yo} \frac{r}{r_1}.$$

Nazorat savollari

1. O'zgarmas tokning elektr maydonini tavsiflovchi asosiy kattaliklar va munosabatlarni bayon eting. 2. Om, Joul-Lens va Kirxgof qonunlarining differensial shakllarini yozing va ular qanday masalalarni yechishda qo'llanilishini ayting. 3. Elektrostatik maydon va o'zgarmas tokning elektr maydoni o'rtasidagi qanday shaklan o'xshashlik(analogiya) mavjud va bu o'xshashlikdan qanday masalalarni yechishda qo'llaniladi?

15- BOB. O'ZGARMAS TOKNING MAGNIT MAYDONI

15.1. Magnit maydonini tavsiflovchi asosiy kattalik va munosabatlar

O'zgarmas tokning magnit maydoni elektromagnit maydon ikkita tomonining biri bo'lib, vaqt bo'yicha o'zgarmaydi va harakatlanayotgan zaryadlangan zarrachaga, uning elektr zaryadi miqdori hamda harakat tezligiga proporsional bo'lgan kuch bilan ta'sir ko'rsatadi. Bu maydon kuzatuvchiga nisbatan qo'zg'almas bo'lgan o'tkazgichdan vaqt bo'yicha o'zgarmaydigan tok o'tganda hosil bo'ladi.

O'tkazgichdan o'zgarmas tok o'tganda unda elektromagnit maydonning ikkinchi tashkil etuvchisi bo'lgan elektr maydoni ham hosil bo'lsa-da, u ham vaqt bo'yicha o'zgarmaydi va shuning uchun ham magnit maydoniga ta'sir ko'rsatmaydi. Shu boisdan magnit maydonini elektr maydonidan ajratilgan holda o'rganish mumkin.

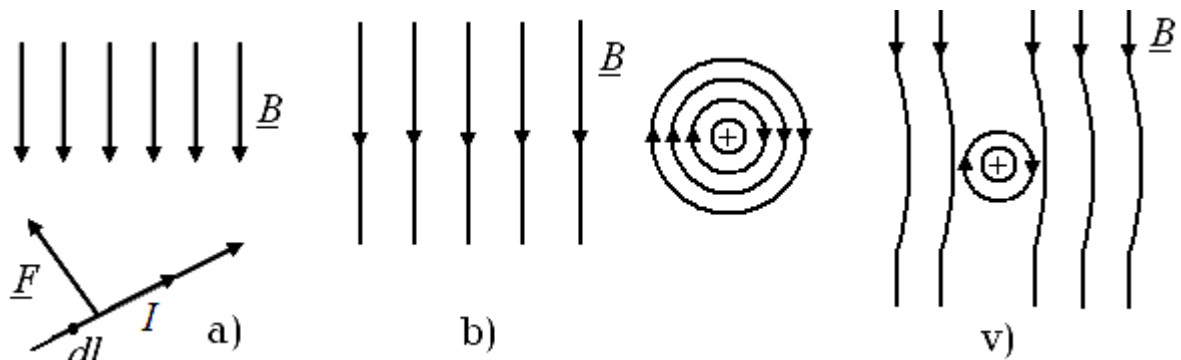
Fizika kursidan bizga ma'lumki, tokli o'tkazgich atrofida magnit maydoni hosil bo'ladi. Maydon kuch chiziqlarining yo'nalishi *o'ngga buraluvchi parma qoidasi* bilan aniqlanadi: *agar parmaning uchi tok bilan bir xil yo'naltirilsa, u holda uni buralishining yo'nalishi magnit maydon kuch chiziqlari yo'nalishini ko'rsatadi.* Binobarin, kuch chiziqlar markazi o'tkazgichdan o'tadigan aylana ko'rinishda bo'ladi.

Tok o'tadigan g'altak uning ichi va tashqarisi bo'ylab birlashadigan berk kontur kuch chiziqli magnit maydonini hosil qiladi. Kuch chiziqlarining yo'nalishi o'ngga buraluvchi parma qoidasi yoki o'ng qo'l qoidasi yordamida quyidagicha aniqlanadi: *agar tok yo'nalishiga moslashtirib g'altakning tashqarisidan o'ng qo'l panjalari bilan xayolan ushlansa, u holda 90^0 ga burilgan bosh barmoq g'altak ichidagi kuch chiziqlar yo'nalishini ko'rsatadi.*

Magnit maydoni induksiya $\underline{B}$, magnitlanganlik $\underline{J}$ va kuchlanganlik $\underline{H}$ kabi kattaliklar bilan tavsiflanadi. Bu kattaliklarni ma'lum tartibda ko'rib chiqamiz. Magnit maydonining asosiy xossalaridan biri – shu maydonga kiritilgan tok o'tayotgan o'tkazgichga uning kuch bilan ta'sir etishidir. Tajriba shuni ko'rsatadiki, $d\mathbf{l}$ uzunlikdagi o'tkazgichdan I tok o'tsa, magnit maydoni unga quyidagi kuch bilan ta'sir qiladi:

$$\underline{F} = I[d\mathbf{l} \times \underline{B}].$$

Bu kuch shu nuqtadagi induksiya va tok elementi $I d\mathbf{l}$ ga ham perpendikulardir (15.1- rasm, a).



15.1- rasm

Agar magnit maydoni induksiyasi $\underline{B}$ va tok o'tayotgan element $d\vec{l}$ o'zaro parallel bo'lsa, unda tok elementiga magnit maydoni ta'sir etmaydi. $\underline{B}$ va $d\vec{l}$ o'zaro perpendikular bo'lganda, tok elementiga ta'sir etayotgan kuch maksimal bo'ladi.

Yuqoridagi tenglamadan ma'lumki, induksiya – bu magnit maydonining kuch xarakteristikasidir. Induksiyaning SI sistemasidagi birligi - Tesla ($1\text{ Tl} = 1\text{ V} \cdot \text{s/m}^2$).

15.1- rasm, b da magnit maydonining unga tokli o'tkazgich kiritilmasdan avvalgi tasviri, 15.1- rasm, v da esa magnit maydoniga tokli o'tkazgich kiritilgandagi tasviri keltirilgan. 15.1- rasm, v da o'tkazgichning chap tomonidagi natijaviy magnit maydoni siyraklashgan, o'ng tomonida esa – zichlashgan. Kuch chiziqlari to'g'rilanishga harakat qilib, o'tkazgichni o'ngdan chapga siljitishga harakat qiladi. O'tkazgichni siljitish yo'nalishi *chap qo'l qoidasi* yordamida quyidagicha aniqlanadi: *agar chap qo'lning kaftiga magnit maydoni kuch chiziqlari kirs va panjalar tok yo'nalishi bo'yicha to'g'rilansa, u holda 90° ga ochilgan bosh barmoq magnit maydoni tomonidan tokli o'tkazgichga ta'sir etayotgan kuch yo'nalishini ko'rsatadi.*

Magnitlanganlik deb, moddaning magnit holatini xarakterlaydigan hajm elementi magnit momentining shu hajm elementi nolga intilayotgan nisbatining chegaraviy qiymatiga teng bo'lgan vektor kattalikka aytiladi.

Magnit maydoni induksiyasi $\underline{B}$, magnitlanganligi $\underline{J}$ va magnit kuchlanganligi $\underline{H}$ o'zaro quyidagicha bog'langan:

$$\underline{B} = \mu_0(\underline{H} + \underline{J}) = \mu_0\mu\underline{H} = \mu_a\underline{H},$$

bunda $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}^2}$ - magnit doimiysi; μ_a, μ - mos ravishda muhitning absolut va nisbiy magnit singdiruvchanliklar.

Elektr tokining magnit maydonini hosil qilish xossasi magnit yurituvchi kuch (MYK) deyiladi.

Tokli o'tkazgich uchun $F = I$, tokli g'altak uchun esa $F = wI$. MYKning o'lchov birligi, tok kabi $[A]$.

Magnit maydonining kuchlanganligi deb, magnit maydoni induksiyasini magnit doimiysiga nisbati va magnitlanish geometrik ayirmasiga teng bo'lgan vektor kattalik, ya'ni: $\underline{H} = \frac{\underline{B}}{\mu_0} - \underline{J}$ yoki magnit kuchlanganlik - bu kuch chizig'ining birlik uzunligiga to'g'ri keladigan solishtirma MYK dir:

$$\underline{H} = \frac{\underline{F}}{l}.$$

Kuchlanganlikning o'lchov birligi $[H] = [F/l] = [A/m]$.

Magnit kuchlanishi deb, elektr toki zichligi nolga teng bo'lgan bir jinsli sohaning ikki nuqtasidan o'tuvchi yo'l qismidagi magnit maydoni kuchlanganligining chiziqli integraliga teng bo'lgan skalyar kattalikka aytiladi. Bu ta'rifni tenglamalar orqali ifodalaymiz.

Magnit maydoni kuch chiziqlarining bir qismi oralig'idagi magnit kuchlanishi:

$$U_{\mu} = Hl.$$

Magnit maydonidagi ixtiyoriy yo'l uchun:

$$U_{\mu ab} = \int_a^b \underline{H} d\underline{l}.$$

O'lchov birligi: $[U_{\mu}] = [Hl] = [\frac{A}{m} \cdot m] = [A]$.

B va H orasidagi bog'lanish:

$$B = \mu_0 \mu H = \mu_a H.$$

Magnit oqimi magnit induksiyasi oqimiga teng bo'lgan skalyar kattalik.

Uning o'lchov birligi:

$$[\Phi] = [B \cdot s] = [\frac{V \cdot s}{m^2} \cdot m^2] = [V \cdot s] = [Vb].$$

15.2. To'la tok qonuni va uni magnit maydonini hisoblashda qo'llanishi

Magnit maydonining asosiy xossasini tavsiflovchi qonun *to'la tok qonunidir*. Bu qonun tok bilan uning atrofidagi magnit maydoni

kuchlanganligi orasidagi bog‘lanishni ifodalaydi va quyidagicha ta’riflanadi: «Magnit maydoni kuchlanganligi vektori sirkulatsiyasi integrallanayotgan berk konturni kesib o‘tuvchi toklarning algebraik yig‘indisiga (to‘la tokka) teng», ya’ni

$$\oint_l \underline{H} d\underline{l} = \sum I = I_T. \quad (15.1)$$

(15.1) tenglama vaqt bo‘yicha o‘zgarmas magnit maydoni uchun to‘la tok qonunining integral shaklidir. Tokning musbat yo‘nalishi konturni aylanib chiqish yo‘nalishi bilan o‘ng parma qoidasi bilan bog‘langan. l kontur bilan chegaralangan S yuzali sirtidan o‘tayotgan tok quyidagicha aniqlanadi:

$$\oint_s \underline{\delta} d\underline{s} = I_T.$$

Oliy matematikadan ma’lumki, Stoks formulasiga ko‘ra chiziqli integralni sirt integraliga o‘zgartirish mumkin va aksincha. Shundan foydalanib quyidagini yozishimiz mumkin:

$$\oint_l \underline{H} d\underline{l} = \int_s \text{rot} \underline{H} d\underline{s} = \int_s \underline{\delta}_T d\underline{s}.$$

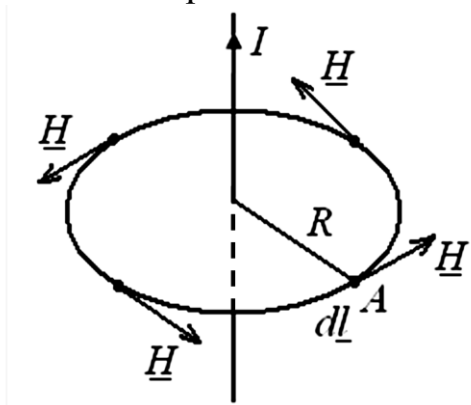
$$\text{Bundan} \quad \text{rot} \underline{H} = \underline{\delta}_T. \quad (15.2)$$

(15.2) tenglama vaqt bo‘yicha o‘zgarmas magnit maydoni uchun to‘la tok qonunining differensial shakli yoki Maksvell birinchi tenglamasi deb ataladi hamda magnit maydonini uyurmaviy maydon ekanligini bildiradi. Bunday maydonda berk kontur bo‘ylab maydon bajargan ish har doim ham nolga teng emas.

$\text{rot} \underline{H} = \underline{\delta}_T$ va $\text{div}(\mu_a \underline{H}) = 0$ tenglamalar yordamida magnit maydonini hisoblashimiz mumkin. Maydonning tok joylashmagan qismi uchun $\mu_a = \text{const}$, $\underline{\delta} = 0$, $\text{rot} \underline{H} = 0$, $\text{div} \underline{H} = 0$. Bu tenglamalar elektrostatik maydonning elektr zaryadi joylashmagan qismi uchun yozilgan tenglamalarga o‘xshaydi. Shuning uchun ham magnit maydonining tok joylashmagan qismini potensial maydon deb qarab, uni φ_M potensial funksiya bilan tavsiflash mumkin. Bu maydon uchun $\text{grad} \varphi_M = -\underline{H}$.

$\mu_a = \text{const}$ holat uchun $\text{div} \underline{H} = 0$. Shuning uchun $\text{div} \text{grad} \varphi_M = \nabla^2 \varphi_M = 0$. Bu tenglama shuni ko‘rsatadiki, skalyar magnit potensial φ_M Laplas tenglamalarini qanoatlantiradi va magnit maydonini hisoblashda elektrostatik maydonni hisoblash usullarini qo‘llash mumkinligini bildiradi. Ammo shu bilan birga esda tutish lozimki, Laplas tenglamasi maydonning tok o‘tmayotgan qismi uchungina o‘rinli.

Quyida to'la tok qonunini turli shaklli magnit maydonlarini hisoblashda qo'llanilishini ko'rib chiqamiz.



15.1- rasm

1. Yagona to'g'ri o'tkazgichdan o'tuvchi tok maydonining A nuqtasidagi kuchlanganlikni aniqlash kerak bo'lsin (14.1- rasm).

A nuqtadan o'tkazgich o'qiga perpendikular bo'lgan R radiusli aylana o'tkazamiz.

Maydon simmetrik bo'lganligi uchun aylananing barcha nuqtalaridagi kuchlanganlikning kattaligi bir xil,

yo'nalishi esa aylana urinmasiga mos keladi. Shuning uchun:

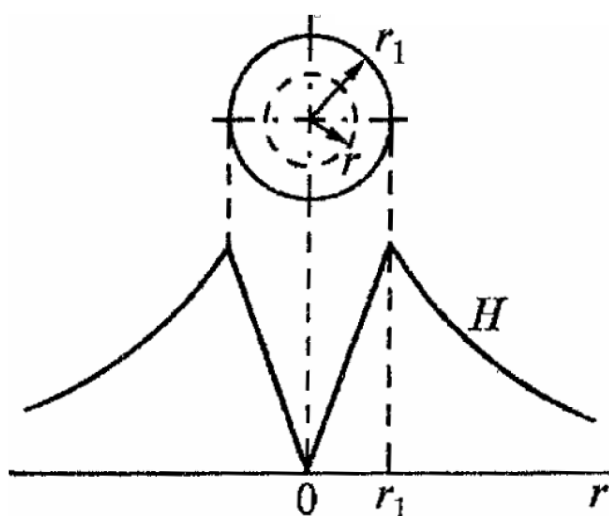
$$\oint \underline{H} d\underline{l} = \sum I = \oint H dl \cos 0^\circ = H \oint dl = H 2\pi R = I; H = \frac{I}{2\pi R}.$$

Radius ortgan sayin magnit maydoni kuchlanganligi giperbolik qonun bo'yicha kamayadi.

To'la tok qonunining integral shakli maydonning shakli murakkab bo'lganda ham o'rinlidir.

2. Tok o'tayotgan va kesimi dumaloq o'tkazgich magnit maydoni. Markazi o'tkazgich o'qidan o'tgan aylanasiimon konturini ko'rib chiqamiz (15.2- rasm). Agar aylana radiusi o'tkazgich radiusidan kichik ($r < r_1$) bo'lsa, u holda qarayotgan konturdan tokning faqat bir qismi o'tadi:

$$I' = \delta \cdot s' = \frac{I}{\pi r_1^2} \cdot \pi r^2 = I \frac{r^2}{r_1^2}.$$



15.2- rasm

Aylananing har bir nuqtasidagi magnit maydonining kuchlanganligi bir xil bo'lganligi sababli, to'la tok qonunini quyidagi tenglik bilan ifodalash mumkin:

$$H \cdot 2\pi r = I' = I \frac{r^2}{r_1^2}.$$

Bunday o'tkazgich ichidagi magnit maydonining

kuchlanganligi: $H = \frac{Ir}{2\pi r_1^2}.$

Simning o'qida $r = 0$; $H = 0$, uning sirtida esa $r = r_1$; $H = \frac{I}{2\pi r_1}$.

Simning tashqarisida to'la tok qiymati o'zgarmaydi va radiusga ham bog'liq bo'lmaydi. Shuning uchun magnit maydoni kuchlanganligi:

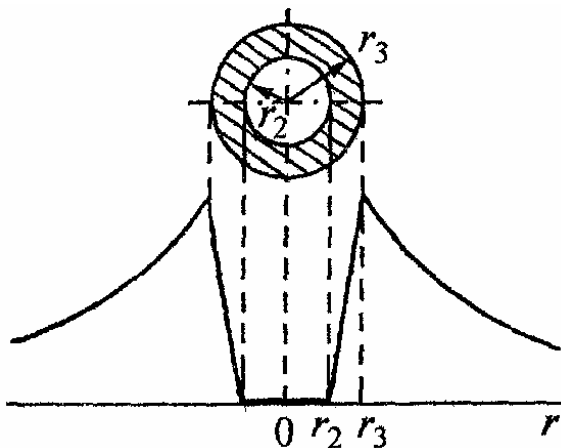
$$H = \frac{I}{2\pi r}. \quad (15.3)$$

Simning ichi va tashqarisidagi magnit maydoni kuchlanganligining o'zgarishi 14.2- rasmda tasvirlangan.

3. Tok o'tayotgan quvursimon o'tkazgich magnit maydoni. Quvursimon o'tkazgich ichki radiusi r_2 , tashqi radiusi r_3 va undan o'tayotgan tok I bo'lsin (15.3- rasm). Quvur ichki konturidagi ($r < r_2$) to'la tok nolga teng va to'la tok qonuni quyidagi ko'rinishga ega: $\oint \underline{H} d\underline{l} = 0$.

O'tkazgich $r_2 \leq r \leq r_3$ oralig'ida tokning quyidagi bir qismi o'tadi:

$$I' = \delta \cdot s' = \frac{I}{S} s' = \frac{I\pi(r^2 - r_2^2)}{\pi(r_3^2 - r_2^2)} = \frac{I(r^2 - r_2^2)}{(r_3^2 - r_2^2)}.$$



15.3- rasm

Bunda to'la tok qonuni quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$H \cdot 2\pi r = \frac{I(r^2 - r_2^2)}{(r_3^2 - r_2^2)}.$$

Maydon kuchlanganligi esa:

$$H = \frac{I(r^2 - r_2^2)}{2\pi r(r_3^2 - r_2^2)}. \quad (15.4)$$

O'tkazgichning ichki sirti

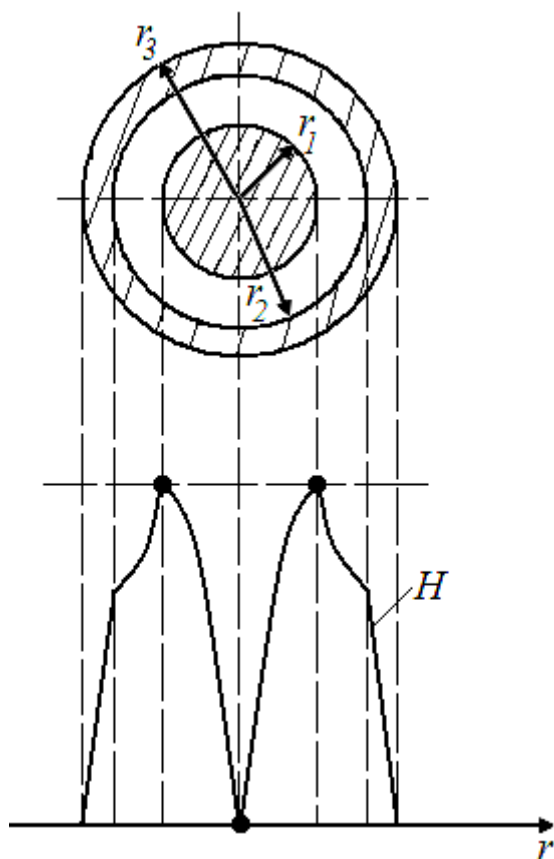
$r = r_2$ da $H = 0$. Uning tashqi

sirti ($r = r_3$)da $H = H_{\max} = \frac{I}{2\pi r_3}$.

Undan tashqari ($r > r_3$) da esa magnit maydoni kuchlanganligi $H = \frac{I}{2\pi r}$.

4. Koaksial kabelning magnit maydoni (15.4- rasm). Koaksial kabel umumiy o'qqa ega bo'lgan ikkita silindrsimon o'tkazgichdir.

Tashqi silindr ichi bo'sh kavaksimon silindrdan iborat. Ichki silindr – kesimi dumaloq o'tkazgichdan iborat. Ulardan odatda teng, lekin yo'nalishi qarama-qarshi tok o'tadi. Ichki o'tkazgich ($r < r_2$)dagi maydon kuchlanganligi (15.4) formula bilan ifodalanadi.



15.4- rasm

Kesimning $r_2 \leq r \leq r_3$ qismidagi magnit maydoni ichki o'tkazgich tokidan va qisman tashqi o'tkazgichning teskari yo'nalishda o'tayotgan tokidan hosil bo'ladi., ya'ni $H = H' - H''$. Shu ifoda o'ng tomonining birinchi tashkil etuvchisi (15.3) ga, ikkinchisi esa (15.4) ga mos keladi. Va nihoyat, o'tkazgichdagi natijaviy kuchlanganlik:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \left(1 - \frac{r^2 - r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \right). \quad (15.5)$$

(15.5) ifodadan ko'rinib turibdiki, kabelning tashqi sirtida maydon kuchlanganligi nolga teng, ya'ni koaksial kabelning tashqarisida magnit maydoni nolga teng (15.4-rasm).

15.3. Bio-Savar-Laplas qonuni va undan foydalanish

Fizika kursidan ma'lumki, bu qonunga ko'ra, ferromagnit bo'lmagan muhitda o'tkazgichdan I tok dl yo'nalishda o'tsa, shu tok elementidan R masofada joylashgan nuqtadagi magnit induksiyasi quyidagicha aniqlanadi:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_a I dl \sin \varphi}{4\pi r^2}, \quad (15.6)$$

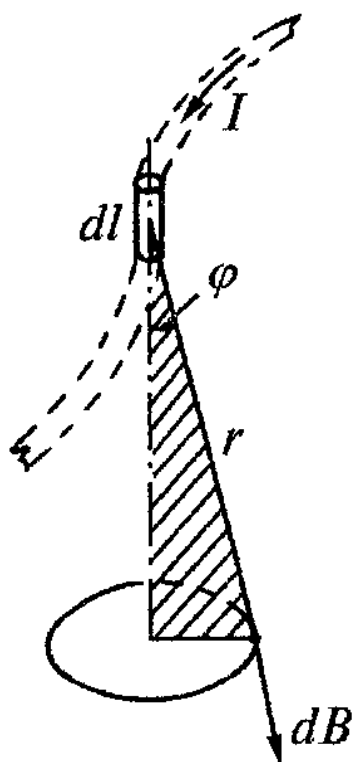
ya'ni hosil bo'ladigan induksiya tokka, o'tkazgich uzunligiga va muhitning absolut magnit singdiruvchanligiga to'g'ri proporsional hamda tok yo'nalishi va maydon nuqtasi bilan o'tkazgich elementini ulaydigan radius-vektor uzunligi kvadratiga teskari proporsional (15.5- rasm).

Induksiya vektori uzunlik vektori $d\vec{l}$ va radius-vektor orqali o'tadigan (shtrixlangan) tekislikka perpendikular.

Tok o'tayotgan o'tkazgich hosil qilgan magnit maydoni induksiyasi:

$$\vec{B} = \int d\vec{B}.$$

Shu qonunning qo'llanishini aniq misollarda ko'rib chiqamiz:



15.5- rasm

1. O'zgarmas tok o'tayotgan halqasimon o'tkazgich o'q chizig'idagi magnit maydoni (14.5- rasm). $\varphi = 90^\circ$ da (14.6) formula quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi: $dB = \frac{\mu_a Idl}{2\pi r^2}$.

dl_1 uzunlik elementi belgilangan A nuqtada dB_1 induksiya hosil qiladi, dl_2 esa - dB_2 . Ularning gorizontal dB_1' va dB_2' tashkil etuvchilari o'zaro kompensatsiyalanadi. Shuning uchun ularning yig'indisi nolga teng. Binobarin, A nuqtadagi natijaviy induksiya:

$$B = \int dB = \int \frac{\mu_a Idl}{4\pi r^2} \sin \alpha = \frac{\mu_a I \sin \alpha}{4\pi r^2} \int dl,$$

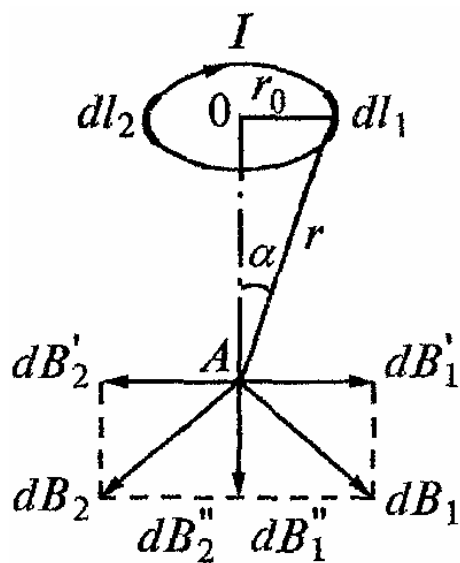
bu yerda $\int dl = 2\pi r_0$ va $r_0 = r \sin \alpha$ bo'lganligi uchun:

$$B = \frac{\mu_a I \sin^3 \alpha}{2r_0}. \quad (15.7)$$

O'ramning o'rtasida $\sin \alpha = 1$, shuning uchun induksiya:

$$B = \frac{\mu_a I}{2r_0} = \frac{\mu_o I}{d_o}.$$

2. Silindrsimon g'altak magnit maydoni. Uzunligi l , radiusi r_0 bo'lgan



15.6- rasm

silindrsimon g'altak o'qidagi magnit maydoni kuchlanganligini aniqlaymiz (15.6- rasm). Qalinligi dx bo'lgan elementar

halqaning toki: $i = \frac{Iw}{l} dx$. Shu halqadagi tokning maydon kuchlanganligi (15.7)

bo'yicha: $dH = \frac{i}{2r_0} \sin^3 \alpha = \frac{Iw}{l} dx \frac{\sin^3 \alpha}{2r_0}$ ga

teng. 15.6- rasmga ko'ra $x = r_0 \tan(90^\circ - \alpha) = r_0 \cot \alpha$, bo'lganligi uchun

$$dx = d(r_0 \cot \alpha) = -\frac{r_0}{\sin^2 \alpha} d\alpha;$$

$$dH = -\frac{Iw}{2l} \sin \alpha d\alpha \text{ va nihoyat, bu ifodani}$$

$\alpha = \pi - \alpha_2$ dan $\alpha = \alpha_1$ chegarada integrallab, quyidagini hosil qilamiz:

$$H = -\frac{Iw}{2l} \int_{\pi - \alpha_2}^{\alpha_1} (-\sin \alpha) d\alpha = \frac{Iw}{2l} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2).$$

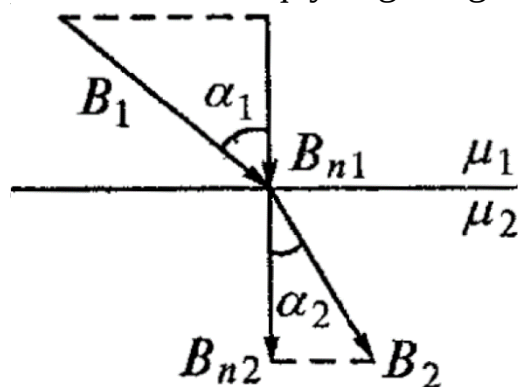
Agar $l \gg r_0$ bo'lsa, g'altakning o'rta qismida $\cos \alpha_1 \approx \cos \alpha_2 \approx 1$.
Shuning uchun: $H \approx \frac{Iw}{l}$.

G'altakning bir chekkasidagi V nuqtada α_1 yoki α_2 burchaklarning bittasi 90° ga teng. Shuning uchun g'altak o'qining bir uchida $H = \frac{Iw}{2l}$.

15.4. Ikki muhit chegarasidagi magnit maydoni

Magnit oqimining kattaligi bir muhitdan boshqa muhitga o'tganda o'zgarmaydi (15.7- rasm).

Bu xossani quyidagi tengliklar bilan ifodalash mumkin:



15.7- rasm

$$\underline{BS} = B_n S$$

$$B_1 \cos \alpha_1 = B_2 \cos \alpha_2 \quad (15.8)$$

$$\mu_1 H_1 \cos \alpha_1 = \mu_2 H_2 \cos \alpha_2$$

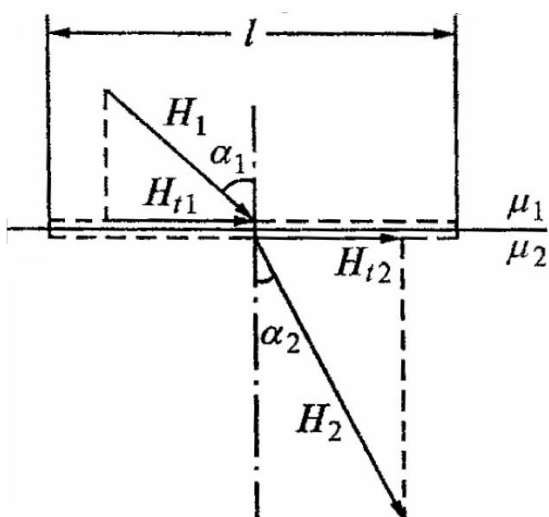
Ikki muhitni chegaralaydigan tekislikda magnit induksiyaning perpendikular tashkil etuvchilari o'zaro teng. Magnit maydoni kuchlanganliklarining vektorlari 15.8- rasmدا tasvirlangan.

Agar ikki muhit chegarasidagi konturni tahlil etsak, to'la tok qonuni asosida quyidagini yozish mumkin:

$$\sum I = 0, H_1 \sin \alpha_1 = H_2 \sin \alpha_2, H_{t1} = H_{t2}. \quad (15.9)$$

Ikki muhit chegarasidagi magnit maydoni kuchlanganliklari vektorining urunmaviy tashkil etuvchilari o'zaro teng. Shuning uchun (15.9) ni (15.8) ga bo'lib, magnit kuch chiziqlarini bir muhitdan boshqa muhitga o'tishdagi sinish shartlarini keltirib chiqaramiz:

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2},$$



15.8- rasm

ya'ni, ikki muhitdan o'tuvchi magnit induksiyasi vektorlari va muhitlarni o'zaro chegaralovchi sirtga o'tkazilgan perpendikular orasidagi burchaklar tangenslarining nisbati shu muhitlarning magnit singdiruvchanliklari nisbatiga teng.

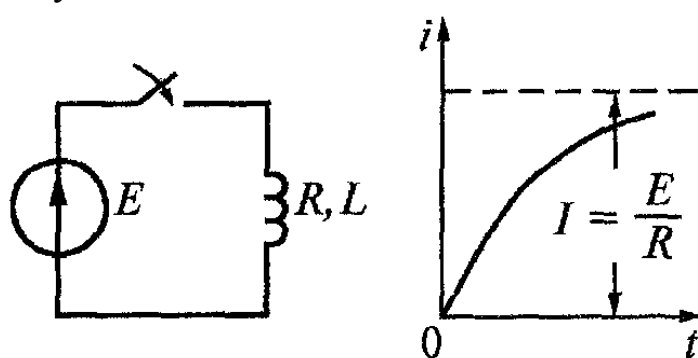
15.5. Magnit maydon energiyasi

Magnit maydoni harakatlanayotgan zaryadga yoki tokli o'tkazgichga kuch bilan ta'sir qiladi. Demak, magnit maydoni ma'lum energiyaga ega. Induktiv g'altak energiyasi va o'tayotgan tok orasidagi ifodani keltirib chiqaramiz.

Induktiv g'altakning o'zgarmas tok manbayiga ulanish jarayonini ko'rib chiqamiz (15.9- rasm). Kirxgof ikkinchi qonuni bo'yicha:

$$E + e_L = iR, \text{ bunda } e_L = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt}.$$

Yuqoridagi tenglikni ikkala tomonini idt ga ko'paytiramiz va uni quyidagi ko'rinishda yozamiz: $Eidt = i^2 Rdt + id\psi$.



15.9- rasm

Bu tenglamaning o'ng tomonidagi ikkinchi had dt vaqt davomida g'altakning manbadan qabul qilgan energiyasiga teng: $dW_\mu = id\psi$.

G'altak qabul qilgan to'liq energiya esa:

$$W_{\mu} = \int_0^{\psi} i d\psi = L \int_0^I i di = \frac{LI^2}{2} = \frac{\psi I}{2}.$$

Energiyaning o'lchov birligi: $[W_{\mu}] = [\psi I] = [V \cdot s \cdot A = J]$

Bir jinsli magnit o'tkazgichli halqasimon g'altak energiyasini $\Phi = BS$, $\psi = \Phi w$, $Hl = Iw$, $B = \mu_a H$ ifodalarni hisobga olgan holda quyidagi formula bilan aniqlash mumkin:

$$W_{\mu} = \frac{BH}{2}V; \quad W_{\mu} = \frac{\mu_a H^2}{2}V; \quad W_{\mu} = \frac{B^2}{2\mu_a}V. \quad (15.10)$$

(15.10) ifodalarni hajm V ga bo'lib, magnit maydoni energiyasi zichligining quyidagi ifodalarini hosil qilamiz:

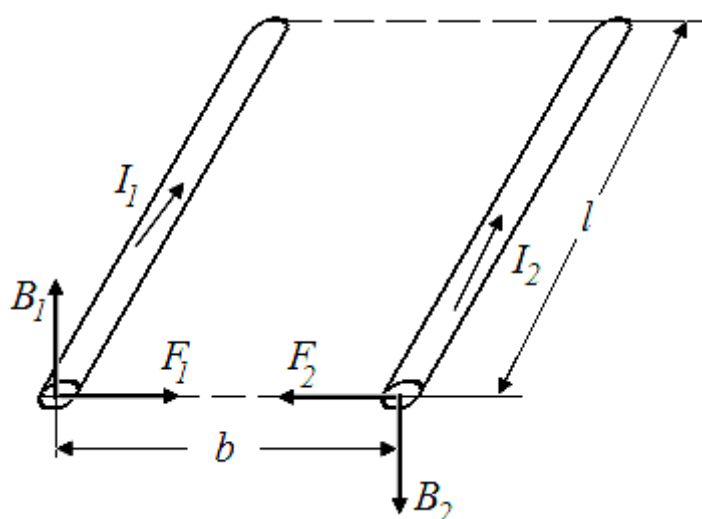
$$w_{\mu} = \frac{W_{\mu}}{V} = \frac{BH}{2} = \frac{\mu_a H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_a}; \quad [W_{\mu}] = \left[\frac{J}{m^3} \right].$$

15.6. Magnit maydonidagi mexanik kuchlar

Fizika kursidan ma'lumki, magnit maydonining tokli o'tkazgichga ta'sir etuvchi kuchi $F = BIl \sin \alpha$ ifoda bilan aniqlanadi.

Agar tok yo'nalishi va magnit kuch chiziqlari orasidagi α burchak 90° ga teng bo'lsa, u holda kuch eng katta $F = BIl$ qiymatga ega bo'ladi.

Endi ikkita parallel o'tkazgichdan bir yo'nalishda tok o'tganda ular orasidagi o'zaro ta'sir kuchini ko'rib chiqamiz (15.10- rasm).



15.10- rasm

$$F_2 = B_1 I_2 l = \frac{\mu_a I_1 I_2 l}{2\pi b}, \text{ bu yerda } l - \text{o'tkazgichlar uzunligi.}$$

Birinchi o'tkazgichdan o'tayotgan I_1 tok ikkinchi o'tkazgichning ta'sir doirasida quyidagi magnit induksiyaning hosil qiladi:

$$B_1 = \mu_a \frac{I_1}{2\pi b}, \text{ bunda } b - \text{o'tkazgichlar orasidagi masofa.}$$

Shu maydon tomonidan ikkinchi o'tkazgichga ta'sir qiladigan mexanik kuch:

Shunga o'xshash ikkinchi o'tkazgichdan o'tayotgan I_2 tok birinchi o'tkazgichning ta'sir doirasida hosil bo'ladigan magnit induksiya:

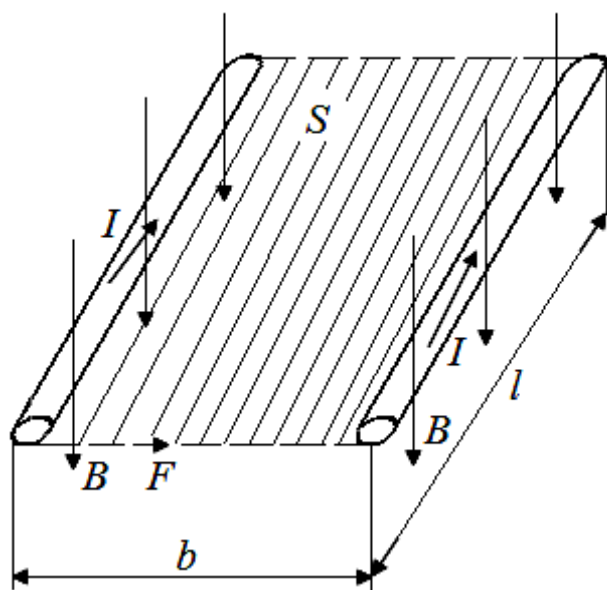
$$B_2 = \mu_a \frac{I_2}{2\pi b}.$$

Birinchi o'tkazgichga ta'sir etayotgan mexanik kuch: $F_1 = \frac{\mu_a I_1 I_2 l}{2\pi a} = F_2.$

Xulosa: tokli ikkita o'tkazgich shu toklar ko'paytmasiga to'g'ri proporsional va ular orasidagi masofaga teskari proporsional kuch bilan o'zaro ta'sir qiladi. Bunda bir xil yo'nalishdagi tokli o'tkazgichlar o'zaro tortiladi, toklari qarama-qarshi yo'nalgan o'tkazgichlar esa bir biridan uzoqlashadi.

Elektr mashinalar ishlash prinsipini o'rganishda asosiy e'tibor magnit maydoni va tokli o'tkazgichning o'zaro ta'siriga qaratiladi. Shuning uchun elektromagnit kuchlarning bajaradigan mexanik ishini ko'rib chiqamiz. Agar bir jinsli magnit maydonida uning yo'nalishiga perpendikular bo'lgan o'tkazgich F kuch yo'nalishida b masofaga siljitsa (15.11- rasm), u holda maydon tomonidan bajarilgan ish quyidagiga teng bo'ladi:

$$A = IBS = I\Phi.$$



15.11- rasm

Bunda o'tkazgich $S = lb$ yuzaga siljiydi. Demak, shu yuzadan o'tuvchi magnit oqimi $\Phi = BS$ ga teng.

Shunday qilib, bir jinsli magnit maydonida o'zgarmas tokli o'tkazgich siljiganda tok va magnit oqimi ko'paytmalariga teng bo'lgan mexanik ish bajariladi.

Agar mexanik ish maydon kuchlari yordamida bajarilgan bo'lsa, u holda u musbat, maydon kuchlariga qarshi

bajarilgan ish esa manfiy deb qabul qilinadi.

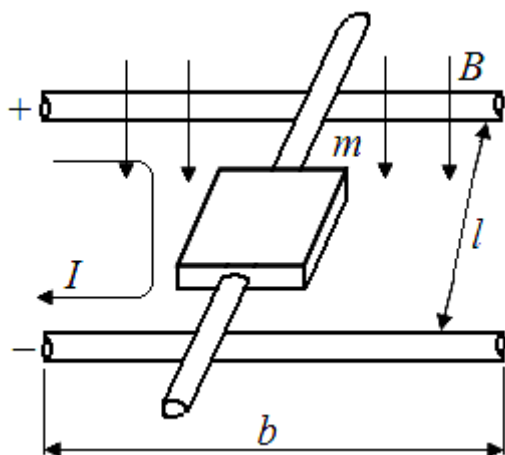
1- masala. Bir jinsli magnit maydonining kuch chiziqlariga perpendikular holda uzunligi $l = 0,25 \text{ m}$ va toki $I = 100 \text{ A}$ bo'lgan to'g'ri o'tkazgich joylashtirilgan. Magnit induksiya $\underline{B} = 1 \text{ T}$. O'tkazgichga ta'sir etayotgan kuch aniqlansin.

Yechish.

Elektromagnit

kuch:

$$F = Ibl \sin \alpha = 100 \cdot 1 \cdot 0,25 \sin 90^\circ = 25 \text{ N}.$$



15.12- rasm

2- masala. Magnit induksiyasi $B = 1,25 T$ bo'lgan bir jinsli maydonda unga perpendikular bo'lgan relslar $l = 0,5 m$ oraliq masofada o'rnatilgan. Relslar bo'yicha siljiydigan o'tkazgichga $m = 1 kg$ massali yuk osilgan (15.12- rasm). Yukning yo'l oxiridagi tezligi $g = 50 m/s$ bo'lsa, zanjirdan qanday tok o'tadi?

Yechish. Yukning yo'l oxiridagi kinetic energiyasi:

$$W = m g^2 / 2 = 1 \cdot 50^2 / 2 = 1250 J.$$

O'tkazgichni magnit maydoni kesib o'tganda quyidagi formula bilan aniqlanadigan ish bajariladi: $\frac{m g^2}{2} = I \Phi$. Bu shartdan zanjirdan o'tayotgan

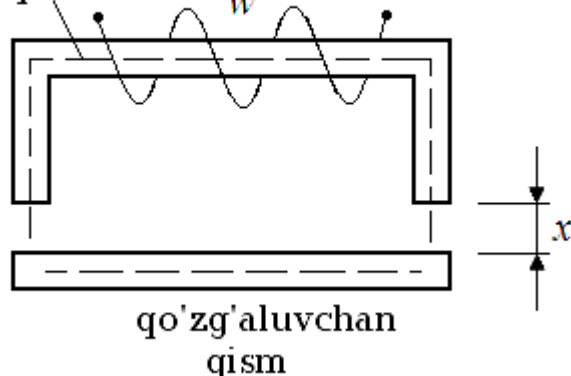
$$\text{tokni topamiz: } I = \frac{m g^2}{2 \Phi} = \frac{1250}{1,25 \cdot 0,25 \cdot 4} = 500 A.$$

3- masala. Yassi elektromagnit magnitlovchi chulg'am o'ralgan qo'zg'almas qism va qo'zg'aluvchi yakordan iborat (15.13- rasm). Magnit o'tkazgich o'lchamlari va g'altak o'ramlar soni ma'lum bo'lsa, elektromagnit tortish kuchini aniqlang.

Yechish. Sistema magnit maydonining energiyasi:

$$W_{\mu} = W_{mo'} + W_{ho} = \frac{B H_{mo'}}{2} V_{mo'} + \frac{B H_{ho}}{2} V_{ho}.$$

qo'zg'almas
qism



15.13- rasm

Bunda, $H_{mo'}$ va H_{ho} - mos ravishda magnit o'tkazgich va havo oralig'idagi magnit maydon kuchlanganliklari, $V_{mo'}$ va V_{ho} - mos ravishda magnit o'tkazgich va havo oralig'i hajmlari. Magnit o'tkazgichdagi maydon kuchlanganligi havo oralig'idagi kuchlanganlikdan ko'p marta kam bo'lganligi uchun deyarli barcha energiya

havo oralig'ida to'planadi. Shuning uchun:

$$W_{\mu} \approx W_{ho} = \frac{BH_{ho}}{2} Sx.$$

x, S - havo oralig'ining mos ravishda kengligi va ko'ndalang kesimining yuzi.

Elektromagnitning tortish kuchi:

$$F = \frac{BH_{h.o.}}{2} S = \frac{B_2}{2\mu_0} S = \frac{\mu_0 H_{h.o.}^2}{2} S.$$

Nazorat savollari

1. Magnit maydoni qanday asosiy kattalik va munosabatlar bilan tavsiflanadi? 2. To'la tok qonuni mohiyatini tushuntirib bering! 3. Bio-Savar-Laplas qonuni nima? 4. Ikki muhit chegarasidagi magnit maydoni xossalarini aytib bering! 5. Magnit maydoni energiyasi ifodalarini yozing! 6. Magnit maydonida yuzaga keladigan mexanik kuchlar ifodalarini keltirib chiqaring!

16- BOB. O‘ZGARUVCHAN ELEKTROMAGNIT MAYDON

16.1. To‘la elektr toki va uning zichligi

O‘zgaruvchan elektromagnit maydon – bu vaqt bo‘yicha o‘zgaradigan va bir-biri bilan o‘zaro bog‘langan elektr va magnit maydonlarining majmuasidir. Uning xossalarini tahlil etishdan avval «to‘la elektr toki va uning zichligi» tushunchasini izohlashimiz zarur bo‘ladi. Buning uchun to‘la tok tashkil etuvchilarini ko‘rib chiqamiz.

1. O‘tkazuvchanlik elektr toki – elektr zaryadlari erkin tashuvchilarining o‘tkazuvchi muhit yoki vakuumdagi yo‘naltirilgan harakati hodisasi bo‘lib, u son jihatdan ko‘rilayotgan yuza orqali elektr zaryadlarining erkin tashuvchilari olib o‘tayotgan zaryad (q) ning vaqt bo‘yicha hosilasiga teng bo‘lgan skalyar kattalik bilan tavsiflanadi, ya’ni:

$$i_{o'} = \frac{dq}{dt}, [A].$$

O‘tkazuvchanlik elektr toki zichligi –elektr zaryadlari tashuvchilari harakati yo‘nalishiga perpendikulyar bo‘lgan biron yuza elementi orqali o‘tayotgan o‘tkazuvchanlik elektr tokining shu yuzaga nisbatini yuza elementi o‘lchamlari nolga intilgandagi limitiga teng bo‘lgan vektor kattalik, ya’ni: $\underline{\delta}_{o'} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta i_{o'}}{\Delta s} = \frac{di_{o'}}{ds}, \frac{A}{m^2}$.

Bu tokning zichligi maydon kuchlanganligiga va muhitning o‘tkazuvchanligiga proporsional: $\underline{\delta} = \gamma \underline{E}$.

O‘tkazuvchanlik toki tok zichligining yuza bo‘yicha integral funksiyasidir:

$$i_{o'} = \int_S \underline{\delta} dS.$$

2. Ko‘chish elektr toki – zaryadlangan jismlarning ko‘chishi natijasida yuzaga keladigan elektr toki bo‘lib, u son jihatdan ko‘rilayotgan yuza orqali o‘tayotgan zaryadlangan jismlar elektr zaryadi (q_j) ning vaqt bo‘yicha hosilasiga teng bo‘lgan skalyar kattalik bilan tavsiflanadi, ya’ni:

$$i_k = \frac{dq_j}{dt}, [A].$$

Ko‘chish elektr toki zichligi –elektr zaryadlari tashuvchilari harakati yo‘nalishiga perpendikulyar bo‘lgan biron yuza elementi orqali o‘tayotgan ko‘chish elektr tokining shu yuzaga nisbatini yuza elementi o‘lchamlari nolga intilgandagi limitiga teng bo‘lgan vektor kattalik, ya’ni:

$$\underline{\delta}_k = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta i_k}{\Delta s} = \frac{di_k}{ds}, \left[\frac{A}{m^2} \right]$$

O'tkazuvchanlik [ko'chish] elektr toki zichligi yo'nalishi musbat zaryadlangan zarrachalar harakati yo'nalishiga mos yoki manfiy zaryadlangan zarrachalar yo'nalishiga qarama-qarshi bo'ladi.

3. *Qutblanish elektr toki* – dielektrikdagi bog'langan zaryadlangan zarrachalar dielektrik qutblanishining o'zgarishi natijasida harakatlanishi hodisasi bo'lib, u son jihatdan dielektrik qutblanishining o'zgarishida ko'rilyotgan yuzani kesib o'tayotgan zarrachalar elektr zaryadlari absolyut qiymatlari yig'indisi ($\sum q$) ning vaqt bo'yicha hosilasiga teng bo'lgan skalyar kattalik bilan tavsiflanadi, ya'ni: $i_q = \frac{d\sum q}{dt}$, [A].

Qutblanish elektr tokining zichligi – qutblanganlikning vaqt bo'yicha hosilasiga teng, ya'ni: $\delta_q = \frac{dP}{dt}$, $\left[\frac{A}{m^2} \right]$

Yuqorida qayd etilgan uch turdagi toklar elektr zaryadlarning siljishi (harakati) natijasida yuzaga keladi. Bu toklarning har biri magnit maydonini hosil bo'lishiga sabab bo'ladi.

4. *Vakuumdagi siljish elektr toki* – elektr maydonining vakuumda o'zgarish hodisasi bo'lib, u son jihatdan vakuumda ko'rilyotgan yuza orqali o'tayotgan elektr siljishi oqimining vaqt bo'yicha hosilasiga teng bo'lgan skalyar kattalik bilan tavsiflanadi, ya'ni: $i_{sv} = \frac{dD}{dt}$, [A].

5. *Siljish elektr toki* – vakuumdagi siljish toki va qutblanish elektr toki yig'indisi bo'lib, u son jihatdan ko'rilyotgan yuzadan o'tayotgan elektr siljish oqimining vaqt bo'yicha hosilasiga teng bo'lgan skalyar kattalik bilan tavsiflanadi, ya'ni: $i_s = \frac{dD}{dt}$, [A].

Siljish elektr toki zichligi – elektr siljishining vaqt bo'yicha hosilasiga teng bo'lgan vektor kattalik, ya'ni: $\underline{\delta}_s = \frac{d\underline{D}}{dt}$, $\left[\frac{A}{m^2} \right]$.

Vakuumdagi siljish tokining boshqa toklardan farqi shundaki, bu tok issiqlik isrofini yuzaga keltirmaydi.

Shunday qilib, *elektr toki deb, ikkita turli xil hodisaga – elektr zaryadlarining harakatiga va elektr maydonining vaqt bo'yicha o'zgarishiga aytiladi.* Har bir tokning asosiy xossasi uning magnit maydonini hosil qilishidir.

To'la elektr toki – ko'rilyotgan yuza orqali o'tayotgan o'tkazuvchanlik (i_o), ko'chish (i_k) va siljish (i_s) elektr toklarining yig'indisiga teng bo'lgan skalyar kattalik, ya'ni: $i_T = i_o + i_k + i_s$, [A]

Elektr toki zichligi – o‘tkazuvchanlik ($\underline{\delta}_o$), ko‘chish ($\underline{\delta}_s$) va siljish ($\underline{\delta}_k$) toklarining mos ravishda zichliklari yig‘indisiga teng bo‘lgan vektor kattalik, ya’ni: $\underline{\delta}_\tau = \underline{\delta}_o + \underline{\delta}_s = \underline{\delta}_k$, $\frac{A}{m^2}$

Yuqoridagi formulalar to‘la tok chiziqlarining uzluksizligini aks ettiradi: tok chiziqlarining boshi ham, oxiri ham yo‘q. Tok zanjirlarida faqat to‘la tok tashkil etuvchilarini ko‘rsatish mumkin. Masalan, kondensatorli zanjirda o‘tkazuvchanlik tokining chiziqlari kondensator elektrodlarida uziladi, lekin ular siljish toki chiziqlari ko‘rinishida davom etadi.

16.2. O‘tkazuvchanlik toki zichligining divergensiyasi va to‘la tokning uzluksizligi

O‘zgarmas toklar faqat berk zanjirlarda yuzaga kelishi mumkin. Chunki, $\text{div} \underline{\delta} = 0$. O‘zgaruvchan toklar berk bo‘lmagan (masalan, kondensatorli) zanjirlarda ham yuzaga kelishi mumkin. O‘tkazuvchanlik toki zichligining vektori chiziqlari tugagan joyda elektr zaryadlari to‘planishi mumkin, ya’ni yopiq sirt orqali o‘tadigan o‘tkazuvchanlik toki zichligining vektori oqimi nolga teng bo‘lmasligi mumkin.

s sirt bilan chegaralangan V hajmda hajmiy zichligi ρ bo‘lgan q elektr zaryadi mavjud bo‘lsin. Agar s sirt orqali o‘tkazuvchanlik toki chiqayotgan bo‘lsa, V hajmda elektr zaryadi kamayishi kuzatiladi va tok quyidagiga teng bo‘ladi:

$$i = -\frac{\partial q}{\partial t} \text{ yoki } \oint_s \underline{\delta} d\underline{S} = -\frac{\partial q}{\partial t}.$$

$q = \int_V \rho dV$ ni hisobga olgan holda va $\underline{\delta}$ vektor oqimini Ostrogradskiy teoremasiga ko‘ra $\oint_s \underline{\delta} d\underline{S} = \int_V \text{div} \underline{\delta} dV$ ga o‘zgartirib, quyidagini hosil qilamiz:

$$-\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = \int_V \text{div} \underline{\delta} dV \text{ yoki } \text{div} \underline{\delta} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \text{ ya'ni o'tkazuvchanlik toki}$$

zichligining divergensiyasi elektr zaryadlari hajmiy zichligining kamayish tezligiga teng.

Endi to‘la tok divergensiyasi har doim nolga tengligiga ishonch hosil qilish uchun quyidagi munosabatlarni ko‘rib chiqamiz.

To‘la tok zichligi:

$$\underline{\delta}_T = \underline{\delta}_{o'} + \underline{\delta}_s = \underline{\delta}_{o'} + \frac{\partial \underline{D}}{\partial t},$$

uning divergensiya esa:

$$\operatorname{div} \underline{\delta}_T = \operatorname{div} \underline{\delta}_{o'} + \operatorname{div} \frac{\partial \underline{D}}{\partial t}.$$

Fazoviy koordinatalar vaqtga bog'liq bo'lmaganligi sababli yuqorida keltirilgan tenglamada differensiallash tartibini o'zgartirish mumkin, ya'ni:

$$\operatorname{div} \underline{\delta}_T = \operatorname{div} \underline{\delta}_{o'} + \frac{\partial(\operatorname{div} \underline{D})}{\partial t}.$$

Gauss teoremasining differensial shakliga ko'ra $\operatorname{div} \underline{D} = \rho$. $\operatorname{div} \underline{\delta} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$ ni hisobga olsak, yuqoridagi tenglama quyidagiga teng bo'ladi:

$$\operatorname{div} \underline{\delta}_T = -\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0.$$

16.3. Maksvell tenglamalari

Elektromagnit maydon to'raligicha Maksvell tenglamalari va Umov-Poynting teoremasi bilan ifodalanadi.

Maksvellning birinchi tenglamasi. Bu tenglamani umumiy holda quyidagicha yozish mumkin:

$$\operatorname{rot} \underline{H} = \underline{\delta}_T, \quad (16.1)$$

ya'ni magnit maydoni kuchlanganligining rotori shu nuqtadagi to'la tok zichligining vektoriga teng.

To'la tokning tashkil etuvchilarini hisobga olib, Maksvellning elektromagnit maydonni ifodalovchi birinchi tenglamasini quyidagi variantlarda yozish mumkin:

a) o'tkazuvchi muhit uchun $\underline{\delta}_T = \underline{\delta}_{o'} = \gamma \underline{E}$, $\operatorname{rot} \underline{H} = \gamma \underline{E}$;

b) vakuum uchun $\underline{\delta}_T = \underline{\delta}_{vs} = \varepsilon_o \frac{\partial \underline{E}}{\partial t}$, $\operatorname{rot} \underline{H} = \varepsilon_o \frac{\partial \underline{E}}{\partial t}$;

v) dielektrik singdiruvchanligi doimiy bo'lgan dielektrik muhit uchun esa

$$\underline{\delta}_T = \underline{\delta}_{o'} + \underline{\delta}_s = \gamma \underline{E} + \varepsilon_a \frac{\partial \underline{E}}{\partial t}, \quad \operatorname{rot} \underline{H} = \gamma \underline{E} + \varepsilon_a \frac{\partial \underline{E}}{\partial t}.$$

Bu tenglamani fizik ma'nosi shuki, magnit maydon nafaqat o'tkazuvchanlik tokidan, balki vaqt bo'yicha o'zgaradigan elektr maydondan ham paydo bo'ladi.

Maksvell birinchi tenglamasi to'la tok qonunining differensial shaklini aks ettiradi. Buni isbotlash uchun (15.1) tenglamani $d\mathbf{S}$ ga ko'paytiramiz va S yuza bo'yicha integrallaymiz:

$$\int_S \text{rot} \mathbf{H} d\mathbf{S} = \int_S \underline{\delta}_\tau d\mathbf{S}.$$

Ushbu ifodaning chap tomoni $\int_S \text{rot} \mathbf{H} d\mathbf{S} = \oint \mathbf{H} d\mathbf{l}$ ga, o'ng tomoni esa

$$\int_S \underline{\delta}_\tau d\mathbf{S} = \sum I = i_o + i_s.$$

Integral shaklida to'la tok qonuni $\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum I$ ko'rinishida yoziladi va u $\mathbf{E}$ va $\mathbf{H}$ vektorlar orasidagi bog'lanishni va tok o'tadigan kesimdagi tok taqsimlanishini ifodalay olmaydi. Maksvell birinchi tenglamasi mazkur masalani yecha oladi.

Integral shakldagi to'la tok qonunidan uning differensial shakliga o'tish quyidagi matematik amal yordamida bajariladi:

$$\lim \left| \frac{\oint \mathbf{H} d\mathbf{l}}{\Delta S} \right| = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta i}{\Delta S} \right| \text{ yoki } \text{rot} \mathbf{H} = \underline{\delta}_\tau,$$

bunda $\text{rot} \mathbf{H}$ - maydonning uyurmaviy vektori.

Agar $\text{rot} \mathbf{H} \neq 0$ bo'lsa, u holda magnit kuch chiziqlari berk bo'ladi va shuning uchun maydon uyurmaviy xarakterga ega. *To'la tok qonunning fizik ma'nosi shundan iboratki, u o'zgaruvchan elektr maydoni hosil qiladigan magnit maydoni uyurmaviy maydon bo'lishini bildiradi.*

Maksvell ikkinchi tenglamasi:

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (16.2)$$

Bizga ma'lum bo'lgan $\mathbf{B} = \mu_a \mathbf{H}$ ifodani hisobga olib, yuqoridagi tenglamani quyidagicha yozamiz:

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\mu_a \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}. \quad (16.3)$$

Maksvell ikkinchi tenglamasi elektr maydoni nafaqat elektr zaryaddan, balki vaqt bo'yicha o'zgaradigan magnit maydonidan ham paydo bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi. Bunday elektr maydoni uyurmaviy xarakterga ega, ya'ni uning kuch chiziqlari o'z-o'ziga berk halqasimon ko'rinishga ega. Mazkur tenglama elektromagnit induksiya qonunining differensial shaklidir. Buni isbotlash uchun (16.3) ni $d\mathbf{S}$ ga ko'paytiramiz va $\mathbf{B} = \mu_a \mathbf{H}$ ni etiborga olib uni yuza bo'yicha integrallaymiz:

$$\int_S \text{rot} \underline{E} d\underline{S} = \int_S \left(-\frac{\partial \underline{B}}{\partial t}\right) d\underline{S}.$$

Maydon nazariyasidagi Stoks teoremasi bo'yicha $\int_S \text{rot} \underline{E} d\underline{S} = \oint_l \underline{E} d\underline{l}$ bo'lganligi uchun $\int_S \left(-\frac{\partial \underline{B}}{\partial t}\right) d\underline{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \underline{B} d\underline{S} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$ bo'ladi.

Natijada elektromagnit induksiya qonunining bizga ma'lum bo'lgan integral shaklini hosil qilamiz:

$$\oint \underline{E} d\underline{l} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}.$$

Ma'lumki, elektromagnit induksiya hodisasi elektr stansiyalarida keng qo'llaniluvchi generatorlar ishlashining asosini tashkil etadi. Fizik tadqiqotlarda esa uyurmaviy elektr maydonlaridan elektr zaryadlangan zarralarni tezlatgichlarda foydalaniladi.

Magnit oqimining uzluksizlik prinsipi - Maksvell uchunchi tenglamasi. Yopiq sirtidan o'tuvchi magnit oqimi nolga teng, ya'ni

$$\Phi = \int_S \underline{B} d\underline{S} = 0.$$

Bu tenglama tabiatda magnit zaryadlar mavjud emasligini, ya'ni magnit oqimining uzluksizligini aks ettiradi. Tenglikni ikkala qismini nolga intilayotgan ΔV hajmga bo'lib, differensial shakldagi ifodani hosil qilamiz:

$$\lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\int_S \underline{B} d\underline{S}}{\Delta V} = 0.$$

Tenglamaning chap qismi $\underline{B}$ vektorining divergensiya yoki sochilishi deb ataladi va quyidagicha ifodalanadi:

$$\text{div} \underline{B} = 0 \text{ yoki } \text{div} \underline{H} = 0. \quad (16.4)$$

(16.4) *magnit oqimining uzluksizlik prinsipi - Maksvell uchunchi tenglamasini ifodalaydi.*

Elektr tokining uzluksizlik prinsipi ham shunga o'xshash yoziladi: $\text{div} \underline{\delta} = 0$, ya'ni tok zichligi divergensiya yoki sochilishining nolga tengligi shuni ko'rsatadiki, magnit maydoni va tok chiziqlari ko'rilayotgan hajmni kesib o'tadi hamda unda to'planmaydi va undan o'tib sochilmaydi. Demak, bu chiziqlar uzluksiz bo'ladi. Bu uzluksizlikni esa Maksvellning birinchi tenglamasi ifodalaydi.

Elektromagnit maydonning to'rtinchi tenglamasi - Maksvell to'rtinchi tenglamasi - Gauss teoremasining differensial shaklidir: elektr maydonining manbai – elektr zaryadlaridir. Agar integral shaklidagi

Gauss tenglamasini nolga intilayotgan hajmga nisbatini aniqlasak,

$$\text{quyidagini hosil qilamiz: } \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left| \frac{\int_S \underline{E} d\underline{s}}{\Delta V} \right| = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta q}{\varepsilon_a \Delta V} \right|.$$

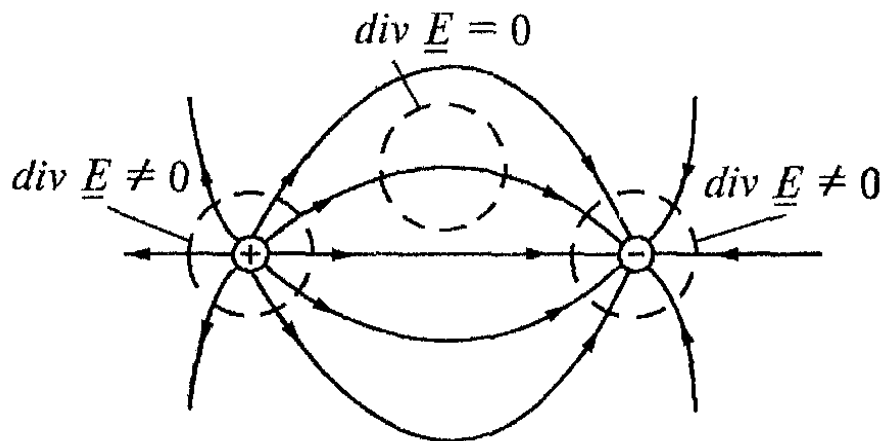
Bu ifodani

$$\text{div} \underline{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_a} \text{ yoki } \text{div} \underline{D} = \rho, \quad (16.5)$$

deb yozish ham mumkin. *Bu ifodaning fizik ma'nosi: har qanday elektr zaryadi elektr maydonining manbai bo'lishini ko'rsatadi.*

16.1- rasmdan ko'rinadiki, musbat zaryadlangan hajmdan elektr maydoni kuchlanganliklarining chiziqlari sochiladi, ya'ni boshlanadi va manfiy zaryadlangan hajmda yig'iladi, ya'ni tugallanadi.

Hosil qilingan (16.5) tenglamalar Maksvell to'rtinchi tenglamasining ifodalaridir.



16.1- rasm

Maksvell tenglamalarining kompleks shakli:

Agar $\underline{E}$ va $\underline{H}$ sinusoidal qonun bo'yicha o'zgarsa, u holda Maksvell tenglamalarini kompleks shaklda quyidagicha yozish mumkin:

$$\begin{aligned} \text{rot} \underline{H} &= \gamma \underline{E} + j\omega \varepsilon_a \underline{E}, \\ \text{rot} \underline{E} &= -j\omega \mu_a \underline{H}, \\ \text{div} \underline{B} &= 0, \\ \text{div} \underline{D} &= \rho. \end{aligned} \quad (16.6)$$

Shunday qilib, Maksvell tenglamalari sistemasiga quyidagi to'rtta tenglama kiradi:

1) magnit maydoni kuchlanganligining vektori va maydonning shu nuqtadagi tok zichligini bog'lovchi (16.1) tenglama – Maksvellning birinchi tenglamasi;

2) elektr maydon kuchlanganligining rotori va shu nuqtadagi magnit maydon tezligini bog'lovchi (16.2) tenglama – Maksvellning ikkinchi tenglamasi;

3) magnit oqimining uzluksizlik prinsipi ifodalovchi (16.4) tenglama - Maksvellning uchunchi tenglamasi;

4) elektr maydoni kuchlanganligi liniyalarining manbai va shu maydonning erkin elektr zaryadlari zichligi orasidagi bog'liqligini ifodalovchi (16.5) tenglama - Maksvellning to'rtinchi tenglamasi.

Mazkur tenglamalar sistemasi Umov-Poynting teoremasi bilan to'ldirilgan.

16.4. Umov-Poynting teoremasi

Maksvell tenglamalaridan tashqari elektromagnit maydon nazariyasida maydondagi energetik munosabatlarni, ya'ni quvvat oqimining kattaligi va uning yo'nalishini ifodalaydigan *Umov-Poynting teoremasi* katta ahamiyatga ega. (16.2- rasm). dt vaqt davomida $\underline{E}$ va $\underline{H}$ vektorlar tekisligiga perpendikular bo'lgan S yuzadan quyidagi energiya o'tadi:

$$dW = W_o scdt, \quad (16.7)$$

bunda $W_o = W_E + W_\mu = \frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2}$ - energiyaning hajmiy zichligi;

$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_a \epsilon_a}}$ - to'liqinning tarqalish tezligi.

$W_o = \frac{EH}{c}$ ekanligini hisobga olib, (15.7) ni quyidagicha yozamiz:

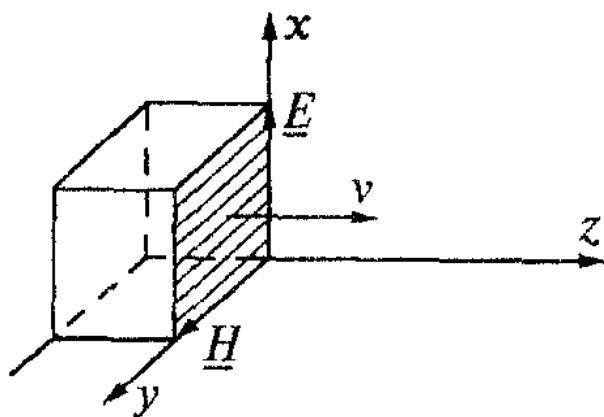
$$dW = \underline{E} \underline{H} sdt.$$

Energiyaning zichligi: $\underline{II} = \frac{dW}{Sdt} = \underline{E} \underline{H}$.

$\underline{II}$, $\underline{E}$, $\underline{H}$ vektorlarni uch o'lchovli koordinatalar sistemasida quyidagicha tasvirlash mumkin: agar $\underline{E}$ vektorni x o'qi bo'yicha, $\underline{H}$ ni esa y o'qi bo'yicha yo'naltirsak, u holda $\underline{II}$ vektor z o'qi bo'yicha yo'nalgan bo'ladi.

$\underline{II}$ vektor *Poynting vektori* deyiladi va u quyidagicha yoziladi:

$$|\underline{II}| = [\underline{E} \underline{H}] \quad (16.7)$$



16.2- rasm

Poynting vektorining o'lchov birligi $\underline{E}$ va $\underline{H}$ lar o'lchov birliklarining ko'paytmasiga

$$\text{teng: } \frac{B}{m} \cdot \frac{A}{m} = \frac{B \cdot A}{m^2}.$$

Energiya oqimining to'la quvvati berilgan hajmni chegaralaydigan sirtidan o'tadigan Poynting vektori oqimiga teng:

$$P = - \oint_s \underline{\Pi} d\underline{s}. \quad (16.8)$$

Bu formuladan berilgan hajmda ajralayotgan quvvatni aniqlash mumkin. Vektor ko'paytmaning oldidagi minus ishora energiya oqimining to'la quvvati musbat ekanligini bildiradi.

Agar elektromagnit maydon vaqt bo'yicha o'zgarmasa, u holda Umov-Poynting teoremasi quyidagicha yoziladi:

$$- \oint_s \underline{\Pi} d\underline{s} = \int_v \gamma \underline{E}^2 dV. \quad (16.9)$$

(16.9) tenglamaning fizik ma'nosi – ajralayotgan energiya Joule-Lens qonuni bo'yicha issiqlik energiyasiga aylanishini bildiradi.

Quyida Umov-Poynting teoremasini o'zgaruvchan elektromagnit maydon uchun yozamiz.

Fizika kursidan ma'lumki, hajm birligidagi elektr maydoni energiyasi $\frac{\epsilon_a E^2}{2}$ ga, magnit maydoni energiyasi esa $\frac{\mu_a H^2}{2}$ ga teng.

Demak, dV hajmdagi energiya $(\frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2})dV$ ga teng.

dV hajmdagi to'la energiyani quyidagicha yozish mumkin:

$$\underline{E} \text{rot} \underline{H} dV = (\gamma \underline{E} \underline{E} + \epsilon_a \underline{E} \frac{\partial \underline{E}}{\partial t}) dV = (\gamma E^2 + \frac{\partial}{\partial t} \cdot \frac{\epsilon_a E^2}{2}) dV \quad (16.10)$$

$$\underline{H} \text{rot} \underline{E} dV = (-\mu_a \underline{H} \frac{\partial \underline{H}}{\partial t}) dV = (-\frac{\partial}{\partial t} \cdot \frac{\mu_a H^2}{2}) dV \quad (16.11)$$

(16.10) dan (16.11) ni ayiramiz:

$$(\underline{E} \text{rot} \underline{H} - \underline{H} \text{rot} \underline{E}) dV = [\gamma E^2 + \frac{\partial}{\partial t} (\frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2})] dV. \quad (16.12)$$

$\text{div}[\underline{E} \underline{H}] = \underline{H} \text{rot} \underline{E} - \underline{E} \text{rot} \underline{H}$ bo'lganligi uchun (16.12) ifodani chap qismi $-\text{div}[\underline{E} \underline{H}] dV$ ga teng. Binobarin:

$$- \operatorname{div}[\underline{E}\underline{H}]dV = [\gamma E^2 + \frac{\partial}{\partial t}(\frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2})]dV. \quad (16.13)$$

Bu ifodani cheklangan o'lchamli hajm uchun qo'llab va Ostrogradskiy-Gauss teoremasi yordamida hajmiy integralni sirt integraliga aylantirib, quyidagini hosil qilamiz:

$$\int \operatorname{div} \underline{H} dV = \oint_S \underline{H} d\underline{S}.$$

Yuqoridagilarni inobatga olib, Umov-Poynting teoremasini oniy qiymatlar uchun quyidagicha yozish mumkin:

$$- \oint_S \underline{H} d\underline{S} = \int_V \gamma E^2 dV + \frac{\partial}{\partial t} \int_V (\frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2}) dV. \quad (16.14)$$

Bu tenglik o'ng tomonining birinchi hadi differensial shakldagi Joule-Lens tenglamasiga ko'ra vaqt birligi davomida hajmda issiqlik ko'rinishida ajralayotgan energiyaga teng. Ikkinchi, $\frac{\partial}{\partial t}(\frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2})$ had esa birlik hajmdagi elektromagnit energiya zahiraning o'zgarish tezligidir.

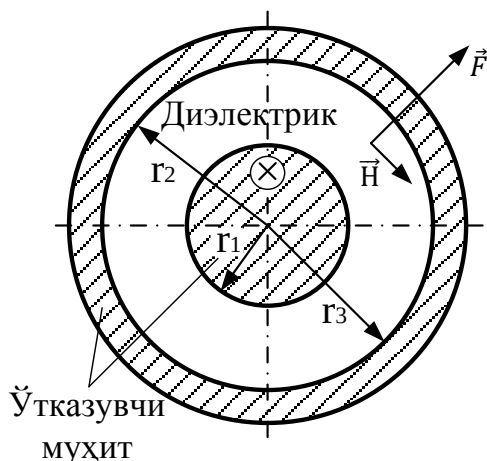
Ammo elektromagnit energiyaning o'zgarish tezligi – bu quvvat. Binobarin, istalgan V hajmni chegaralab turuvchi yopiq sirtini kesib o'tuvchi Poynting vektori oqimi V hajmda issiqlik ko'rinishida ajralayotgan quvvatga va elektromagnit energiyaning orttirmasiga sarflanayotgan quvvatga teng.

Ishlab chiqarilayotgan elektromagnit energiya iste'molchiga dielektrik orqali uzatiladi(elektr energiyasini uzatish liniyalaridagi o'tkazgich similar ikkita vazifani bajaradi: elektr toki o'tadigan kanal va dielektrikda maydon strukturasini tashkil etish). Bu fikr tasdig'ini quyidagi oddiy misol orqali ko'rishimiz mumkin. O'zgaras tok energiyasi koaksial kabel orqali uzatilayotgan bo'lsin(16.3- rasm). Kabel ichki simi radiusi - r_1 , kabel

qobig'i ichki radiusi - r_2 . Kabel ichki simi va qobig'i materiali elektr o'tkazuvchanligini cheksiz katta, deb qabul qilamiz. Bunda kabel ichki simi va qobig'idagi elektr maydoni kuchlanganligi nolga intiladi. Kabel ichki simi va qobig'i orasidagi bo'shliq dielektrik bilan to'ldirilgan.

Kattaligi UI ga teng bo'lgan va vaqt birligi ichida iste'molchiga energiya haqiqatan ham dielektrik orqali uzatilsyotganligiga ishonch hosil qilish maqsadida Poynting vektori oqimini ko'rilayotgan misol uchun hisoblaymiz. Dielektrikdagi elektr maydonining kuchlanganligi to'la tok

qonuniga ko'ra $H = \frac{I}{2\pi r}$ ga teng.



16.3- rasm

O'zgaras tokda dielektrikdagi elektr maydoni kuchlanganligi xuddi elektrostatikadagidek quyidagicha aniqlanadi:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_a r l} = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}},$$

bu yerda Q - kabel ichki simi l uzunligidagi to'la zaryad; U - kabel ichki simi va qobig'i orasidagi kuchlanish.

Binobarin, o'qdan r masofada joylashgan dielektrik nuqtasida ($r_1 \leq r \leq r_2$):

$$\Pi = EH = \frac{UI}{2\pi r^2 \ln \frac{r_2}{r_1}},$$

r_1 va r_2 radiusli halqadan o'tadigan Poynting vektori oqimi

$$\int_s \underline{\Pi} d\underline{S} = \int_{r_1}^{r_2} \Pi 2\pi r dr = 2\pi \frac{UI}{2\pi \ln \frac{r_2}{r_1}} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = UI \quad \text{bo'lib, kuchlanish va tok}$$

ko'paytmasiga, ya'ni to'la quvvat S ga teng.

Shunday qilib, bu ifoda barcha energiya yuklamaga o'tkazgich va qobiqdan emas, balki dielektrik orqali uzatilishini ko'rsatadi. Hattoki, agar γ ni ma'lum qiymatga ega, deb hisoblansa va o'tkazgich hamda uning qobiq'idagi elektr maydoni kuchlanganligi tok kabi yo'nalgan bo'lib, noldan farqli bo'lgani holda o'tkazgich yon sirtidan uning ichiga Poynting vektori oqimi kiradi, ya'ni energiya dielektrikdan o'tkazgich ichiga uning isroflarini qoplash uchun kiradi.

Umov-Poynting teoremasini kompleks shaklda yozishdan avval o'zgaruvchan tok uchun to'la quvvat formulasini ko'rib chiqamiz.

O'zgaruvchan tok zanjiri ketma-ket ulangan rezistiv qarshilik (R), induktivlik (L) va sig'im (C) dan iborat bo'lsin. U holda zanjir reaktiv quvvati:

$$Q = I^2 X = I^2 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = \omega \left[I^2 L - I^2 \left(\frac{1}{\omega C} \right)^2 C \right] = 2\omega(W_\mu - W_e), \quad (15.15)$$

bu yerda $W_\mu = \frac{LI^2}{2}$ - magnit maydoni energiyasi, $W_e = \frac{CU^2}{2}$ - elektr maydoni energiyasi.

(16.15) ifoda Q reaktiv energiyani zanjirning magnit W_μ va elektr W_e maydon energiyalarining ayirmasini 2ω ga ko'paytmasiga tengligini ko'rsatadi.

O'zgaruvchan tokda S to'la quvvatni topish uchun $\underline{U}$ kuchlanishni $\underline{I}$ tok qo'shma kompleksiga ko'paytirish kerakligini nazarda tutib, Poynting vektorining kompleks shaklini quyidagicha yozish mumkin:

$$-\oint \underline{I} d\underline{S} = -\int_V (\underline{E} \text{rot} \underline{H} - \underline{H} \text{rot} \underline{E}) dV$$

yoki

$$-\oint \underline{I} d\underline{S} = -\int_V \gamma E^2 dV + j2\omega \left[\frac{\mu_a E^2}{2} + \frac{\varepsilon_a H^2}{2} \right] dV = P + jQ. \quad (16.16)$$

(16.16) ifodaning birinchi hadi aktiv, ikkinchi hadi esa reaktiv quvvatga tengdir.

Bunday shakldagi ifoda o'tkazgichlar aktiv va ichki reaktiv qarshiliklarini hisoblashda qo'llaniladi.

16.5. Dielektrik muhitda o'zgaruvchan elektromagnit maydon

1. *Isrofsiz(ideal) dielektrik muhitda o'zgaruvchan elektromagnit maydon.* Bunday muhitda $\gamma = 0$; $\varepsilon = \text{const}$; $\mu = \text{const}$. Shuning uchun Maksvell tenglamalari quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\text{rot} \underline{H} = \varepsilon_a \frac{\partial \underline{E}}{\partial t}, \quad \text{rot} \underline{E} = -\mu_a \frac{\partial \underline{H}}{\partial t};$$

$$\text{div} \underline{B} = 0 \text{ yoki } \text{div} \underline{H} = 0; \quad \text{div} \underline{D} = \rho \text{ yoki } \text{div} \underline{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_a}.$$

Bu tenglamalar kompleks ko'rinishda quyidagicha yoziladi:

$$\text{rot} \underline{H} = j\omega \varepsilon_a \underline{E}; \quad \text{rot} \underline{E} = -j\omega \mu_a \underline{H};$$

$$\text{div} \underline{H} = 0; \quad \text{div} \underline{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_a}.$$

Dielektrikdagi elektromagnit maydon xossalari o'rganish uchun vektorning rotorini to'g'ri burchakli koordinatalar sistemasiga joylashtiramiz. Natijada quyidagini hosil qilamiz:

$$\operatorname{rot} \underline{A} = \begin{vmatrix} \underline{i} & \underline{j} & \underline{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix} = \underline{i} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + \underline{j} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \underline{k} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) =$$

$$= \operatorname{rot}_x \underline{A} + \operatorname{rot}_y \underline{A} + \operatorname{rot}_z \underline{A}.$$

Maksvellning birinchi va ikkinchi tenglamalarini to'g'ri burchakli koordinatalar sistemasida quyidagicha yozamiz:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= j\omega \varepsilon_a E_x, \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= j\omega \varepsilon_a E_y, \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= j\omega \varepsilon_a E_z. \end{aligned} \right\} \quad (16.17) \quad \left. \begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= -j\omega \mu_a H_x, \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -j\omega \mu_a H_y, \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -j\omega \mu_a H_z. \end{aligned} \right\}$$

(16.18)

Agar elektromagnit maydon z koordinata bo'ylab tarqalsa, u holda $\underline{E}$ va $\underline{H}$ vektorlar x va y koordinatalarga bog'liq bo'lmaydi va ularning bu koordinatalar bo'yicha hosilasi nolga teng bo'ladi, ya'ni:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial E}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial H}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial H}{\partial y} = 0.$$

Unda (16.17) va (16.18) tenglamalarni o'zgartirish natijasida $\underline{E}_z = 0$ va $\underline{H}_z = 0$ (16.19) larni hosil qilamiz.

(16.19) tenglamadan dielektrikdagi elektromagnit maydonning birinchi xossasini aniqlash mumkin: $\underline{E}$ va $\underline{H}$ vektorlar to'liqlar tarqalishi yo'nalishiga perpendikular tekislikda joylashgan, ya'ni elektromagnit maydon to'liqlari ko'ndalang to'liqlardir.

$\underline{E}$ va $\underline{H}$ vektorlarning o'zaro joylashishini aniqlash maqsadida $\underline{E}$ vektorni x o'qiga joylashtiramiz, ya'ni $\underline{E} = \underline{E}_x$ va $\underline{E}_y = 0$. Unda $\underline{H}_x = 0$ ekanligiga ishonch hosil qilamiz. Bu shuni ko'rsatadiki, $\underline{E}$ va $\underline{H}$ o'zaro perpendicular vektorlardir.

Elektromagnit to'liqlarning tarqalish tezligini topish uchun yana (16.17) va (16.18) tenglamalarga murojaat qilamiz. Yuqorida qayd etilgan xossalarni hisobga olsak:

$$-\frac{\partial H}{\partial z} = j\omega\varepsilon_a \underline{E}, \quad (16.20)$$

$$-\frac{\partial E}{\partial z} = j\omega\varepsilon_a \underline{H}. \quad (16.21)$$

(16.21) tenglama ikkala tomonini z bo'yicha differensiallab va unga (16.20) ni qo'yib, quyidagini yozamiz:

$$\frac{\partial^2 \underline{E}}{\partial z^2} = -\omega^2 \varepsilon_a \mu_a \underline{E}. \quad (16.22)$$

(16.22) tenglamaning xususiy yechimini $p^2 + \omega^2 \varepsilon_a \mu_a = 0$ xarakteristik tenglamani yechib topamiz:

$$p_{1,2} = \pm j\omega\sqrt{\varepsilon_a \mu_a} \quad \text{yoki} \quad (16.23)$$

$$p_{1,2} = \pm(\alpha + j\beta), \quad (16.14)$$

bu yerda α, β - mos ravishda to'qlinning so'nish va faza koeffitsiyentlari.

(16.13) va (16.14) larni o'zaro taqqoslab, ideal dielektrikda elektromagnit to'qlin so'nishsiz tarqalishini ko'ramiz. To'qlinni tarqalish tezligi $c = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_a \mu_a}}$ muhitning dielektrik va magnit xossalariga bog'liq bo'ladi.

Elektromagnit to'qlin uzunligi:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{c}{f}.$$

(16.22) differensial tenglamaning umumiy yechimi quyidagiga teng:

$$\underline{E} = \underline{A}_1 e^{p_1 z} + \underline{A}_2 e^{p_2 z}. \quad (16.25)$$

(16.25) ni (16.21) ga qo'yib, undan magnit maydoni kuchlanganligini topamiz:

$$\underline{H} = -\sqrt{\frac{\varepsilon_a}{\mu_a}} \underline{A}_1 e^{p_1 z} + \sqrt{\frac{\varepsilon_a}{\mu_a}} \underline{A}_2 e^{p_2 z}. \quad (16.26)$$

Yuqoridagi ifodani hisobga olib to'g'ri to'qlin uchun:

$$\underline{E} = \underline{A}_2 e^{p_2 z} = \underline{A}_2 e^{-j\omega\sqrt{\mu_a \varepsilon_a} z}; \quad \underline{H} = \sqrt{\frac{\varepsilon_a}{\mu_a}} \underline{A}_2 e^{p_2 z} = \sqrt{\frac{\varepsilon_a}{\mu_a}} \underline{A}_2 e^{-j\omega\sqrt{\mu_a \varepsilon_a} z}.$$

To'qlin qarshilik:

$$\underline{Z}_T = \frac{\underline{E}}{\underline{H}} = \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}, \quad (16.27)$$

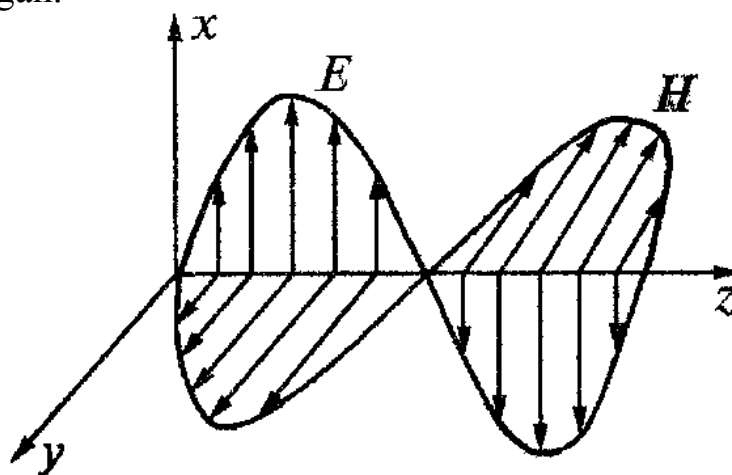
ya'ni qarshilik haqiqiy son. Bu holat energiya manbayidan uzoqda elektr va magnit maydonlari kuchlanganliklarining fazalari teng bo'lishini bildiradi.

(16.27) tenglikdan elektr va magnit maydonlari energiyalarining hajmiy zichliklari o'zaro tengligi kelib chiqadi, ya'ni: $\frac{\epsilon_a E^2}{2} = \frac{\mu_a H^2}{2}$.

(16.25) va (16.26) tengliklar asosida kuchlanganliklar oniy qiymatlari ifodalarini quyidagicha yozishimiz mumkin:

$$\begin{aligned}\underline{E} &= \sqrt{2}A_1 \sin\left(\omega t + \frac{\omega}{c}z\right) + \sqrt{2}A_2 \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c}z\right), \\ \underline{H} &= -\sqrt{2}\frac{A_1}{Z_r} \sin\left(\omega t + \frac{\omega}{c}z\right) + \sqrt{2}A_2 \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c}z\right).\end{aligned}$$

$\underline{E}$ va $\underline{H}$ kuchlanganliklar oniy qiymatlarining fazoviy tasviri 16.4-rasmda ko'rsatilgan.



16.4- rasm

2. *Isrofli(real) dielektrik muhitda o'zgaruvchan elektromagnit maydon.* Real dielektrikda solishtirma o'tkazuvchanlik nolga teng emas va Maksvell tenglamalari quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\text{rot}\underline{H} = \gamma\underline{E} + j\omega\epsilon_a\underline{E}; \quad \text{rot}\underline{E} = -j\omega\mu_a\underline{H};$$

$$\text{div}\underline{H} = 0; \quad \text{div}\underline{E} = \frac{\rho}{\epsilon_a}.$$

Ideal dielektrikdan farqli ravishda real dielektrikda tok nafaqat siljish tokidan, balki o'tkazuvchanlik tokidan ham tashkil topadi. Shuning uchun dielektrikdagi tok zichligi:

$$\underline{\delta} = \underline{\delta}_0 + \underline{\delta}_s = \gamma\underline{E} + j\omega\epsilon_0\epsilon_0'\underline{E} = (\gamma + j\omega\epsilon_0\epsilon_0')\underline{E} = \underline{\gamma}_0\underline{E}, \quad (16.28)$$

bu yerda $\underline{\gamma}_0$ - kompleks elektr o'tkazuvchanlik; $\underline{\delta}_0$ - o'tkazuvchi muhitning dielektrik singdiruvchanligi.

(16.28) tenglamani quyidagicha o'zgartiramiz:

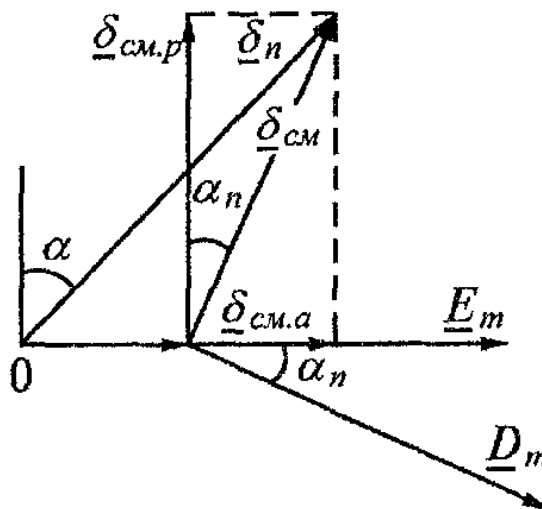
$$\underline{\delta} = j\omega\varepsilon_0 \left(\varepsilon_0' - \frac{j\gamma}{\omega\varepsilon_0} \right) \underline{E} = j\omega\varepsilon_0 \underline{\varepsilon} \underline{E}, \quad (16.29)$$

bunda $\underline{\varepsilon} = \varepsilon_0' - \frac{j\gamma}{\omega\varepsilon_0} = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon''(1 - j\tg\alpha)$ - to'la kompleks dielektrik singdiruvchanlik, $\tg\alpha = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ - dielektrikdagi to'la isrof burchagining tangensi.

(16.28) va (16.29) larni o'zaro tenglashtirib, quyidagi tenglikni yozishimiz mumkin:

$$\underline{\gamma}_0 = j\omega\varepsilon_0 \underline{\varepsilon}.$$

16.5- rasmda tok zichliklarining vektor diagrammasi (16.28) tenglama asosida qurilgan. Diagrammada $\underline{\delta} = \gamma \underline{E}$ - o'tkazuvchanlik tokining zichligi;



16.5- rasm

$\underline{\delta}_s = j\omega\varepsilon_0 \underline{\varepsilon}_0 \underline{E}$ - siljish tokining zichligi. Diagrammadan ko'rinib turibdiki, to'la isrof burchagi α_κ burchakdan katta, chunki to'la isrof burchagi o'tkazuvchanlik va qutblanish toklari tufayli yuzaga keladigan issiqlik isroflarini hisobga oladi.

Real dielektrikda elektromagnit to'liqin parametrlari quyidagicha: tarqalish koeffitsiyenti:

$$\underline{\Gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu_a(\gamma + j\omega\varepsilon_a)};$$

so'nish koeffitsiyenti:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon'}{2} (\sqrt{1 + \tg^2 \alpha} - 1)};$$

faza koeffitsiyenti:

$$\beta = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{\gamma^2}{\omega^2 \varepsilon_a^2} + 1} - 1 \right)}$$

yoki

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu_0 \mu \varepsilon_0 \varepsilon}{2} (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} + 1)};$$

to'liq qarshiligi:

$$\underline{Z}_T = Z_T e^{j\varphi_T} = \frac{j\omega\mu_a}{\underline{\gamma}};$$

to'liq uzunligi: $\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{c}{f};$

fazaviy tezlik: $c = \frac{\omega}{\beta} = \lambda f.$

16.6. O'tkazuvchi muhitda o'zgaruvchan elektromagnit maydon

Elektr o'tkazuvchi muhitda siljish toki hisobga olmaslik darajada kichik bo'ladi. Shuning uchun Maksvell tenglamalari quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\operatorname{rot} \underline{H} = \gamma \underline{E}; \quad \operatorname{rot} \underline{E} = -j\omega\mu_a \underline{H}; \quad \operatorname{div} \underline{H} = 0; \quad \operatorname{div} \underline{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_a}.$$

Bu differensial tenglamalarni magnit maydoni kuchlanganligiga nisbatan birgalikda yozilgan ifodasi to'g'ri burchakli koordinatalar sistemasida quyidagiga teng bo'ladi:

$$\frac{\partial^2 \underline{H}}{\partial z^2} = j\omega\mu_a \gamma \underline{H}.$$

Yuqoridagi differensial tenglamaga mos keluvchi xarakteristik tenglama $p^2 = j\omega^2 \mu_a \gamma$ ildizlari $p_{1,2} = \pm \sqrt{j\omega\mu_a \gamma}$, uning umumiy yechimi esa $\underline{H} = \underline{A}_1 e^{p_1 z} + \underline{A}_2 e^{p_2 z}$ ko'rinishda yoziladi.

$p_1 > 0$ bo'lganligi sababli $\underline{A}_1 = 0$ va $z = 0$ chegaraviy holatda $\underline{A}_2 = \underline{H}(0) = \underline{H} e^{j\psi}$ bo'ladi.

Yuqoridagi ifodani nazarda tutib $\underline{H} = H_0 e^{j\psi} e^{p_2 z}$ ni hosil qilamiz.

$\sqrt{j} = e^{j\frac{\pi}{4}} = \frac{\sqrt{2}}{2} + j \frac{\sqrt{2}}{2}$ bo'lganligi sababli, tenglamaning ikkinchi ildizi quyidagi ko'rinishda yozilishi mumkin:

$$p_2 = \sqrt{j\omega\mu_a\gamma} = \sqrt{\frac{\omega\mu_a\gamma}{2}} + j\sqrt{\frac{\omega\mu_a\gamma}{2}} = \alpha + j\beta,$$

ya'ni: $\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu_a\gamma}{2}}.$

Magnit maydonining kuchlanganligi:

$$\underline{H} = H_0 e^{j\psi} e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} = H_0 e^{-\alpha z + j(\psi - \beta z)},$$

uning oniy qiymati esa:

$$H = \sqrt{2} H_0 e^{-\alpha z} \sin(\omega t + \psi - \beta z).$$

Elektr maydonining kuchlanganligi:

$$\underline{E} = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial H}{\partial z} = \sqrt{\frac{\omega\mu_a}{\gamma}} H_0 e^{-\alpha z} e^{j\left(\varphi + \frac{\pi}{4} - \beta z\right)},$$

uning oniy qiymati:

$$H = \sqrt{2} \sqrt{\frac{\omega\mu_a}{\gamma}} H_0 e^{-\alpha z} \sin(\omega t + \psi + 45^\circ - \beta z).$$

Yuqoridagi tenglamalar tahlilidan quyidagi xulosalarni chiqarish mumkin:

1. Dielektrik muhitdan farqli o'laroq o'tkazgich muhitda maydon kuchlanganligi muhit ichiga kirib borish mobaynida eksponensial qonun bilan kamayib boradi.

2. Maydon kuchlanganliklarining boshlang'ich fazalari z koordinatasi bo'yicha o'zgaradi, elektr maydoni kuchlanganligi istalgan nuqtada magnit maydoni kuchlanganligidan faza jihatdan 45° ga oldinda bo'ladi.

3. Bir to'lqin uzunligi davomida to'lqin fazasi $\beta z = \beta \lambda = \beta \frac{2\pi}{\beta} = 2\pi$ ga o'zgaradi.

O'tkazgich muhitdagi elektromagnit to'lqinning parametrlari quyidagicha:

to'lqin qarshiligi: $\underline{Z}_T = \sqrt{\frac{\omega\mu_a}{\gamma}} e^{j\frac{\pi}{4}};$

to'lqin uzunligi: $\lambda = 2\sqrt{\frac{\pi}{f\mu_a\gamma}};$

fazaviy tezligi: $\vartheta = 2\sqrt{\frac{f\pi}{\mu_a\gamma}};$

to'lqinni muhitga kirish chuqurligi:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_a\gamma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu_a\gamma}}.$$

Muhit sirtidan $z = \delta$ chuqurlikda elektr va magnit maydonlari kuchlanganliklarining amplitudalari $e = 2,71$ martaga kamayadi. $z = \lambda$ chuqurlikda esa kuchlanganliklar $e^{-\alpha z} = e^{-\alpha\lambda} = e^{-2\pi} = \frac{1}{e^{6,28}} = \frac{1}{534}$, ya'ni 534 marta kamayadi.

Amalda esa, o'tkazgich muhitga to'liq $0,5\lambda$ dan kichikroq chuqurlikkacha kirib boradi.

Nazorat savollari

1. Elektromagnit maydonni tavsiflovchi kattalik va munosabatlarni ayting. 2. Bir jinsli va izotrop muhit deganda nimani tushunasiz. 3. To'la tok qonunining umumlashgan ifodasi nimani bildiradi? 4. Elektromagnit induksiya qonunining fizik ma'nosini tushuntirib bering. 5. Magnit oqimining uzluksizligi prinsipini yozing va fizik ma'nosini tushuntirib bering. 6. Maksvell tenglamalarini yozing va tushuntirib bering. 7. Umov-Poynting teoremasi elektromagnit maydondagi qanday munosabatlarni tavsiflaydi? Poynting vektorining fizik ma'nosini bayon eting.

Nazariy elektrotexnikaga oid asosiy atamalar va tushunchalar izohli lug'ati (Glossariy)

1. **Elektromagnit maydon** – **электромагнитное поле** - **electromagnetic field** - barcha nuqtalarining elektr va magnit xossalari mos ravishda ikkita - elektr maydoni kuchlanganligi va magnit maydoni kuchlanganligi kabi vektor kattalik bilan aniqlanadigan, birining o'zgarishi ikkinchisini vujudga keltiradigan hamda elektr zaryadlangan zarrachalarga ularning tezligi va elektr zaryadi kattaligiga bog'liq bo'lgan kuch bilan ta'sir ko'rsatadigan materiyaning maxsus turi.

2. **Elektr maydoni** – **электрическое поле** - **electric field** - elektr zaryadi atrofida va magnit maydonining o'zgarishi tufayli hosil bo'ladigan, elektr zaryadlangan qo'zg'almas zarracha(jism)ga uning elektr zaryadiga proporsional bo'lgan, ammo tezligiga bog'liq bo'lmagan kuch bilan tavsiflanadigan elektromagnit maydon ikki tomonining biri.

3. **Magnit maydoni** – **магнитное поле** - **magnetic field** - elektr zaryadlangan zarracha(jism) harakati va elektr maydonining o'zgarishi tufayli hosil bo'ladigan, harakatlanayotgan elektr zaryadlangan zarracha(jism)ga uning elektr zaryadi va tezligiga proporsional bo'lgan kuch bilan tavsiflanadigan elektromagnit maydon ikki tomoninning biri.

4. **Elementar elektr zaryadi** – **элементарный электрический заряд** - **elementary electric charge** - Elektron va proton xususiy elektr maydonlarining o'zaro ta'siri va ularni tashqi elektr maydoni bilan o'zaro aloqasini tavsiflovchi xossa bo'lib, elektron va protonlar uchun ularning qiymatlari o'zaro teng, yo'nalishlari esa qarama-qarshi.

5. **Elektr zaryadi tashuvchisi** - **носитель электрического заряда** - **medium electrical charge** - soni va ishorasi turlicha bo'lgan elementar elektr zaryadlaridan iborat zarracha.

6. **Jism[jismlar tizimi] elektr zaryadi** - **электрический заряд тела [системы тел]** - **the electric charge of the body [the system of bodies]** - jism[jismlar tizimi]dagi elementar elektr zaryadlari qiymatlarining algebraik yig'indisiga teng bo'lgan skalyar kattalik.

7. **Elektromagnit energiya** – **электромагнитная энергия** - **electromagnetic energy** - elektr va magnit maydonlari energiyalari yig'indisidan iborat bo'lgan energiya.

8. **Elektr toki** – **электрический ток** - **electric current** - elektr zaryadlari tashuvchilarining yo'naltirilgan harakati va (yoki) elektr maydonining o'zgarishi hodisasi bo'lib, bunda magnit maydoni hosil bo'lishi kuzatiladi.

9. Lorens kuchi – сила Лоренца - Lorentz force - elektromagnit maydonda harakatlanayotgan elektr zaryadlangan zarrachaga shu maydon tomonidan ta'sir qiladigan kuchni tavsiflovchi vektor kattalik.

Eslatma – Lorens kuchi ikkita: elektr maydoni ta'sirida yuzaga keladigan va zaryadlangan zarracha tezligiga bog'liq bo'lmagan tashkil etuvchisi va magnit maydoni tomonidan ta'sir ko'rsatadigan va zaryadlangan zarracha tezligiga bog'liq bo'lgan tashkil etuvchidan iborat.

10. Elektr maydoni kuchlanganligi - напряженность электрического поля - electric field intensity - elektr maydonini tavsiflovchi vektor kattalik bo'lib, elektr maydoni tomonidan zaryadlangan zarrachaga ta'sir qiladigan kuch bilan aniqlanadi.

Eslatma – elektr maydoni kuchlanganligi son jihatidan zaryadlangan zarrachaga elektr maydoni tomonidan ta'sir qilayotgan kuchni shu zarracha zaryadiga nisbatiga teng, ya'ni: $E = \frac{F}{q}$, $\left[\frac{N}{C} = \frac{V}{m}\right]$; yo'nalishi esa musbat zaryadlangan zarrachaga elektr maydoni tomonidan ta'sir etayotgan kuch yo'nalishiga mos bo'ladi.

11. Magnit induksiya - магнитная индукция - magnetic induction - magnit maydonini tavsiflovchi vektor kattalik bo'lib, magnit maydoni tomonidan zaryadlangan zarrachaga ta'sir qiladigan kuch bilan aniqlanadi.

Eslatma: magnit maydoni induksiya son jihatidan zaryadlangan zarrachaga magnit maydoni tomonidan ta'sir qilayotgan maksimal kuch (F) ni shu zarracha zaryadi (q) va tezligi (v) ga ko'paytmasiga nisbatiga teng, ya'ni: $B = \frac{F}{qv}$, [T]; yo'nalishi esa kuch va tezlik vektorlariga perpendikulyar bo'lib, o'ng parmaning buralish yo'nalishi kuch vektori yo'nalishidan musbat elektr zaryadlarining harakat tezligi vektori yo'nalishi tomonga buralsa, parma ilgarilanma harakati induksiya vektori yo'nalishini ko'rsatadi.

12. Magnit oqimi - магнитный поток - magnetic flux – magnit maydoni induksiya oqimiga teng bo'lgan skalyar kattalik.

13. Magnit oqimi kvanti – квант магнитного потока - the magnetic flux quantum - son qiymati Plank doimiysini ikkilangan elektron zaryadi nisbatiga teng bo'lgan magnit oqimi.

Eslatma: xalqaro birliklar tizimida bu kattalik taxminan $2,06783 \cdot 10^{-10}$ Vb ga teng.

14. Magnit doimiysi - магнитная постоянная - magnetic constant - Xalqaro birliklar tizimidagi bir qator munosabatlarda foydalaniladigan: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{H}{m}\right]$.

15. Elektr doimiysi - электрическая постоянная - electric constant – Xalqaro birliklar tizimidagi ba'zi bir munosabatlarda qo'llaniladigan va kattaligi magnit doimiysini yorug'likning vakuumdagi tezligiga ko'paytmasiga teskari qiymatiga teng bo'lgan koeffitsiyent.

Eslatma – elektr doimiysi taxminan $\epsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12} \left[\frac{F}{m}\right]$ ga teng.

16. **Poynting vektori** – вектор Пойнтинга - **Poyntings vector** - vektor kattalik bo'lib, uning oqimi oniy elektromagnit quvvati biror sirtidan orqali o'tuvchi elektr maydoni kuchlanganligi ($\underline{E}$) va magnit maydoni kuchlanganligi ($\underline{H}$) vektor ko'paytmasiga teng, ya'ni: $\underline{P} = [\underline{E} \underline{H}]$.

17. **Elektr zaryadining hajm zichligi** - объемная плотность электрического заряда - **bulk density of electric charge** - elektr zaryadlarini fazoda taqsimlanishini tavsiflovchi skalyar kattalik bo'lib, u son jihatdan elektr zaryadini shu zaryad joylashgan element hajmiga nisbatini element hajmi yuzasi va uning barcha o'lchamlari nolga intilgandagi limitiga teng, ya'ni: $\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V} = \frac{dq}{dV}, [\frac{C}{m^3}]$.

18. **Elektr zaryadining sirt zichligi** - поверхностная плотность электрического заряда - **the surface density of electric charge** - elektr zaryadlarini jism sirti bo'ylab taqsimlanishini tavsiflovchi skalyar kattalik bo'lib, u son jihatdan elektr zaryadini shu zaryad joylashgan sirt elementi yuzasiga nisbatini sirt elementi yuzasi va uning barcha o'lchamlari nolga intilgandagi limitiga teng, ya'ni: $\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} = \frac{dq}{ds}, [\frac{C}{m^2}]$.

19. **Elektr zaryadining chiziqli zichligi** – линейная плотность электрического заряда - **linear density of electric charge** - elektr zaryadlarini liniya bo'ylab taqsimlanishini tavsiflovchi skalyar kattalik bo'lib, u son jihatdan elektr zaryadini shu zaryad joylashgan liniya elementiga nisbatini liniya elementi uzunligi nolga intilgandagi limitiga teng, ya'ni: $\tau = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{dq}{dl}, [\frac{C}{m}]$.

20. **Elektrostatik induksiya** – электростатическая индукция - **electrostatic induction** - elektrostatik maydon ta'sirida o'tkazuvchi jism ayrim qismlarida elektr zaryadlarining paydo bo'lishi.

21. **Tashqi kuch** – сторонняя сила - **indirect force** - elektr zaryadlangan zarrachaga ta'sir qilayotgan makroskopik nuqtai nazardan qaralayotgan noelektromagnit jarayonlar natijasida paydo bo'lgan kuch.

22. **Tashqi maydon** – стороннее поле – **the field** - tashqi kuch elektr maydoni bo'lib, uning kuchlanganligi elektr zaryadlangan zarrachaga ta'sir etayotgan tashqi kuchni zarracha elektr zaryadiga teng, ya'ni: $E_t = \frac{F_t}{q}, [\frac{N}{C}]$

23. **Induksiyalangan elektr maydoni** – индуцированное электрическое поле - **the induction electric field** – magnit maydonining vaqt bo'yicha o'zgarishi natijasida yuzaga keladigan elektr maydoni.

24. **Elektrostatik maydon** – электростатическое поле - **electrostatic field** - zaryadlangan va o'zidan elektr toklari o'tmayotgan qo'zg'almas jismlar elektr maydoni.

25. **Statsionar elektr maydoni** - стационарное электрическое поле - **stationary electrical field** - qo'zg'almas o'tkazgichdan o'tayotgan vaqt bo'yicha o'zgarmaydigan elektr tokining elektr maydoni.

26. **Uyurmasiz elektr maydoni** - безвихревое электрическое поле - **irrotational electric field** - kuchlanganligining rotori uning barcha nuqtalarida nolga teng bo'lgan elektr maydoni.

27. **Uyurmaviy elektr maydoni** – вихревое электрическое поле - **vortex electric field** - kuchlanganligining rotori uning barcha nuqtalarida nolga teng bo'lmagan elektr maydoni.

28. **Elektr yurituvchi kuch** – электродвижущая сила; ЭДС - **electromotive force; EMF** - tashqi maydon va induksiyalangan elektr maydonini elektr toki hosil qilish qobiliyatini tavsiflovchi skalyar kattalik.

Eslatma: elektr yurituvchi kuch tashqi maydon va induksiyalangan elektr maydoni kuchlanganligidan qaralayotgan maydonning ikki nuqtasi yoki berk kontur bo'ylab olingan chiziqli integralga teng, ya'ni: $e = \int_1^2 \underline{E} d\underline{l}$ yoki $e = \oint \underline{E} d\underline{l}$; kontur elementi harakatlanayotgan holat uchun induksiyalangan elektr maydonining kuchlanganligi Lorens kuchini hisobga olgan holda aniqlanadi.

29. **Elektr kuchlanish** – электрическое напряжение – **voltage** - ko'rilayotgan yo'l bo'ylab elektr maydoni kuchlanganligi (E) dan olingan chiziqli integralga teng bo'lgan skalyar kattalik, ya'ni: $U_{12} = \int_{r_1}^{r_2} \underline{E} d\underline{l}$, V , bu yerda r_1 va r_2 – maydonning 1 va 2 nuqtalari radius-vektorlari; $d\underline{l}$ – yo'lning cheksiz kichik elementi.

30. **Elektr potentsiallar ayirmasi** - разность электрических потенциалов - **electrical potential difference** - uyurmasiz elektr maydonining elektr kuchlanishi bo'lib, uning kattaligi tanlanayotgan integrallash yo'liga bog'liq emas.

31. **Elektr maydoni berilgan nuqtaning elektr potentsiali** электрический потенциал данной точки - **the electric potential of the point** - elektr maydonining berilgan nuqtasi va uning boshqa ixtiyoriy tanlangan nuqtasi elektr potentsiallari ayirmasi.

32. **Elektr [magnit] maydoni kuch chizig'i** – силовая линия электрического [магнитного] поля - **power line electric [magnetic] field** - har bir nuqtasiga o'tkazilgan urinma yo'nalishi bo'yicha elektr[magnit] maydoni kuchlanganligi [magnit induksiyasi] yo'nalishiga mos bo'lgan fazodagi liniya.

33. **Elektr dipol** – электрический диполь - **electric dipole** - orasidagi masofa zarrachalar o'lchamlaridan ancha katta, shu zarrachalardan ularni kuzatish nuqtasigacha bo'lgan masofadan esa ancha kichik bo'lgan va elektr zaryadlari absolyut qiymatlari jihatdan o'zaro

teng, ishoralari jihatdan esa qarama-qarshi bo'lgan ikkita zarracha majmuasi.

34. **Elektr dipol elektr momenti** – **электрический момент электрического диполя** - **electric moment of electric dipole** - elektr dipol absolyut zaryadlaridan bittasi va dipolni hosil qiladigan zarrachalar orasidagi masofalar ko'paytmasiga teng bo'lgan va yo'nalishi manfiy zaryadlangan zarrachadan musbat zaryadlangan zarracha tomon yo'naltirilgan vektor kattalik.

35. **Jism[modda berilgan hajmi]ning elektr momenti** – **электрический момент тела [данного объема вещества]** - **electric moment of the body [of the volume of material]** - berilgan jism[modda berilgan hajmi] tarkibidagi barcha elektr dipollari elektr momentlarining geometrik yig'indisiga teng bo'lgan vektor kattalik.

36. **Elektr qutblanish** – **электрическая поляризация** - **electric polarization** - moddaning ma'lum hajmidagi elektr momenti noldan farqli bo'lgan holati.

37. **Dielektrik** – **диэлектрик** – **insulator** - asosiy xususiyati elektr maydonida qutblanish bo'lgan modda.

38. **Elektr qutblanganlik** - **электрическая поляризованность** - **electric polarization** - modda elektr qutblanganlik darajasini tavsiflovchi kattalik bo'lib, uning hajm elementi bilan bog'langan elektr momentini shu element hajmiga nisbatini hajm elementi nolga intilgandagi limitiga teng bo'lgan vektor kattalik ya'ni: $\underline{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}, [\frac{C}{m^2}]$.

39. **Elektr siljish** – **электрическое смещение** - **electric displacement** - elektr maydonining ko'rilayotgan nuqtasidagi kuchlanganligi (E) ni elektr doimiysi (ϵ_0) ga ko'paytmasi va maydon shu nuqtasidagi elektr qutblanganlik (P) vektor yig'indisiga teng bo'lgan vektor kattalik, ya'ni: $\underline{D} = \epsilon_0 \underline{E} + \underline{P}, [\frac{C}{m^2}]$.

40. **Elektr siljish oqimi** – **поток электрического смещения** - **flow of electric displacement** - ko'rilayotgan sirt orqali o'tayotgan elektr siljishdan yuza bo'yicha olingan integralga teng bo'lgan skalyar kattalik, ya'ni: $\int_S \underline{D} d\mathbf{s}$.

41. **O'tkazgich elektr sig'imi** – **электрическая емкость проводника** - **electric capacity of a conductor** - o'tkazgichning elektr zaryadini to'plash qobiliyatini tavsiflovchi skalyar kattalik bo'lib, uning kattaligi o'tkazgich elektr zaryadini uning elektr potensialiga nisbati bilan aniqlanadi, ya'ni: $C = \frac{q}{U}, [F]$, bunda qaralayotgan o'tkazgich atrofidagi boshqa o'tkazgichlar undan cheksiz uzoqlikda va cheksiz uzoqlikdagi

nuqta potentsiali nolga teng deb, qabul qilinadi.

42. **Ikkita o'tkazgich orasidagi elektr sig'imi** – **электрическая емкость между двумя проводниками** - **electrical capacitance between two conductors** - bitta o'tkazgich elektr zaryadi (q) ni ikkala o'tkazgich orasidagi potentsiallar ayirmasi ($\varphi_1 - \varphi_2$) ning absolyut qiymatiga nisbatiga teng bo'lgan skalyar kattalik, ya'ni: $C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$, $[F]$, bunda o'tkazgichlardagi zaryadlar miqdori o'zaro teng, ishorasi esa qarama-qarshi va boshqa barcha o'tkazgichlar ulardan cheksi uzoqlikda deb, qabul qilinadi.

43. **O'tkazuvchanlik elektr toki** – **электрический ток проводимости** - **electric conduction current** - elektr zaryadlari erkin tashuvchilarining o'tkazuvchi muhit yoki vakuumdagi yo'naltirilgan harakati hodisasi bo'lib, u son jihatdan ko'rilayotgan yuza orqali elektr zaryadlarining erkin tashuvchilari olib o'tayotgan zaryad (q) ning vaqt bo'yicha hosilasiga teng bo'lgan skalyar kattalik bilan tavsiflanadi, ya'ni: $i_{ov} = \frac{dq}{dt}$, $[A]$.

44. **Ko'chish elektr toki** – **электрический ток переноса** - **electric transfers current** - zaryadlangan jismlarning ko'chishi natijasida yuzaga keladigan elektr toki bo'lib, u son jihatdan ko'rilayotgan yuza orqali o'tayotgan zaryadlangan jismlar elektr zaryadi (q_j) ning vaqt bo'yicha hosilasiga teng bo'lgan skalyar kattalik bilan tavsiflanadi, ya'ni: $i_k = \frac{dq_j}{dt}$, $[A]$.

45. **Qutblanish elektr toki** – **электрический ток поляризации** – **electric current polarization** – dielektrikdagi bog'langan zaryadlangan zarrachalar dielektrik qutblanishining o'zgarishi natijasida harakatlanishi hodisasi bo'lib, u son jihatdan dielektrik qutblanishining o'zgarishida ko'rilayotgan yuzani kesib o'tayotgan zarrachalar elektr zaryadlari absolyut qiymatlari yig'indisi ($\sum q$) ning vaqt bo'yicha hosilasiga teng bo'lgan skalyar kattalik bilan tavsiflanadi, ya'ni: $i_q = \frac{d\sum q}{dt}$, $[A]$.

46. **Vakuumdagi siljish elektr toki** – **электрический ток смещения в пустоте** - **electric displacement current in a vacuum** - elektr maydonining vakuumda o'zgarish hodisasi bo'lib, u son jihatdan vakuumda ko'rilayotgan yuza orqali o'tayotgan elektr siljishi oqimining vaqt bo'yicha hosilasiga teng bo'lgan skalyar kattalik bilan tavsiflanadi, ya'ni: $i_{sv} = \frac{dD_v}{dt}$, $[A]$.

47. **Siljish elektr toki** – **электрический ток смещения** - **electric bias current** - vakuumdagi siljish toki va qutblanish elektr toki yig'indisi

bo'lib, u son jihatdan ko'rilayotgan yuzadan o'tayotgan elektr siljish oqimining vaqt bo'yicha hosilasiga teng bo'lgan skalyar kattalik bilan tavsiflanadi, ya'ni: $i_s = \frac{dD}{dt}$, [A].

48. **To'la elektr toki** – **-полный ток- total current** - ko'rilayotgan yuza orqali o'tayotgan o'tkazuvchanlik ($i_{o'}$), ko'chish (i_k) va siljish (i_s) elektr toklarining yig'indisiga teng bo'lgan skalyar kattalik, ya'ni: $i_t = i_{o'} + i_k + i_s$, [A].

49. **O'tkazuvchanlik[ko'chish] elektr toki zichligi** – **плотность электрического тока проводимости [переноса] – electric conduction current density** – elektr zaryadlari tashuvchilari harakati yo'nalishiga perpendikulyar bo'lgan biron yuza elementi orqali o'tayotgan o'tkazuvchanlik[ko'chish] elektr tokining shu yuzaga nisbatini yuza elementi o'lchamlari nolga intilgandagi limitiga teng bo'lgan vektor kattalik, ya'ni: $\underline{\delta}_{o'} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta i_{o'}}{\Delta s} = \frac{di_{o'}}{ds}$, $\frac{A}{m^2}$
 $[\underline{\delta}_k = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta i_k}{\Delta s} = \frac{di_k}{ds}$, $[\frac{A}{m^2}]]$.

Eslatma: o'tkazuvchanlik[ko'chish] elektr toki zichligi yo'nalishi musbat zaryadlangan zarrachalar harakati yo'nalishiga mos yoki manfiy zaryadlangan zarrachalar yo'nalishiga qarama-qarshi bo'ladi.

50. **Siljish elektr toki zichligi** – **плотность электрического тока смещения - density of electric displacement current** – elektr siljishining vaqt bo'yicha hosilasiga teng bo'lgan vektor kattalik, ya'ni: $\underline{\delta}_s = \frac{dD}{dt}$, $[\frac{A}{m^2}]$.

51. **Qutblanish elektr tokining zichligi** – **плотность электрического тока поляризации - electric polarization current density** – qutblanganlikning vaqt bo'yicha hosilasiga teng, ya'ni: $\delta_q = \frac{dP}{dt}$, $[\frac{A}{m^2}]$.

52. **Elektr toki zichligi** – **плотность электрического тока – electric current density** – o'tkazuvchanlik ($\underline{\delta}_{o'}$), ko'chish($\underline{\delta}_s$) va siljish($\underline{\delta}_k$) toklarining mos ravishda zichliklari yig'indisiga teng bo'lgan vektor kattalik, ya'ni: $\underline{\delta}_t = \underline{\delta}_{o'} + \underline{\delta}_s + \underline{\delta}_k$, $[\frac{A}{m^2}]$.

53. **Elektr toki elementi** - **элемент электрического тока - Element of electric current** – uzun o'tkazgich bo'ylab o'tayotgan o'tkazuvchanlik toki($i_{o'}$)ni o'tkazgich cheksiz kichik kesmasi(Δl)ga ko'paytmasi bilan aniqlanadigan vektor kattalik, ya'ni: $\Delta i_{o'} = i_{o'} \Delta l$.

54. **Elektr tokining chiziqli zichligi** - **линейная плотность электрического тока - linear current density** – jism sirtining yuqqa

qatlamidan o'tayotgan o'tkazuvchanlik tokining shu qatlam qalinligiga ko'paytmasini qatlam qalinlik o'lchami nolga intilgandagi limitiga teng bo'lgan vektor kattalik, ya'ni: $\underline{\tau} = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta i}{\Delta l} = \frac{di}{dl}, [\frac{A}{m}]$.

55. **Elektr tokining elementar konturi** – элементарный контур электрического тока – **elementary circuit of electric current** –

elektr toki o'tadigan va o'lchamlari kuzatish nuqtasidan ungacha bo'lgan masofa o'lchamidan juda kichik bo'lgan kontur.

56. **Uyurmaviy elektr toklari** – -вихревые электрические токи – **eddy currents** – elektromagnit induksiya hisobidan o'tkazgich muhitda uning berk konturi bo'ylab hosil bo'ladigan elektr toklar.

57. **Elektr o'tkazuvchanlik** – электропроводность - **electrical conductivity** – moddaning vaqt bo'yicha o'zgarmaydigan elektr maydoni ta'sirida vaqt bo'yicha o'zgarmaydigan elektr tokini o'tkazish xossasi.

58. **O'tkazgich** – проводник – **conductor** - asosiy elektr xossasi elektr o'tkazuvchanlik bo'lgan modda.

59. **Yarim o'tkazgich** – полупроводник - **semiconductor** -asosiy elektr xossalardan biri elektr o'tkazuvchanligining tashqi omillar ta'siriga kuchli bog'liq bo'lgan modda.

60. **O'ta o'tkazgich** - сверхпроводник – **superconductor** – asosiy xossalardan biri ma'lum sharoitlarda o'ta o'tkazuvchanlik holatida bo'lish qobiliyatiga ega bo'lgan modda.

61. **Magnit dipoli** – магнитный диполь – **magnetic dipole** - o'zining geometrik o'lchamlariga nisbatan katta masofalarda elektr toki elementar konturining magnit maydoniga o'xshash magnit maydonini hosil qiladigan istalgan elementar hajm.

62. **Magnit dipoli magnit momenti** - -магнитный момент магнитного диполя – **magnetic moment of magnetic dipole** – elektr tokining elementar konturi bilan uyushgan (assotsiatsiyalangan) magnit dipolining vektor kattaligi bo'lib, u elektr tokining shu tok o'tayotgan kontur chegaralab turgan sirt yuzasiga ko'paytmasiga teng, bunda magnit momentining yo'nalishi kontur yuzasiga perpendikulyar yo'nalgan va tok yo'nalishi bilan o'ng parma qoidasi bilan bog'langan.

63. **Jism magnit momenti** – -магнитный момент тела – **magnetic moment of the body** – ko'rilayotgan jismdagi barcha magnit dipollari magnit momentlarining geometrik yig'indisiga teng bo'lgan vektor kattalik.

64. **Magnitlanganlik** - намагниченность – **magnetization** – modda magnit holatini tavsiflovchi vektor kattalik bo'lib, u son jihatdan moddaning hajm elementi bilan bog'langan magnit momentni shu element

hajmiga nisbatini modda hajmi va uning elementi barcha o'lchamlari nolga intilgandagi limitiga teng, ya'ni: $M = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}, [\frac{A}{m}]$.

65 **Magnitlash** – намагничивание – **magnetization** – moddada magnitlanishni hosil qilinishi.

66.. **Magnetik** – магнетик – **magnet** – asosiy xossasi magnitlanishdan iborat bo'lgan modda.

67. **Magnit maydonining kuchlanganligi** – напряженность магнитного поля – **magnetic field** – magnit maydoni induksiyasini magnit doimiysiga nisbati va magnitlanish geometrik ayirmasiga teng bo'lgan vektor kattalik, ya'ni: $\underline{H} = \frac{\underline{B}}{\mu_0} - \underline{M}, [\frac{A}{m}]$.

68. **Magnit yurituvchi kuch (kontur bo'ylab)** -магнитодвижущая сила вдоль контура – **magnetomotive force along the contour** – magnit maydoni kuchlanganligining ko'rilayotgan kontur bo'ylab chiziqli integraliga va shu kontur bilan chegaralanib turgan yuzadan o'tayotgan to'la tokka teng bo'lgan vektor kattalik, ya'ni: $F = \oint_l \underline{H} d\underline{l} = i, [A]$.

69. **Skalyar magnit potentsiallar ayirmasi** - разность скалярных магнитных потенциалов – **difference between the magnetic scalar potential** – elektr toki zichligi nolga teng bo'lgan yo'l uchastkasining ikkita nuqtasi orasidagi magnit maydoni kuchlanganligining chiziqli integraliga teng bo'lgan skalyar kattalik.

70. **Skalyar magnit potentsial** – скалярный магнитный потенциал – **scalar magnetic potential** – magnit maydonining berilgan nuqtasi va uning boshqa ixtiyoriy tanlangan nuqtasi magnit potentsiallari ayirmasi.

71. **Magnit potentsiali vektori** – векторный магнитный потенциал – **vector magnetic potential** – vektor kattalik bo'lib, uning rotori magnit maydoni induksiyasiga teng, ya'ni: $rot \underline{\varphi}_m = \underline{B}$.

72. **Statsionar magnit maydoni** - стационарное магнитное поле – **stationary magnetic field** – qo'zg'almas o'tkazgichdan o'tayotgan va vaqt bo'yicha o'zgarmaydigan elektr tokining magnit maydoni.

73. **Magnitostatik maydon** – магнитостатическое поле – **magnetostatic field** – qo'zg'almas magnitlangan jism magnit maydoni.

74. **Elektromagnit induksiya** – электромагнитная индукция – **electromagnetic induction** – konturni kesib o'tayotgan magnit oqimining o'zgarishi natijasida unda elektr yurituvchi kuch hosil bo'lishi hodisasi.

75. **O'zinduksiya** – самоиндукция - **self-inductance** – konturdan o'tayotgan elektr toki magnit maydonining o'zgarishi natijasida shu

konturda yuzaga keladigan elektromagnit induksiya (elektr yurituvchi kuch hosil bo'lishi).

76. **O'zaro induksiya - взаимная индукция - mutual induction** – bir konturda u bilan induktiv bog'langan boshqa konturlardagi elektr toklari magnit maydonlarining o'zgarishi natijasida yuzaga keladigan elektromagnit induksiya (elektr yurituvchi kuch hosil bo'lishi).

77. **Solishtirma elektr o'tkazuvchanlik - удельная электрическая проводимость - specific electrical conductivity** - modda elektr o'tkazuvchanligini tavsiflovchi, izotrop moddalar uchun skalyar, anizotrop moddalar uchun esa tenzor kattalik bo'lib, uni elektr maydoni kuchlanganligiga ko'paytmasi o'tkazuvchanlik elektr toki zichligiga teng, ya'ni: $\gamma \underline{E} = \underline{\delta}$.

78. **Solishtirma elektr qarshilik - удельное электрическое сопротивление - Electrical resistivity constant** - modda elektr o'tkazuvchanligini tavsiflovchi, izotrop moddalar uchun skolyar anizotrop moddalar uchun esa tenzor kattalik bo'lib, uni o'tkazuvchanlik elektr toki zichligiga ko'paytmasi elektr maydoni kuchlanganligiga teng, ya'ni: $\rho \underline{\delta} = \underline{E}$.

79. **O'ta o'tkazuvchanlik - сверхпроводимость - superconductivity** - ayrim materiallar elektr qarshiligini haroratning kritik(chegaraviy) deb ataluvchi qiymatidan pasayishi natijasida yo'qolib qolishi hodisasi.

80. **Absolyut dielektrik qabulchanlik(ta'sirchanlik, sezuvchanlik) - абсолютная диэлектрическая восприимчивость - absolute dielectric susceptibility** - dielektrikni elektr maydonida qutblanish xossasini tavsiflovchi, izotrop moddalar uchun skalyar, anizotrop moddalar uchun esa tenzor kattalik bo'lib, uni elektr maydoni kuchlanganligiga ko'paytmasi elektr qutblanishga teng, ya'ni: $\aleph \underline{E} = \underline{P}$.

81. **Dielektrik qabulchanlik(ta'sirchanlik, sezuvchanlik) - диэлектрическая восприимчивость - dielectric susceptibility** - absolyut dielektrik qabulchanligini elektr doimiysiga nisbati bilan aniqlanadigan kattalik.

82. **Dielektrik singdiruvchanlik - диэлектрическая проницаемость - dielectric permittivity** - modda dielektrik xossasini tavsiflovchi, izotrop moddalar uchun skalyar, anizotrop moddalar uchun esa tenzor kattalik bo'lib, uni elektr maydoni kuchlanganligiga ko'paytmasi elektr siljishiga teng.

83. **Nisbiy dielektrik singdiruvchanlik - относительная диэлектрическая проницаемость - relative permittivity** - modda dielektrik singdiruvchanligini elektr doimiysiga nisbatiga teng bo'lgan

kattalik.

84. **Magnit qabulchanlik(ta'sirchanlik, sezuvchanlik) - магнитная восприимчивость – magnetic susceptibility** - moddani magnit maydonida magnitlanish xossasini tavsiflovchi, izotrop moddalar uchun skalyar, anizotrop moddalar uchun esa tenzor kattalik bo'lib, uni magnit maydoni kuchlanganligiga kupaytmasi magnitlanishga teng.

85. **Magnit singdiruvchanlik - магнитная проницаемость – permeability** - modda magnit xossalarini tavsiflovchi, izotrop modda uchun skalyar, anizotrop moddalar uchun esa tenzor kattalik bo'lib, uning magnit maydoni kuchlanganligiga ko'patmasi magnit maydoni induksiyasiga teng.

86. **Nisbiy magnit sigdiruvchanlik - относительная магнитная проницаемость – relative permeability** - modda magnit singdiruvchligini magnit doimiysiga nisbati bilan aniqlanadigan kattalik.

87. **Sirt effekti - поверхностный эффект – surface effect** - o'tkazgich ichidagi elektromagnit maydonning so'nishi natijasida elektr toki zichligini o'tkazgich sirtidan uning markaziga tomon uzoqlashishida kamayishi xodisasi.

88. **Elektr zanjiri – электрическая цепь – electrical circuit** - qurilma va ob'ektlarni elektr toki o'tadigan yo'l hosil qiluvchi majmuasi bo'lib, undagi elektromagnit jarayonlar elektr yurituvchi kuch, elektr toki va elektr kuchlanishlar kabi tushunchalar yordamida tavsiflanadi.

89. **Elektr zanjiri elementi – элемент электрической цепи – element of the electrical circuit**- elektr zanjiri tarkibiga kiruvchi va unda ma'lum bir funksiyani bajaruvchi qurilma.

90. **Elektr zanjiri elementining parametri – параметр электрической цепи [элемента электрической цепи] – setting the circuit [electric element chain]** - elektr zanjiri (yoki uning elementi) biron bir xossasini sifat va son jihatdan tavsiflovchi kattalik.

91. **Elektr zanjirining ideal elementi – идеальный элемент электрической цепи – perfect electrical circuit element** - bitta parametr bilan tavsiflanadigan va abstrakt tasavvurdagi element.

92. **Elektr zanjirining chiziqli[nochiziq] elementi - линейный [нелинейный] элемент электрической цепи – linear [non-linear] element of the electrical circuit** - elektr kuchlanishlari va elektr toklari yoki (va) elektr toklari va magnit ilashish oqimlari yoki (va) elektr zaryadlari va elektr kuchlanishlari o'zaro funksional chiziqli[nochiziq] bog'langan elektr zanjiri elementi.

93. **Volt -amper xarakteristikasi – вольт -амперная**

характеристика – current-voltage characteristic - elektr zanjiri elementi qismalaridagi kuchlanishni undan o'tayotgan tokka bog'lanishi, ya'ni: $U = f(I)$.

94. **Kulon-volt xarakteristikasi – volt characteristic pendant** - kondensator zaryadini unga berilgan kuchlanishga bog'lanishi, ya'ni: $q = f(U)$.

95. **Veber-amper xarakteristikasi – Weber - voltage characteristic** - elektr zanjiri elementi yoki uchastkasi ilashish magnit oqimini elektr zanjirining o'sha yoki boshqa elementi yoki uchastkasidagi elektr tokiga funksional bog'lanishi, ya'ni: $\Psi = f(i)$.

96. **Elektr zanjirining simmetrik elementi – symmetric element electric circuit** - elektr zanjirining volt–amper, kulon–volt yoki veber–amper xarakteristikasiga ega bo'lgan elementi bo'lib, unda argument ishorasi o'zgarganda funksiya ishorasi o'zgaradi, ammo uning absolyut qiymati o'zgarasdan qoladi.

97. **Elektr zanjirining nosimmetrik elementi - несимметричный элемент электрической цепи – single-ended electrical circuit element** - elektr zanjirining volt–amper, kulon–volt yoki veber–amper xarakteristikasiga ega bo'lgan elementi bo'lib, unda argument ishorasi o'zgarganda yoki funksiya absolyut qiymati o'zgaradi yoki funksiya ishorasi o'zgaradi.

98. **Chiziqli[nochiziqli] elektr zanjiri – линейная [нелинейная] электрическая цепь – linear [Nonlinear] Circuit** - elektr kuchlanishlari va elektr toklari yoki (va) elektr toklari va magnit ilashish oqimlari yoki (va) elektr zaryadlari va elektr kuchlanishlari o'zaro funksional chiziqli [nochiziqli] bog'langan elektr zanjiri.

99. **Yig'iq parametrlı elektr zanjiri – электрическая цепь с сосредоточенными параметрами – electric circuit with lumped parameters** – elektr qarshiliklar, induktivliklar va sig'ımlar zanjir uchastkalarida yig'iq joylashgan elektr zanjiri.

100. **Tarqoq parametrlı elektr zanjirlari – электрическая цепь с распределенными параметрами – electric chain with distributed parameters** - elektr qarshiliklari, induktivliklari va sig'ımlari zanjir bo'ylab tarqoq joylashgan elektr zanjiri.

101. **Elektr zanjiri uchastkasi – -участок электрической цепи – portion electrical circuit** - elementlar to'plamidan tarkib topgan elektr zanjirining qismi.

102. **Elektr zanjiri shoxobchasi - ветвь электрической цепи – branch of the electrical circuit** - elektr zanjirining faqat bitta tok o'tadigan uchastkasi (qismi).

103. **Elektr zanjiri tuguni** - узел электрической цепи – **of the circuit assembly** - Elektr zanjirining kamida uchta shoxobchasi ulangan joyi(o'rni).

104. **Elektr ulash** - электрическое соединение – **electrical connection** - Elektr zanjirini hosil qilish uchun uning uchastkalarini o'zaro ulanishi.

105. **Elektr zanjiri uchastkalarini ketma – ket ulanishi** – последовательное -соединение –участков электрической цепи – **serial connection sections circuit** - bunda ulanishdan hosil bo'lgan elektr zanjiri orqali bitta elektr toki o'tadi.

106. **Elektr zanjiri uchastkalarini parallel ulanishi** – параллельное соединение участков электрической цепи – **parts of the electrical parallel connection chain** - bunda ko'rilayotgan elektr zanjiri uchastkalari bir juft tugunga ulanadi.

107. **Elektr zanjiri uchastkalarini aralash ulanishi** - смешанное соединение участков электрической цепи – **mixed compound sections electrical circuit** - Elektr zanjiri uchastkalarini ketma – ket va parallel ulanishi.

108. **O'zgaras tokka elektr qarshilik** – электрическое сопротивление постоянному току – **electric DC Resistance** - passiv ikki qutblik qismalaridagi o'zgaras elektr kuchlanishni undagi o'zgaras elektr tokiga nisbatiga teng bo'lgan skalyar kattalik, ya'ni: $R = \frac{U}{I}$, [Ω].

109. **Elektr o'tkazuvchanlik (o'zgaras tok uchun)** – электрическая проводимость для постоянного тока - **Electrical conductivity for DC** – passiv ikki qutblik orqali o'tayotgan o'zgaras elektr tokining uning qismalaridagi o'zgaras elektr kuchlanishga nisbatiga teng bo'lgan skalyar kattalik, ya'ni: $G = \frac{I}{U}$, [S].

110. **Rezistor** – резистор – **resistor** – elektr qarshiligidan foydalaniladigan elektr zanjirining elementi.

111. **Elektr kondensator** – электрический конденсатор – **electrical capacitor** – elektr sig'imidan foydalaniladigan elektr zanjirining elementi.

112. **Kondensator elektr sig'imi** – электрическая емкость конденсатора – **electric capacitor** – elektr kondensator elektrodleri orasidagi elektr sig'im bo'lib, u son jihatdan kondensator bitta elektrodidagi elektr zaryadi miqdorini elektrodlar orasidagi kuchlanishga nisbati yoki kondensator elektr va konstruktiv parametrlari bilan aniqlanadi, ya'ni: $C = \frac{q}{U} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d}$, [F], bu yerda $\varepsilon, \varepsilon_0$ – elektrodlar orasidagi dielektrik muhit nisbiy elektr singdiruvchanligi va elektr

doimiysi; S, d – elektrodlar aktiv yuzasi va ular orasidagi masofa, $[m^2]$, $[m]$.

113. **Ilashish magnit oqimi** – **потокосцепление** – **flux linkage** – elektr zanjiri konturi elementlari orqali ilashadigan magnit oqimlari yig'indisi, ya'ni: $\Psi = wF, [Vb]$.

114. **O'zinduksiya ilashish magnit oqimi** – **потокосцепление самоиндукции** – **self-inductance flux linkage** – elektr zanjiri elementidagi elektr toki magnit oqimining shu element orqali ilashishi, ya'ni: $\Psi = wF, [Vb]$.

115. **Induktivlik** – **собственная индуктивность** – **self-inductance** – elektr zanjiri elementi o'zinduksiya ilashish magnit oqimining shu elementdagi elektr tokiga nisbatiga teng bo'lgan skalyar kattalik bo'lib, u son jihatdan induktiv g'altak elektr, magnit va konstruktiv parametrlari orqali ham aniqlanishi mumkin, ya'ni: $L = \frac{\Psi}{i} = w^2 \mu \mu_0 \frac{S}{l}, [H]$, bu yerda μ, μ_0 – mos ravishda induktiv g'altak joylashgan muhit nisbiy magnit singdiruvchanligi va magnit doimiysi; S, l – mos ravishda magnit oqimi birlashayotgan zanjir ko'ndalang kesimi yuzasi va uning uzunligi.

116. **Induktiv g'altak** – **индуктивная катушка** – **inductive coil** – xususiy induktivligi va (yoki) uning magnit maydonidan foydalanish uchun mo'ljallangan elektr zanjirining elementi.

117. **O'zaro induksiya ilashish magnit oqimi** – **потокосцепление взаимной индукции** – **flux linkage of mutual induction** – elektr zanjiri bitta (k-) elementida uning boshqa (m-) elementidagi toklar magnit maydonlari ilashish oqimi, ya'ni: $\Psi_{km} = w_k F_{m2}, [Vb]$.

118. **O'zaro induktivlik** – **взаимная индуктивность** – **mutual inductance** – elektr zanjiri bitta (k-) elementidagi o'zaro induksiya ilashish magnit oqimini shu oqimni hosil qilgan boshqa (m-) elementdagi elektr tokiga nisbatiga teng bo'lgan skalyar kattalik, ya'ni: $M_{km} = \frac{\Psi_k}{i_m}, [H]$.

119. **Aktiv elektr zanjiri** – **активная электрическая цепь** – **active electrical circuit** – elektr energiyasi manbayiga ega bo'lgan elektr zanjiri. Elektr zanjirining aktiv uchastkasi, aktiv ikki qutblik ham shu tariqa aniqlanadi.

120. **Passiv elektr zanjiri** – **пассивная электрическая цепь** – **passive electrical circuit** – elektr energiyasi manbayiga ega bo'lmagan elektr zanjiri. Elektr zanjirining passiv uchastkasi, passiv ikki qutblik ham shu singari aniqlanadi.

121. **Elektr energiyasi manbayining tashqi xarakteristikasi** – **внешняя характеристика источника электрической энергии** – **external source of electrical characteristics energy** – elektr energiyasi

manbayi qismalaridagi elektr kuchlanish va undan o'tayotgan elektr toki o'rtasidagi funksional bog'lanish.

122. **Elektr kuchlanish manbayi** – источник электрического напряжения – **Electrical source** – elektr yurituvchi kuchi va ichki qarshiligi bilan tavsiflanadigan elektr energiyasi manbayi.

123. **Ideal elektr kuchlanish manbayi** – идеальный источник электрического напряжения – **ideal source of voltage** – qismalaridagi kuchlanishi undan o'tayotgan elektr tokiga bog'liq bo'lmagan elektr energiyasi manbayi.

124. **Elektr toki manbayi** – источник электрического тока – **source of electric current** – elektr toki va ichki o'tkazuvchanligi bilan tavsiflanadigan elektr energiyasi manbayi.

125. **Ideal elektr toki manbayi** – идеальный источник электрического тока – **ideal source of electric current** – elektr toki qismalaridagi elektr kuchlanishga bog'liq bo'lmagan elektr energiyasi manbayi.

126. **Bog'liq bo'lgan elektr kuchlanish manbayi** – зависимый источник электрического напряжения – **dependent source voltage** – qismalaridagi kuchlanish zanjir ayrim uchastkasidagi elektr tok yoki elektr kuchlanishga bog'liq bo'lgan elektr kuchlanish manbayi.

127. **Bog'liq bo'lgan elektr toki manbayi** – зависимый источник электрического тока – **dependent source of electric current** – elektr toki zanjiri ayrim uchastkasidagi elektr toki yoki elektr kuchlanishga bog'liq bo'lgan elektr toki manbayi.

128. **Ideal elektr kalit** – идеальный электрический ключ – **Perfect electric switch** – elektr qarshiligi nol yoki cheksiz katta bo'lgan elektr zanjirining elementi bo'lib, bir holatdan ikkinchi holatga o'tish vaqti oraliq'i cheksiz kichik bo'ladi.

129. **Dinamik elektr qarshilik** – динамическое электрическое сопротивление – **Dynamic electrical resistance** – rezistordagi elektr kuchlanish orttirmasini undan o'tayotgan elektr toki orttirmasiga nisbatini elektr toki orttirmasi nolga intilgandagi limitiga teng bo'lgan skalyar kattalik, ya'ni: $R_{din} = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{dU}{dI}$, [Ω].

130. **Dinamik elektr o'tkazuvchanlik** – динамическая электрическая проводимость – **dynamic electrical conductivity** – rezistordan o'tayotgan elektr toki orttirmasini undagi elektr kuchlanish orttirmasiga nisbatini elektr kuchlanish orttirmasi nolga intilgandagi limitiga teng bo'lgan skalyar kattalik, ya'ni: $G_{din} = \lim_{\Delta U \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{dI}{dU}$, [S].

131. **Dinamik sig‘im** – **динамическая емкость** – **dynamic capacity** – elektr kondensator bitta elektrodidagi elektr zaryad orttirmasini undagi elektr kuchlanish orttirmasiga nisbatini elektr kuchlanish orttirmasi nolga intilgandagi limitiga teng bo‘lgan skalyar kattalik, ya’ni: $C_{din} = \lim_{\Delta U \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta U} = \frac{dq}{dU}$, [F].

132. **Dinamik induktivnost** – **динамическая индуктивность** – **dynamic inductance** – induktiv g‘altakdagi o‘zinduksiya ilashish magnit oqimi orttirmasini undagi elektr toki orttirmasiga nisbatini elektr toki orttirmasi nolga intilgandagi limitiga teng bo‘lgan skalyar kattalik, ya’ni: $L_{din} = \lim_{\Delta I \rightarrow 0} \frac{\Delta \Psi}{\Delta I} = \frac{d\Psi}{dI}$, [H].

133. **Dinamik o‘zaro induktivlik** – **динамическая взаимная индуктивность** – **Dynamic mutual inductance** – bir induktiv g‘altakdagi o‘zaro induksiya ilashish magnit oqimi orttirmasini u bilan induktiv bog‘langan boshqa induktiv g‘altakdagi elektr toki orttirmasiga nisbatini elektr toki orttirmasi nolga intilgandagi limitiga teng bo‘lgan skalyar kattalik, ya’ni: $M_{din} = \lim_{\Delta I_2 \rightarrow 0} \frac{\Delta \Psi_1}{\Delta I_2} = \frac{d\Psi_1}{dI_2}$, [H].

134. **Differensial elektr qarshilik** – **дифференциальное электрическое сопротивление** – **differential electrical resistance** – elektr kuchlanishi yoki elektr toki juda (cheksiz) sekin o‘zgaradigan rezistor dinamik qarshiligiga teng bo‘lgan kattalik.

135. **Differensial elektr o‘tkazuvchanlik** – **дифференциальная электрическая проводимость** – **differential electrical conductivity** – elektr kuchlanishi yoki elektr toki juda (cheksiz) sekin o‘zgaradigan rezistor dinamik elektr o‘tkazuvchanligiga teng bo‘lgan kattalik.

136. **Differensial induktivlik** – **дифференциальная индуктивность** – **differential inductance** – o‘zinduksiya ilashish magnit oqimi yoki elektr toki juda (cheksiz) sekin o‘zgaradigan induktiv g‘altak dinamik induktivligiga teng bo‘lgan kattalik.

137. **Differensial o‘zaro induktivlik** – **дифференциальная взаимная индуктивность** – **Differential mutual inductance** – o‘zaro induksiya ilashish magnit oqimi yoki elektr toki juda (cheksiz) sekin o‘zgaradigan induktiv g‘altak o‘zaro induktivligiga teng bo‘lgan skalyar kattalik.

138. **Differensial sig‘im** – **дифференциальная емкость** – **differential capacitance** – elektr zaryadi yoki elektr kuchlanishi juda (cheksiz) sekin o‘zgaradigan elektr kondensator dinamik sig‘imiga teng bo‘lgan skalyar kattalik.

139. **Bog'langan elektr zanjirlar** – **связанные электрические цепи** – **related electrical circuits** – bir – biridagi jarayonlarga umumiy magnit maydoni yoki (va) elektr maydoni vositasida ta'sir qiladigan elektr zanjirlar.

140. **Galvanik bog'lanish** – **гальваническая связь** – **galvanic connection** – o'tkazuvchan muhitdagi elektr maydoni vositasida bog'langan elektr zanjirlar.

141. **Induktiv bog'lanish** – **индуктивная связь** – **inductive coupling** – magnit maydoni vositasida bog'langan zanjirlar.

142. **Sig'im bog'lanish** – **емкостная связь** – **capacitive coupling** – dielektrikdagi elektr maydoni vositasida bog'langan elektr zanjirlar.

143. **Aktiv elektr qarshilik** – **активное электрическое сопротивление** – **active electrical resistance** – passiv ikki qutblik iste'mol qilayotgan aktiv quvvatni undan o'tayotgan elektr toki ta'sir etuvchi qiymatining kvadratiga nisbatiga teng bo'lgan parametr, ya'ni:
$$R = \frac{P}{I^2}, \Omega.$$

144. **Aktiv elektr o'tkazuvchanlik** – **активная электрическая проводимость** – **active electrical conductivity** – passiv ikki qutblik iste'mol qilayotgan aktiv quvvatni uning qismalaridagi elektr kuchlanish ta'sir etuvchi qiymati kvadratiga nisbatiga teng bo'lgan parametr, ya'ni:
$$G = \frac{P}{U^2}, [S].$$

145. **To'la elektr qarshilik** – **полное электрическое сопротивление** – **electrical impedance** – passiv ikki qutblik qismalaridagi sinusoidal elektr kuchlanish ta'sir etuvchi qiymatini undan o'tayotgan sinusoidal elektr toki ta'sir etuvchi qiymatiga nisbatiga teng bo'lgan parametr, ya'ni: $Z = \frac{U}{I}, [\Omega].$

146. **To'la elektr o'tkazuvchanlik** – **полная электрическая проводимость** – **full electrical conductivity** – passiv ikki qutblikdan o'tayotgan sinusoidal elektr toki ta'sir etuvchi qiymatini undagi sinusoidal elektr kuchlanish ta'sir etuvchi qiymatiga nisbatiga teng bo'lgan parametr, ya'ni: $Y = \frac{I}{U}, [S].$

147. **Reaktiv qarshilik** – **реактивное сопротивление** – **reactance** – passiv ikki qutblik to'la qarshiligi kvadratidan uning aktiv qarshilik kvadratini ayirmasidan olingan kvadrat ildiz bilan aniqlanadigan parametr bo'lib, agar elektr toki elektr kuchlanishdan faza jihatidan orqada qolayotgan bo'lsa, musbat ishora bilan aks holda esa manfiy ishora bilan olinadi, ya'ni: $X = \sqrt{Z^2 - R^2}, [\Omega].$

148. **Induktiv qarshilik – индуктивное сопротивление – inductive reactance** – elektr zanjiri elementi xususiyy induktivligini elektr energiya manbayi elektr kuchlanish yoki elektr toki burchak chastotasiga ko‘paytmasi bilan aniqlanadigan reaktiv qarshilik, ya’ni: $X_L = \omega L$, $[\Omega]$.

149. **Sig‘im qarshilik – емкостное сопротивление – capacitance** – elektr zanjiri elementi elektr sig‘imini elektr energiya manbayi elektr kuchlanishi yoki elektr toki burchak chastotasiga ko‘paytmasiga teskari bo‘lgan kattalik bilan aniqlanadigan reaktiv qarshilik, ya’ni: $X_C = \frac{1}{\omega C}$, $[\Omega]$.

150. **Reaktiv o‘tkazuvchanlik – реактивная проводимость – susceptance** – kompleks elektr o‘tkazuvchanlikning mavhum qismi, ya’ni: $b = \text{Im}(\underline{Y})$, $[S]$. Kondensator reaktiv o‘tkazuvchanligi musbat, induktiv g‘altakniki esa manfiy ishora bilan olinadi.

151. **Sinusoidal elektr toki kompleks oniy qiymati – -комплексное мгновенное значение синусоидального электрического тока – complex the instantaneous value of the sinusoidal electric current** – moduli va argumenti berilgan sinusoidal elektr toki amplitudasi va argumentiga teng bo‘lgan hamda vaqt bo‘yicha o‘zgaradigan kompleks kattalik, ya’ni: $\underline{I} = I_m e^{\pm j(\omega t + \psi_i)}$, $[A]$.

Eslatma: elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryad va boshqa sinusoidal kattaliklar kompleks oniy qiymatlari ham shu tariqa aniqlanadi.

152. **Sinusoidal elektr toki kompleks amplitudasi – комплексная амплитуда синусоидального электрического тока – complex amplitude of the sinusoidal electric current** – moduli va argumenti sinusoidal elektr toki amplitudasi (I_m) va boshlang‘ich fazasi (ψ_i) ga teng bo‘lgan kompleks kattalik, ya’ni: $\underline{I}_m = I_m e^{\pm j\psi_i}$, $[A]$.

Eslatma: elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryad va boshqa sinusoidal kattaliklar kompleks amplitudalari ham shu singari aniqlanadi.

153. **Sinusoidal elektr toki kompleks ta’sir etuvchi qiymati – комплексное действующее значение синусоидального электрического тока – integrated rms value of sinusoidal electric current** – moduli sinusoidal elektr toki ta’sir etuvchi qiymati (I) ga va argumenti (φ) uning boshlang‘ich fazasiga teng bo‘lgan kompleks kattalik, ya’ni: $\underline{I} = I e^{\pm j\psi_i}$, $[A]$.

Eslatma: elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryad va boshqa sinusoidal kattaliklar kompleks ta’sir etuvchi qiymatlari ham shu singari aniqlanadi.

154. **Kompleks elektr qarshilik – комплексное электрическое сопротивление – complete the electrical resistance** – passiv elektr zanjiri yoki uning elementi qismalaridagi sinusoidal elektr kuchlanish kompleks ta’sir etuvchi qiymatini undan o‘tayotgan sinusoidal elektr toki

kompleks ta'sir etuvchi qiymatiga nisbatiga teng bo'lgan kompleks kattalik, ya'ni: $\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}}$, $[\Omega]$.

155. **Kompleks elektr o'tkazuvchanlik** – комплексная электрическая проводимость – **complex electrical conductivity** – passiv elektr zanjiri yoki uning elementidan o'tayotgan sinusoidal elektr toki kompleks ta'sir etuvchi qiymatini uning qismalaridagi sinusoidal elektr kuchlanish kompleks ta'sir etuvchi qiymatiga nisbatiga teng bo'lgan kompleks kattalik, ya'ni: $\underline{Y} = \frac{\underline{I}}{\underline{U}}$, $[S]$.

156. **Elektr zanjirlarining ko'p fazali tizimi** – многофазная система электрических цепей – **polyphase system of electrical circuits** – umumiy elektr energiya manbayidan hosil qilinayotgan bir xil chastotali, faza jihatdan bir–biridan farq qiladigan elektr yurituvchi kuchlar ta'sirida bo'lgan elektr zanjirlar majmuasi.

157. **Elektr zanjirlari ko'p fazali tizimi fazasi** – фаза многофазной системы электрических цепей – **phase polyphase system of electrical circuits** – ko'p fazali elektr toklari tizimidagi toklardan bittasi o'tishi mumkin bo'lgan elektr zanjirlari ko'p fazali tizimining qismi.

158. **Ko'p fazali elektr zanjiri** – многофазная электрическая цепь – **multi-phase electric circuit** – alohida fazalari bir–birlari bilan elektr jihatdan ulangan elektr zanjiri ko'p fazali tizimi.

159. **Simmetrik ko'p fazali elektr zanjiri** – симметричная многофазная электрическая цепь – **symmetric multi-phase electric circuit** – fazalarining kompleks elektr qarshiliklari o'zaro teng bo'lgan ko'p fazali elektr zanjiri.

160. **Ko'p fazali elektr toklari tizimi** – многофазная система электрических токов – **polyphase system of electrical currents** – elektr zanjiri ko'p fazali tizimidan o'tayotgan bir xil chastotali va faza jihatdan o'zaro siljigan sinusoidal elektr toklari majmuasi.

Eslatma: elektr kuchlanishlar, elektr yurituvchi kuchlar, magnit oqimlari va boshqa sinusoidal kattaliklar ko'p fazali tizimlari ham shu singari aniqlanadi.

161. **Uch fazali elektr toklari tizimi** – трехфазная система электрических токов – **three-phase system of electric currents** – fazalar soni uchta bo'lgan ko'p fazali elektr toklari tizimi.

Eslatma: uch fazali elektr kuchlanishlar, elektr yurituvchi kuchlar, magnit oqimlari va boshqa kattaliklar tizimi ham shunga o'xshash aniqlanadi.

162. **Simmetrik[nosimmetrik] ko'p fazali elektr toklari tizimi** – симметричная [несимметричная] многофазная система электрических токов – **symmetric [asymmetrical] multiphase electric**

currents system – elektr toklari amplitudalari o‘zaro teng[teng bo‘lmagan] va (yoki) bir–birlaridan faza jihatidan bir xil[bir xil bo‘lmagan] burchakka siljigan ko‘p fazali elektr toklar tizimi.

Eslatma: 1) simmetrik ko‘p fazali elektr toklari tizimidagi toklar faza jihatdan o‘zaro $2\pi/m$ gradusga teng burchakka siljigan bo‘ladi, m – fazalar soni; 2) simmetrik[nosimmetrik] ko‘p fazali elektr kuchlanishlar, elektr yurituvchi kuchlar, magnit oqimlari va boshqa kattaliklar tizimi ham shunga o‘xshash aniqlanadi.

163. Nol ketma – ketlikli simmetrik toklar tizimi – симметричная система нулевой последовательности токов – balanced system the zero sequence currents – elektr toklari faza jihatidan o‘zaro mos tushadigan ko‘p fazali simmetrik elektr toklari tizimi.

Eslatma: elektr kuchlanishlar, elektr yurituvchi kuchlar, magnit oqimlari va boshqa kattaliklar simmetrik nol ketma – ketlikli tashkil etuvchilari ham shu singari aniqlanadi.

164. To‘g‘ri ketma – ketlikli simmetrik toklar tizimi – симметричная система прямой последовательности токов – symmetrical positive sequence system currents – fazalar ketma–ketligi tartibi asosiy deb qabul qilingan ko‘p fazali simmetrik elektr toklari tizimi.

Eslatma: 1) ko‘p fazali simmetrik elektr toklari tizimi fazalar ketma – ketligining asosiy tartibida har bir faza birinchi deb qabul fazaga nisbatan $2\pi(1 - k)/m$ ga teng bo‘lgan bir xil kattalikka ortadi yoki kamayadi, bu yerda m – fazalar soni; $k = 1, 2, \dots, m$ – faza raqami; 2) elektr kuchlanishlar, elektr yurituvchi kuchlar, magnit oqimlari va boshqa kattaliklar to‘g‘ri ketma – ketlikli simmetrik tashkil etuvchilari ham shu singari aniqlanadi.

165. Teskari ketma–ketlikli simmetrik toklar tizimi – симметричная система обратной последовательности токов – symmetric feedback system sequence currents – fazalar ketma–ketligining tartibi asosiy deb qabul qilingan fazalar ketma–ketligi tartibiga teskari bo‘lgan ko‘p fazali simmetrik elektr toklari tizimi.

Eslatma: 1) ko‘p fazali simmetrik elektr toklari tizimi fazalar ketma – ketligining teskari tartibida har bir faza birinchi deb qabul qilingan fazaga nisbatan $2\pi(1 - k)/m$ ga teng bo‘lgan bir xil kattalikka ortadi yoki kamayadi, bu yerda m – fazalar soni; $k = 1, 2, \dots, m$ – faza raqami; 2) elektr kuchlanishlar, elektr yurituvchi kuchlar, magnit oqimlari va boshqa kattaliklar teskari ketma – ketlikli simmetrik tashkil etuvchilari ham shu singari aniqlanadi.

166. Nosimmetrik m–fazali elektr toklari tizimining simmetrik tashkil etuvchilari -симметричные составляющие несимметричной m-фазной системы электрических токов – symmetrical components asymmetric m- phase system of electric currents – m–fazali nosimmetrik elektr toklari tizimi m ketma–ketlikli va $n = 1, 2, \dots, m - 1$ indeksli simmetrik tashkil etuvchilarga ajratilishi (yoyilishi) mumkin,

bunda har bir ketma – ketlikdagi faza siljishi $2\pi(1 - k)\frac{n}{m}$ ga teng bo‘ladi, bu yerda $k = 1, 2, \dots, m$ – faza raqami.

Eslatma: 1) fazalari A, B va C bilan belgilanadigan uch fazali tizimda nol ($n = 0$), to‘g‘ri ($n = 1$) va teskari ($n = 2$) deb nomlangan $k = 1, 2$ va 3 ketma – ketliklar mos keladi; 2) nosimmetrik m –fazali elektr kuchlanishlar, elektr yurituvchi kuchlar, magnit oqimlari va boshqa kattaliklar simmetrik tashkil etuvchilari ham shu singari aniqlanadi.

167. Muvozanatlashgan ko‘p fazali tizim – -уравновешенная многофазная система – balanced polyphase system – elektr yurituvchi kuchlar va elektr toklarining ko‘p fazali tizimi bo‘lib, ularni ko‘p fazali elektr zanjirida hosil qilgan quvvatining oniy qiymati vaqtga bog‘liq bo‘lmaydi.

168. Operator elektr toki – операторный электрический ток – operator electric current – vaqtning funksiyasi sifatida qaralayotgan elektr toki oniy qiymatidan Laplas o‘zgartirishi yordamida hosil qilingan kattalik.

Eslatma: operator elektr kuchlanish, elektr yurituvchi kuch, magnit oqimi va boshqa kattaliklar shu singari aniqlanadi.

169. Operator elektr qarshilik – операторное электрическое сопротивление – operator electrical resistance – chiziqli passiv ikkiqutblik tarkibidagi induktiv g‘altak elektr toki va elektr kondensator elektr kuchlanishi boshlang‘ich qiymatlari nolga teng bo‘lgan holatda ikki qutblik qismalaridagi operator elektr kuchlanishni uning kirishidagi operator elektr tokiga nisbatiga teng bo‘lgan kattalik.

170. Operator elektr o‘tkazuvchanlik – операторная (электрическая) проводимость – operator (electrical) conductivity – chiziqli passiv ikki qutblik tarkibidagi induktiv g‘altak toki va elektr kondensator elektr kuchlanishi boshlang‘ich qiymatlari nolga teng bo‘lgan holatda ikki qutblik kirishidagi operator elektr tokining uning kirishidagi operator elektr kuchlanishga nisbatiga teng bo‘lgan kattalik.

171. O‘tish elektr qarshilik – переходное электрическое сопротивление – transient electrical resistance – chiziqli passiv ikki qutblik qismalaridagi elektr kuchlanishni unga ulanayotgan ideal o‘zgarmas elektr toki manbayi elektr tokiga nisbatiga teng bo‘lgan vaqt funksiyasi.

172. O‘tish elektr o‘tkazuvchanlik - переходная электрическая проводимость – transient electrical conductivity – chiziqli passiv ikki qutblik tarkibidagi shoxobchadan o‘tayotgan elektr tokini ikki qutblik o‘zgarmas elektr kuchlanish manbayiga ulanayotganda shu manba kuchlanishiga nisbatiga teng bo‘lgan vaqt funksiyasi.

173. **Impuls elektr qarshilik** – импульсное электрическое сопротивление – **pulsed electrical resistance** – o'tkinchi elektr qarshilikning vaqt bo'yicha umumlashgan hosilasiga teng bo'lgan kattalik.

174. **Impuls elektr o'tkazuvchanlik** – импульсная электрическая проводимость – **pulsed electrical conductivity** – o'tkinchi elektr o'tkazuvchanlikning vaqt bo'yicha umumlashgan hosilasiga teng bo'lgan kattalik.

175. **Elektr zanjirining kirish kattaligi** – входная величина электрической цепи – **input value of an electrical circuit** – elektr zanjirining kirishi deb qabul qilingan qismalariga berilayotgan elektr toki yoki elektr kuchlanish.

176. **Elektr zanjirining chiqish kattaligi** – выходная величина электрической цепи – **output value of the electrical circuit** – elektr zanjirining chiqishi deb qabul qilingan qismalaridagi elektr toki yoki elektr kuchlanish.

177. **Elektr zanjirining kirish funksiyasi** – входная функция электрической цепи – **input function electrical circuit** – elektr zanjiri kirish tomonidagi operator yoki kompleks elektr qarshilik yoki o'tkazuvchanlik.

178. **Elektr zanjirining chiqish funksiyasi** – выходная функция электрической цепи – **output function electrical circuit** – elektr zanjiri chiqish tomonidagi operator yoki kompleks elektr qarshilik yoki o'tkazuvchanlik.

179. **O'zaro elektr qarshilik** – взаимное электрическое сопротивление – **the relative electrical resistance** – zanjirning operator yoki kompleks shakldagi chiqish elektr kuchlanishini uning operator yoki kompleks shakldagi kirish elektr tokiga nisbatiga teng bo'lgan kattalik.

180. **O'zaro elektr o'tkazuvchanlik** – взаимная электрическая проводимость – **mutual electrical conductivity** – zanjirning operator yoki kompleks shakldagi chiqish elektr tokini uning operator yoki kompleks shakldagi kirish elektr kuchlanishga nisbatiga teng bo'lgan kattalik.

181. **Elektr zanjirining uzatish funksiyasi** – передаточная функция электрической цепи – **transfer function of the circuit** – elektr zanjiri operator yoki kompleks shakldagi chiqish kattaligini uning operator yoki kompleks shakldagi kirish kattaligiga nisbati.

182. **Elektr zanjirining sezgirligi** – чувствительность электрической цепи – **sensitivity of the circuit** – elektr zanjiri kirish yoki chiqish kattaligini uning ma'lum bir parametri bo'yicha hosilasi.

183. **Elektr zanjirining amplituda-chastotaviy xarakteristikasi** – амплитудно -частотная характеристика электрической цепи – **frequency response circuit** – elektr zanjirining kompleks ko‘rinishdagi kirish, chiqish yoki uzatish funksiyalari modulining chastotaga funksional bog‘lanishi.

184. **Elektr zanjirining faza-chastotaviy xarakteristikasi** – фазочастотная характеристика электрической цепи – **phase response electric circuit** – elektr zanjirining kirish, chiqish yoki uzatish funksiyalari argumentining chastotaga funksional bog‘lanishi.

185. **Minimal-fazaviy elektr zanjiri** – минимально -фазовая электрическая цепь – **minimum-phase electric circuit** – amplituda-fazaviy va faza-chastotaviy xarakteristikalari o‘zaro bir–biri orqali bevosita aniqlanadigan elektr zanjiri.

186. **Elektr zanjirining sintezi** – синтез электрической цепи – **synthesis of electric circuit** – elektr zanjirining talab etilgan xossalarini hosil qilish maqsadida uning topologiyasini tanlash va zanjir almashlash sxemasidagi elementlar parametrlarini aniqlash.

187. **Elektr zanjiri sxemalari analizi(tahlili)** – анализ схемы электрической цепи – **analysis of the electrical circuit** – elektr zanjirining mavjud topologiyasi va elementlarining parametrlariga ko‘ra undagi jarayonlarni analitik yoki sonli ifodalash hamda zanjir xossalarini o‘rganish.

188. **Elektr zanjirini diagnostikalash** – диагностика электрической цепи – **Electrical circuit diagnostics** – elektr zanjiri topologiyasi, uning ayrim qismi parametrlari va turli ta’sirlarga reaksiyalari ma’lum bo‘lganda uning noma’lum parametrlarini aniqlash.

189. **Magnit zanjiri** – магнитная цепь – **magnetic circuit** – elektromagnit jarayonlari magnit yurituvchi kuch, magnit oqimi va magnit potentsiallar ayirmasi tushunchalari orqali ifodalanadigan va tarkibida ferromagnit jismlar bo‘lgan qurilmalar majmuasi.

190. **Magnit qarshilik** – магнитное сопротивление – **magnetic resistance** – magnit zanjirining ko‘rilayotgan uchastkasidagi skalyar magnit potentsiallar ayirmasini shu uchastkadagi magnit oqimiga nisbatiga teng bo‘lgan skalyar kattalik, ya’ni:

$$Z_m = \frac{\varphi_{m1} - \varphi_{m2}}{F_m}, \left[\frac{A}{Vb} \right].$$

191. **Magnit o‘tkazuvchanlik** – магнитная проводимость – **magnetic conductivity** – magnit zanjirining ko‘rilayotgan uchastkasidagi magnit oqimini shu uchastkadagi skalyar magnit potentsiallar ayirmasiga nisbatiga teng bo‘lgan skalyar kattalik, ya’ni:

$$Z_m = \frac{F_m}{\varphi_{m1} - \varphi_{m2}}, \left[\frac{Vb}{A} \right].$$

192. **Elektr zanjiri sxemasi** – **схема электрической цепи** – **circuit electrical circuit** – elektr zanjirining grafik tasviri bo‘lib, unda zanjir elementlarining shartli belgilari va ularni o‘zaro ulanishi ko‘rsatiladi.

193. **Elektr zanjirining almashlash sxemasi** – **схема замещения электрической цепи** – **equivalent scheme of the circuit** – elektr zanjirining sxemasi bo‘lib, u zanjirning ma’lum sharoitlardagi xossalarini aks ettiradi.

194. **Elektr zanjirining ekvivalent sxemasi** – **эквивалентная схема электрической цепи** – **equivalent scheme of an electric circuit** – elektr zanjirining almashlash sxemasi bo‘lib, unda ko‘rilayotgan kattaliklar qiymatlari dastlabki almashlash sxemasidagi shu kattaliklar qiymatlariga teng bo‘ladi.

195. **Elektr zanjiri chiqishi** – **вывод электрической цепи** – **Output circuit** – elektr zanjirini boshqa elektr zanjiriga ulash uchun mo‘ljallangan nuqtasi.

196. **Ikki qutblik** – **двухполюсник** – **two-pole** – ikkita ajratilgan chiqishga ega bo‘lgan elektr zanjiri qismi.

197. **To‘rtqutblik** – **четырёхполюсник** – **quadripole** – zanjirning kirishi yoki chiqishi vazifasini bajaruvchi ikki juft chiqishga ega bo‘lgan elektr zanjirining qismi.

198. **Ko‘p qutblik** – **многополюсник** – **multipole** – ikkitadan ortiq ajratilgan chiqishga ega bo‘lgan elektr zanjiri qismi.

199. **To‘rtqutblik qisqa tutashish qarshiligi** – **сопротивление короткого замыкания четырехполюсника** – **short-circuit impedance quadrupole** – bir juft chiqishlari qisqa tutashtirilgan passiv to‘rtqutblikning boshqa juft chiqishlari tomonidagi kompleks yoki operator qarshiligi.

200. **To‘rtqutblik salt ishlash qarshiligi** – **сопротивление холостого хода четырехполюсника** – **resistance idling quadrupole** – bir juft chiqishlari yuklamasiz(uzuuq) qoldirilgan passiv to‘rtqutblikning boshqa juft chiqishlari tomonidagi kompleks yoki operator qarshiligi.

201. **Kaskadli elektr zanjiri** – **каскадная электрическая цепь** – **electric circuit cascaded** – o‘zaro ketma-ket ulangan bir nechta to‘rtqutbliklardan iborat bo‘lgan va har bir to‘rtqutblik kirish qismalari undan oldingi to‘rtqutblik chiqish qismalariga ulangan elektr zanjiri.

202. **Elektr zanjiri konturi** – **контур электрической цепи** – **electrical circuit loop** – elektr zanjirining berk yo‘l hosil qiladigan shoxobchalari ketma-ketligi bo‘lib, undagi nuqta(tugun)lardan bittasi bir

vaqtning oʻzida yoʻlining boshi va oxiri hisoblanadi, qolgan nuqta(tugun)lar esa faqat bir marta uchraydi.

203. **Elektr zanjiri grafi – граф электрической цепи – electrical circuit count** – elektr zanjirining grafik tasviri boʻlib, unda zanjir shoxobchasi graf shoxobchasi deb ataluvchi kesma bilan, uning tuguni esa graf tuguni deb ataluvchi nuqta bilan tasvirlanadi.

204. **Elektr zanjirining yoʻnaltirilgan grafi – направленный граф электрической цепи – directed graph of electrical circuit** – elektr toklari va kuchlanishlarining shartli–musbat yoʻnalishlari yoʻnalishli kesmalar bilan belgilangan elektr zanjiri grafi.

205. **Elektr zanjiri grafi daraxti – дерево графа электрической цепи – tree graph of electrical circuit** – elektr zanjiri grafi barcha tugunlarini kontur hosil qilmasdan ulovchi istalgan shoxobchalar toʻplami.

206. **Elektr zanjiri grafi bogʻlanishi – связь графа электрической цепи – Us Count the circuit** – graf daraxtiga taalluqli boʻlmagan elektr zanjiri grafi shoxobchasi.

207. **Elektr zanjiri grafi daraxti toʻldiruvchisi – дополнение дерева графа электрической цепи – addition, the electrical circuit of the graph tree** – elektr zanjiri grafining barcha bogʻlanishlari.

208. **Elektr zanjiri grafi yoʻli – путь графа электрической цепи – path count of the circuit** – elektr zanjiri grafi shoxobchalarining uzluksiz ketma–ketligi boʻlib, unda istalgan shoxobcha va istalgan tugun faqat bir marta uchraydi.

209. **Elektr zanjiri grafi konturi – контур графа электрической цепи – Count contour electric circuit** – elektr zanjiri grafi tugunlari va shoxobchalaridan iborat boʻlgan berk yoʻli boʻlib, undagi tugunlardan bittasi bir paytning oʻzida yoʻlining boshi va oxiri boʻlib xizmat qiladi.

210. **Elektr zanjiri grafi asosiy konturi – главный контур графа электрической цепи – main electric circuit count** – faqat graf bogʻlanishini oʻz ichiga olgan elektr zanjiri grafi konturi.

211. **Elektr zanjiri [elektr zanjiri grafi] kesimi – сечение электрической цепи [графа электрической цепи] – section of the circuit [Count electric chain]** – elektr zanjiri[elektr zanjiri grafi] shoxobchalarining minimal majmuasi (toʻplami) boʻlib, uning zanjirdan chetlashtirilishi zanjir[graf]ni ikkita izolyasiyalangan qismga ajratadi, ulardan bittasi izolyasiyalangan tugun[graf tuguni] boʻlishi mumkin.

212. **Elektr zanjiri[elektr zanjiri grafi] asosiy kesimi – главное сечение электрической цепи [графа электрической цепи] – main - section of the circuit [Count circuit]** – elektr zanjiri grafi bogʻlanishi

shoxobchalaridan va faqat bitta daraxt shoxobchasidan tashkil topgan elektr zanjiri[elektr zanjiri grafi] kesimi.

213. **Elektr zanjiri planar sxemasi** – **планарная схема электрической цепи** – **Plenary diagram of an electrical circuit** – tekislikda o‘zaro kesishmaydigan shoxobchalar ko‘rinishda tasvirlanadigan elektr zanjiri sxemasi.

214. **Ulanishlar aniq matritsasi** – **определенная матрица соединений** – **definite matrix compounds** – qatorlari elektr zanjirining yo‘naltirilgan grafi barcha tugunlaridan bitta kamiga, ustunlari esa uning shoxobchalariga mos bo‘lgan to‘g‘ri burchakli matritsa bo‘lib, agar grafning berilgan shoxobchasi berilgan tugunga ulanmagan bo‘lsa, matritsa elementlari nolga, tugundan yo‘nalgan bo‘lsa – birga, tugunga yo‘nalgan bo‘lsa – minus birga teng bo‘ladi.

215. **Ulanishlar noaniq matritsasi** – **неопределенная матрица соединений** – **undefined matrix compounds** – qatorlari elektr zanjirining yo‘naltirilgan grafi barcha tugunlariga, ustunlari esa uning shoxobchalariga mos bo‘lgan to‘g‘ri burchakli matritsa bo‘lib, agar grafning berilgan shoxobchasi berilgan tugunga ulanmagan bo‘lsa, matritsa elementlari nolga, tugundan yo‘nalgan bo‘lsa – birga, tugunga yo‘nalgan bo‘lsa – minus birga teng bo‘ladi.

216. **Konturlar matritsasi** – **матрица контуров** – **matrix circuit** – qatorlari graf bog‘lanishlariga, ustunlari esa elektr zanjiri yo‘naltirilgan grafi shoxobchalariga mos bo‘lgan to‘g‘ri burchakli matritsa bo‘lib, agar berilgan shoxobcha berilgan konturga tegishli bo‘lmasa, matritsa elementlari nolga, berilgan konturga tegishli bo‘lib, shoxobcha yo‘nalishi konturni aylanib chiqish yo‘nalishiga mos bo‘lsa – birga, aks holda esa – minus birga teng bo‘ladi.

217. **Asosiy konturlar matritsasi** – **матрица главных контуров** – **matrix of the main circuit** – elektr zanjiri grafi asosiy konturlari uchun yozilgan konturlar matritsasi bo‘lib, ularni aylanib chiqish yo‘nalishi graf asosiy konturi bog‘lanish shoxobchasi yo‘nalishi bilan mos deb qabul qilinadi.

218. **Kesimlar matritsasi** – **матрица сечений** – **sections of the matrix** – qatorlari elektr zanjiri yo‘naltirilgan grafi daraxti shoxobchalariga, ustunlari esa uning shoxobchalariga mos bo‘lgan to‘g‘ri burchakli matritsa bo‘lib, agar graf daraxti bitta berilgan shoxobchasi va graf bog‘lanishini kesuvchi yuza hosil bo‘lganda shoxobcha uzilmasa, matritsa elementi nolga, shoxobcha uzilsa va graf daraxti berilgan shoxobchalariga mos ravishda yuzaga yo‘nalgan bo‘lsa – birga, shoxobcha

uzilsa va daraxt shoxobchasiga qarama– qarshi yo‘nalishda yuzaga yo‘nalgan bo‘lsa – minus birga teng bo‘ladi.

219. **Asosiy kesimlar matritsasi – матрица главных сечений – matrix of the main sections of** – asosiy kesimlar uchun yozilgan kesimlar matritsasi bo‘lib, bunda asosiy kesimlar yo‘nalishi asosiy kesim daraxti shoxobchasi yo‘nalishiga mos deb qabul qilinadi.

220. **Signal grafi – сигнальный граф – Signal graph** – bog‘langan va bog‘lanmagan o‘zgaruvchilarning tenglamalar sistemasi va ularning strelkali va uzatmali shoxobchalarini bog‘lovchi hamda o‘zgaruvchilar o‘rtasidagi bog‘liqlikni ko‘rsatuvchi tugunlar to‘plami.

221. **Signal grafi boshi – источник сигнального графа – source of the signal graph** – signal grafi tuguni bo‘lib, unda birlashgan barcha shoxobchalar tugundan chiquvchi yo‘nalishda bo‘ladi.

222. **Signal grafi oxiri – сток сигнального графа – signal flow graph** – signal grafi tuguni bo‘lib, unda birlashgan barcha shoxobchalar undan chiquvchi yo‘nalishda bo‘ladi.

223. **Signal grafi yo‘li – путь сигнального графа – signal path graph** – signal grafi shoxobchalarining ma’lum bir yo‘l bo‘ylab yo‘nalgan uzluksiz ketma–ketligi bo‘lib, undagi istalgan tugun faqat bir marta uchraydi.

224. **Signal grafi konturi – контур сигнального графа – loop signal graph** – signal grafining berk yo‘li.

225. **Signal grafining tutashmaydigan konturi – несоприкасающиеся контуры сигнального графа - non-contiguous circuits the signal graph** – umumiy tugunga ega bo‘lmagan signal grafi konturi.

226. **Signal grafi shoxobchasi uzatmasi – передача ветви сигнального графа – transmission signal branch graph** – signal grafining ko‘rilayotgan shoxobchasi chiqayotgan o‘zgaruvchiga ko‘paytiriladigan koeffitsiyent bo‘lib, natijada ko‘paytma shu shoxobcha kirib boradigan o‘zgaruvchini hosil qiladi.

227. **Signal grafi yo‘li uzatmasi – передача пути сигнального графа – transmission path signal graph** – signal grafi yo‘liga kiruvchi barcha shoxobchalar uzatmalarining ko‘paytmasi.

228. **Elektr tokining oniy qiymati – мгновенное значение электрического тока – an instantaneous value of electric current** – elektr tokining vaqtning ko‘rilayotgan momentidagi qiymati.

Eslatma: elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa kattaliklar oniy qiymatlari ham shu singari aniqlanadi.

229. **O'zgarmas elektr toki – постоянный электрический ток – direct electric current** – vaqt bo'yicha o'zgaraydigan tok.

Eslatma: o'zgarmas elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa o'zgarmas kattaliklar ham shu singari aniqlanadi.

230. **O'zgaruvchan elektr toki – переменный электрический ток – alternating electric current** – vaqt bo'yicha o'zgaradigan tok.

Eslatma: o'zgaruvchan elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa o'zgaruvchan kattaliklar ham shu singari aniqlanadi.

231. **Elektr zanjiridagi turg'un rejim – установившийся режим в электрической цепи – a steady state in the circuit** – elektr zanjiridagi elektr yurituvchi kuchlar, elektr kuchlanishlar va elektr toklari o'zgarmas yoki davriy o'zgaradigan rejim.

232. **Davriy elektr toki – периодический электрический ток – periodic electrical current** – oniy qiymati teng vaqt oraliqlarida o'zgarmas ketma-ketlikda qaytariladigan elektr toki.

Eslatma: davriy elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa davriy kattaliklar ham shu singari aniqlanadi.

233. **Elektr tokining davri – период электрического тока – between the electric current** – eng kichik vaqt oralig'i bo'lib, bu vaqt oxiriga kelib davriy elektr tokining oniy qiymati bir xil ketma – ketlikda qaytariladi, ya'ni: $T = \frac{1}{f}, [s]$.

Eslatma: davriy elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa davriy kattaliklar davri ham shu singari aniqlanadi.

234. **Elektr toki chastotasi – частота электрического тока – frequency electric current** – elektr toki davriga teskari bo'lgan kattalik, ya'ni: $f = \frac{1}{T}, [Hz]$.

Eslatma: davriy elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa davriy kattaliklar chastotasi ham shu singari aniqlanadi.

235. **Davriy elektr toki ta'sir etuvchi qiymati – действующее значение – периодического электрического тока – rms value of a periodic electric current** – avriy elektr tokining davr mobaynidagi o'rtacha kvadratik qiymati, ya'ni: $I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}, [A]$.

Eslatma: davriy elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa davriy kattaliklar ta'sir etuvchi qiymatlari ham shu singari aniqlanadi.

236. **Davriy elektr tokining doimiy tashkil etuvchisi – постоянная -составляющая – периодического электрического тока – constant component of the periodic electric current** –davriy elektr tokining davr mobaynidagi o'rtacha qiymati, ya'ni: $I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i dt, [A]$.

Eslatma: davriy elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa davriy kattaliklar doimiy tashkil etuvchilari ham shu singari aniqlanadi.

237. Davriy elektr tokining o'zgaruvchan tashkil etuvchisi – переменная -составляющая –периодического электрического тока- variable component batch electric current – davriy elektr toki oniy qiymati va uning doimiy tashkil etuvchisi ayirmasi.

Eslatma: davriy elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa davriy kattaliklar o'zgaruvchan tashkil etuvchilari ham shu singari aniqlanadi.

238. Pulsatsiyalanuvchi elektr toki – пульсирующий электрический ток – pulsating electrical current – davr mobaynidagi o'rtacha qiymati noldan farqli bo'lgan davriy elektr toki.

Eslatma: pulsatsiyalanuvchi elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa pulsatsiyalanuvchi kattaliklar ham shu singari aniqlanadi.

239. Bir yo'nalishli elektr toki – однонаправленный электрический ток – one-way electric current – yo'nalishi o'zgarmaydigan elektr toki.

Eslatma: bir yo'nalishli elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa bir yo'nalishli kattaliklar ham shu singari aniqlanadi.

240. Sinusoidal elektr toki – синусоидальный электрический ток – sinusoidal electric current – vaqtning sinusoidal funksiyasi bo'lgan davriy elektr toki.

Eslatma: sinusoidal elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa sinusoidal kattaliklar ham shu singari aniqlanadi.

241. Sinusoidal elektr tokining burchak chastotasi – угловая частота синусоидального электрического тока – angular frequency sinusoidal electric current – sinusoidal elektr toki fazasining o'zgarish tezligi bo'lib, uning kattaligi sinusoidal elektr toki chastotasini 2π ga ko'paytmasiga teng.

Eslatma: sinusoidal elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa sinusoidal kattaliklar boshlang'ich fazalari ham shu singari aniqlanadi.

242. Sinusoidal elektr toki fazasi - фаза синусоидального электрического тока – phase sinusoidal electric current – sinusoidal elektr toki argumenti bo'lib, elektr tokini noldan musbat qiymatiga o'tish nuqtasidan hisoblanadi.

Eslatma: sinusoidal elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa sinusoidal kattaliklar fazalari ham shu singari aniqlanadi.

243. Sinusoidal elektr toki boshlang'ich fazasi – начальная фаза синусоидального электрического тока – of the initial phase of the sinusoidal electric current – sinusoidal elektr toki fazasining vaqtning boshlang'ich momentidagi qiymati.

Eslatma: sinusoidal elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa sinusoidal kattaliklar boshlang'ich fazalari ham shu singari aniqlanadi.

244. **Kuchlanish va tok orasidagi faza siljishi** – сдвиг фаз между напряжением и током – **phase shift between voltage and current** – sinusoidal elektr kuchlanish boshlang'ich fazasidan sinusoidal elektr toki boshlang'ich fazasi ayirmasi ko'rinishida aniqlanadigan algebraik kattalik.

245. **Birinchi sinusoidal funktsiyani ikkinchisiga nisbatan faza bo'yicha kechikishi** – запаздывание по фазе первой синусоидальной функции относительно второй – **delay the first phase of the sinusoidal function with respect to the second** – bir xil davrga ega bo'lgan birinchi sinusoidal funktsiya boshlang'ich fazasidan ikkinchi sinusoidal funktsiya boshlang'ich fazasi ayirmasi ko'rinishida aniqlanadigan algebraik kattalik.

Eslatma: agar sinusoidal elektr kuchlanish va sinusoidal elektr toki boshlang'ich fazalari mos ravishda Ψ_u va Ψ_i ga teng bo'lsa, u holda kuchlanish sinusoidalining tok sinusoidalidan faza bo'yicha kechikishi $\Psi_u - \Psi_i$ ga teng bo'ladi.

246. **Birinchi sinusoidal funktsiyani ikkinchisiga nisbatan faza bo'yicha ilgarilashi** – опережение по фазе первой синусоидальной функции относительно второй – **advancing on the first phase of the sine function relative to the second** – bir xil davrga ega bo'lgan ikkinchi sinusoidal funktsiya boshlang'ich fazasidan birinchi sinusoidal funktsiya boshlang'ich fazasi ayirmasi ko'rinishida aniqlanadigan algebraik kattalik.

Eslatma: agar sinusoidal elektr kuchlanish va sinusoidal elektr toki boshlang'ich fazalari mos ravishda Ψ_u va Ψ_i ga teng bo'lsa, u holda kuchlanish sinusoidalining tok sinusoidalidan faza bo'yicha ilgarilashi $\Psi_u - \Psi_i$ ga teng bo'ladi.

247. **Elektr toki impulsi** – импульс электрического тока – **pulse of electric current** – ko'rilyotgan vaqt oralig'iga nisbatan kichik bo'lgan vaqt oralig'i mobaynida davom etadigan elektr toki.

Eslatma: elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa erkin kattaliklar impulslari ham shu singari aniqlanadi.

248. **Ikki qutblik oniy quvvati** – мгновенная мощность двухполюсника – **instantaneous power of the two-pole** – vaqtning ko'rilyotgan momentida elektromagnit energiyaning zanjirga uzatilish tezligi bo'lib, uning kattaligi ikki qutblik kirishidagi elektr kuchlanish va elektr toki oniy qiymatlarining o'zaro ko'paytmasiga teng, ya'ni: $p = ui, V \cdot A$.

249. **Ikki qutblik to'la quvvati** – полная мощность двухполюсника – **full power of the two-pole** – ikki qutblik kirishidagi elektr kuchlanish va elektr toki ta'sir etuvchi qiymatlarining ko'paytmasiga teng bo'lgan kattalik, ya'ni: $S = UI, [VA]$.

250. **Ikki qutblik aktiv quvvati** – активная мощность двухполюсника – **two-terminal active power** – ikki qutblik oniy

quvvatining davr mobaynidagi o'rtacha arifmetik qiymatiga teng bo'lgan kattalik, ya'ni: $P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi$, [W].

251. **Ikki qutblik reaktiv quvvati – реактивная мощность двухполюсника – two-terminal reactive power** – ikki qutblik kirishidagi sinusoidal elektr kuchlanish ta'sir etuvchi qiymati va sinusoidal elektr toki ta'sir etuvchi qiymati hamda kuchlanish va tok orasidagi faza siljish burchagi sinusi o'zaro ko'paytmalariga teng bo'lgan kattalik, ya'ni: $Q = UI \sin \varphi$, [var].

252. **Ikki qutblik kompleks quvvati – комплексная мощность двухполюсника – two-terminal integrated power** – ikki qutblik kirishidagi sinusoidal elektr kuchlanish kompleks ta'sir etuvchi qiymatini undagi sinusoidal elektr toki qo'shma kompleks ta'sir etuvchi qiymatiga ko'paytmasiga teng bo'lgan kattalik, ya'ni: $\underline{S} = \underline{U} * \underline{I}^*$, [VA].

253. **Ikki qutblik quvvat koeffitsiyenti – коэффициент мощности двухполюсника – two-pole power factor** – ikki qutblik aktiv quvvatini uning to'la quvvatiga nisbatiga teng bo'lgan skalyar kattalik, ya'ni: $\cos \varphi = \frac{P}{S}$.

254. **Elektr zanjirlarida rezonans – резонанс в электрической цепи – a resonance circuit** – induktiv va sig'im xarakterli uchastkalariga ega bo'lgan elektr zanjirida yuz beradigan hodisa bo'lib, bunda zanjir kirishidagi sinusoidal elektr kuchlanish va sinusoidal elektr toki orasidagi faza siljishi nolga teng bo'ladi.

255. **Kuchlanishlar rezonansi – резонанс напряжений – stress response** – induktiv va sig'im elementlari ketma – ket ulangan elektr zanjiri uchastkasidagi rezonans. Buna $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ bo'lib, reaktiv elementlardagi elektr kuchlanishlar modullari jihatdan o'zaro teng, yo'nalishlari esa qarama-qarshi va manba kuchlanishidan ortib ketishi mumkin.

256. **Toklar rezonansi – резонанс токов – resonance currents** – induktiv va sig'im elementlari parallel ulangan elektr zanjiri uchastkasidagi rezonans. Buna $\omega C = \frac{1}{\omega L}$ bo'lib, reaktiv elementlardagi elektr toklari modullari jihatdan o'zaro teng, yo'nalishlari esa qarama-qarshi va manba elektr tokidan ortib ketishi mumkin.

257. **Rezonans chastotasi – резонансная частота – the resonant frequency** – elektr zanjirida rezonans paytidagi elektr toki va elektr kuchlanishi chastotasi.

258. **Tarqoq parametrlı liniya to'liq qarshiligi – волновое сопротивление линии с распределенными параметрами** –

impedance of the line with distributed options – tarqoq parametrlı liniya bo‘ylab tarqalayotgan yuguruvchi sinusoidal elektromagnit to‘lqin elektr kuchlanishi kompleks amplitudasini uning elektr toki kompleks amplitudasiga nisbati.

259. **Muhitning to‘lqin qarshiligi – волновое сопротивление среды – characteristic impedance environment** – muhit bo‘ylab tarqalayotgan yassi yuguruvchi sinusoidal elektromagnit to‘lqin elektr maydoni kuchlanganligi kompleks amplitudasini undagi magnit maydoni kuchlanganligi kompleks amplitudasiga nisbati.

260. **Tarqoq parametrlı liniya[muhit]da to‘lqinning tarqalish koefitsiyenti – коэффициент распространения в линии с распределенными параметрами [среде] – distribution coefficient in line with the distributed parameters [environment]** –yuguruvchi[yassi yuguruvchi] sinusoidal elektromagnit to‘lqinni tarqoq parametrlı liniya[muhit]ning aynan berilgan (qaralayotgan) nuqtasidagi elektr kuchlanish yoki elektr toki[elektr yoki magnit maydoni kuchlanganligi] kompleks amplitudasini to‘lqinni tarqalish yo‘nalishi bo‘ylab berilgan (qaralayotgan) nuqtasidan uzunlik birligiga teng bo‘lgan masofadagi xuddi shunday kattalikka nisbatining natural logarifmiga teng uzunlik birligiga siljishidagi to‘lqin amplitudasi va fazasi o‘zgarishini tavsiflovchi kompleks kattalik.

261. **Tarqoq parametrlı liniya[muhit]da susayish koefitsiyenti – коэффициент ослабления в линии с распределенными параметрами [среде] – extinction coefficient at distributed line parameters [environment]** –yuguruvchi[yassi yuguruvchi] sinusoidal elektromagnit to‘lqin elektr kuchlanishi yoki elektr toki [elektr yoki magnit maydoni kuchlanganligi] amplitudasini tarqoq parametrlı liniya[muhit] uzunlik birligida kamayishini tavsiflovchi kattalik bo‘lib, u son jihatdan tarqoq parametrlı liniya[muhit] tarqalish koefitsiyentining haqiqiy qismiga teng.

262. **Tarqoq parametrlı liniya[muhit]da faza koefitsiyenti – коэффициент фазы в линии с распределенными параметрами [среде] – phase ratio in line with distributed parameters [environment]** –yuguruvchi[yassi yuguruvchi] sinusoidal elektromagnit to‘lqin elektr kuchlanishi yoki elektr toki [elektr yoki magnit maydoni kuchlanganligi] fazasini tarqoq parametrlı liniya[muhit] uzunlik birligida kamayishini tavsiflovchi kattalik bo‘lib, u son jihatdan tarqoq parametrlı liniya[muhit] tarqalish koefitsiyentining mavhum qismiga teng.

263. **Elektr zanjirlarida o'tkinchi jarayon** – **переходный процесс в электрической цепи** – **transitional process in the electrical circuit** elektr zanjirining bir turg'un rejimidan boshqa turg'un rejimiga o'tishda yuzaga keladigan elektromagnit jarayon.

264. **Turg'un elektr toki** – **установившийся электрический ток** – **Set electric current** – davriy o'zgaruvchan yoki o'zgarmas elektr yurituvchi kuchlar yoki kuchlanishlar ta'sirida bo'lgan elektr zanjirida o'tkinchi jarayon tugagandan keyingi turg'un davriy o'zgaruvchan yoki o'zgarmas elektr toki.

Eslatma – turg'un elektr kuchlanish, elektr yuguruvchi kuch, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa kattaliklar ham shu singari aniqlanadi.

265. **O'tkinchi elektr toki** – **переходный электрический ток** – **transient electric current** – elektr zanjiridagi o'tkinchi jarayon paytidagi tok.

Eslatma: elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa o'tkinchi kattaliklar ham shu singari aniqlanadi.

266. **Erkin elektr toki** – **преходящий электрический ток** – **passing an electric current** o'tkinchi va turg'un elektr toklari ayirmasiga teng bo'lgan elektr toki.

Eslatma: elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa erkin kattaliklar ham shu singari aniqlanadi.

267. **O'tkinchi elektr tokining turg'un tashkil etuvchisi** – **установившаяся – составляющая переходного электрического тока** – **established component of the transition electric current** – chiziqli elektr zanjiridagi o'tkinchi elektr toki tashkil etuvchisi bo'lib, u zanjirning yangi rejimidagi turg'un elektr tokiga teng.

Eslatma: elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa o'tkinchi kattaliklar turg'un tashkil etuvchilari ham shu singari aniqlanadi.

268. **O'tkinchi elektr tokining erkin tashkil etuvchisi** – **свободная – составляющая – переходного электрического тока** – **free component of the transition electric current** –chiziqli elektr zanjiridagi o'tkinchi elektr toki tashkil etuvchisi bo'lib, u zanjir elementlaridagi boshlang'ich zahira elektr va magnit maydonlari energiyasi hisobidan yuzaga keladi.

Eslatma: elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa o'tkinchi kattaliklar erkin tashkil etuvchilari ham shu singari aniqlanadi.

269. **O'tkinchi elektr tokining majburiy tashkil etuvchisi** – **принужденная – составляющая – переходного электрического тока** – **Forcing a transition component electric current** – chiziqli elektr zanjiridagi o'tkinchi elektr tokining tashkil etuvchisi bo'lib,

undagi o'tkinchi elektr toki va uning erkin tashkil etuvchisi ayirmasiga teng.

Eslatma: elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa o'tkinchi kattaliklar majburiy tashkil etuvchilari ham shu singari aniqlanadi.

270. Erkin elektr tokining tebranma tashkil etuvchisi – колебательная – составляющая – преходящего электрического тока – transient oscillatory component electric current – erkin elektr tokining tebranish bilan kechadigan tashkil etuvchisi.

Eslatma: elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa o'tkinchi kattaliklar tebranma tashkil etuvchilari ham shu singari aniqlanadi.

271. Erkin elektr tokining aperiodik tashkil etuvchisi – аperiodическая составляющая преходящего электрического тока – transient DC component electric current – erkin elektr tokining vaqt bo'yicha ishorasi o'zgarishdan o'zgaradigan tashkil etuvchisi.

Eslatma: elektr kuchlanish, magnit oqimi, elektr zaryadi va boshqa kattaliklar aperiodik tashkil etuvchilari ham shu singari aniqlanadi.

272. Tebranish konturi – колебательный контур – oscillating circuit – erkin elektr tokining tebranma tashkil etuvchisi yuzaga kelishi mumkin bo'lgan elektr zanjiri.

273. Tebranish konturining xususiy chastotasi – собственная частота колебательного контура – natural frequency of the oscillating circuit – erkin elektr toki tebranma tashkil etuvchisining chastotasi.

274. Elektr zanjiri vaqt doimiysi – постоянная времени электрической цепи – the time constant of the circuit – vaqt bo'yicha eksponensial o'zgaradigan erkin elektr toki o'tayotgan elektr zanjirini tavsiflovchi vaqt oralig'iga teng bo'lgan kattalik bo'lib, bu vaqt oralig'ida zanjirdagi erkin elektr toki e marta kamayadi, bu yerda $e = 2,71 \dots$ - natural logarifm asosi.

275. Elektr zanjirining o'zgaruvchan holati – переменные состояния электрической цепи – state variables of the electrical circuit – elektr zanjiridagi elektr toklari va elektr kuchlanishlarning minimal majmuasi bo'lib, ularning boshlang'ich qiymatlari zanjirning berilgan kirish ta'sirlarida uning energetik holati va o'tkinchi jarayonlarini to'la aniqlaydi.

276. Elektr tokining uzluksizlik prinsipi – принцип непрерывности электрического тока – the principle of continuity of electric current – istalgan muhitda yopiq sirt orqali o'tayotgan to'la elektr toki nolga teng, ya'ni $i = \oint \underline{\delta} d\underline{S} = 0$, bu yerda $\underline{\delta}$ – to'la tok zichligi, $[\frac{A}{m^2}]$; $\underline{S}$ – yopiq sirt yuzasi, $[m^2]$.

277. **Magnit oqimining uzluksizlik prinsipi** – принцип непрерывности магнитного потока – **principle of continuity of the magnetic flux** – yopiq sirt orqali o'tayotgan magnit oqimi nolga teng, ya'ni $\oint_S \underline{B} d\underline{S} = 0$, bu yerda V – magnit induksiyasi, [T]; S – yopiq sirt yuzasi, [m^2].

278. **Elektromagnit inersiya prinsipi (Lens qonuni)** – принцип электромагнитной инерции (закон Ленца) – **the principle of electromagnetic inertia (Lenz's Law)** – tokli konturlar tizimida undagi konturlar bilan ilashayotgan magnit oqimlari o'z qiymatlarini o'zgartirmasdan saqlashga intiladi. Bu magnit oqimlarining har qanday o'zgarishi shu o'zgarishga to'sqinlik qiluvchi elektr yurituvchi kuchlarni yuzaga keltiradi.

279. **Gauss teoremasi** – теорема Гаусса – **Gauss theorem** – yuzasi S bo'lgan yopiq sirt orqali o'tuvchi elektr induksiya oqimining vektori ($\underline{D}$) shu sirt ichidagi hajmda joylashgan erkin zaryadlarning algebraik yig'indisi (q) ga teng yoki boshqacha qilib aytganda, yopiq sirt orqali o'tuvchi elektr maydoni kuchlanganligi vektorining oqimi (E) shu sirt chegaralab turgan hajmdagi erkin zaryadlar algebraik yig'indisini muhitning absolyut dielektrik singdiruvchanligi (ϵ_a) ga nisbatiga teng, ya'ni $\oint_S \underline{D} d\underline{S} = q$ yoki $\oint_S \underline{E} d\underline{S} = \frac{q}{\epsilon_a}$.

280. **Kulon** – Кулон – **Pendant (Kulon)** – elektr zaryadi o'lchov birligi bo'lib, o'tkazgich ko'ndalang kesimi orqali bir sekunda bir amper o'zgarish tok o'tkazadigan elektr zaryadlari miqdoriga teng, ya'ni [$1S$] = [$A \cdot s$].

281. **Joul-Lens qonuni** – закон Джоуля-Ленца – **Lenz law Zhoullya** – o'tkazgichdan elektr toki o'tganda uning qizishi natijasida ajralib chiqayotgan issiqlik miqdori (Q) elektr toki (I) ning kvadratiga, o'tkazgich qarshiligi (R) ga va o'tkazgichdan elektr tokining o'tish vaqti (t) ga to'g'ri proporsional, ya'ni: $Q = I^2 R t$, Bu qonunning differensial shakli: $\Delta R = \gamma E^2$, bu yerda ΔR – o'tkazgich muhit ΔV hajmidagi quvvat isrofi, [Vt]; γ – o'tkazgich muhit solishtirma elektr o'tkazuvchanligi, [$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$]; E – elektr maydoni kuchlanganligi, [V/m].

282. **Om qonuni** – закон Ома – **Ohm's law** – zanjirning elektr energiyasi manbai bo'lmagan bir qismidagi tok (I) undagi kuchlanish (U) ga to'g'ri proporsional, qarshiligi (Z) ga esa teskari proporsional, ya'ni $I = \frac{U}{Z}$. Butun zanjir uchun Om qonunining umumlashgan ifodasi: $I = \frac{(U + \sum E)}{\sum Z}$, bu yerda U – zanjir (ikki qutblik) kirishidagi manba kuchlanishi, [V]; $\sum E$ – zanjir (ikki qutblik) tarkibidagi elektr yurituvchi

kuch manbalari ekvivalent EYUK, [V]; $\sum Z$ – zanjir (ikki qutblik) kirish qarshiligi, [Ω]. Uning differensial shakli: $\underline{\delta} = \underline{\gamma} \underline{E}$; bu yerda δ – elektr toki zichligi, [A/m^2]; E – natijaviy elektr maydoni kuchlanganligi, [V/m].

283. **Potensial diagramma – потенциальная диаграмма – potential diagram гистерезис** –elektr zanjiri nuqtalari potensialining shu nuqtalar orasidagi qarshiliklarga bog‘lanishini ko‘rsatuvchi grafik.

284. **Gisterezis – Гистеризис - hysteresis** –moddalarning holatiga bog‘liq ravishda fizik kattaliklar o‘zgarishidagi kechikish. Masalan, qoldiq magnetizm, ya‘ni magnit maydonini hosil qiluvchi tok yo‘qolganda magnitlangan moddaning kechikib magnitsizlanishi aynan magnit gisterezis natijasida yuzaga keladi.

285. **Magnit materialning to‘yinishi – насыщение магнитного материала – Saturation of the magnetic material** –ferromagnit o‘zakka o‘ralgan g‘altak orqali o‘tayotgan elektr toki ortib borgan sari tashqi maydon ta‘sirida tartibga kelgan elementar magnetiklar soni ham ko‘payib boradi. Nihoyat, elektr tokining biror qiymatida o‘zak to‘la magnitlanadi. Bundan so‘ng tok qancha ortgani bilan umumiy magnit maydoni faqat elektr tokining magnit maydoni hisobiga birozgina ko‘payadi, xolos. Ferromagnitning to‘la magnitlangan, ya‘ni undagi barcha elementlar magnetiklarning tashqi maydon ta‘sirida tartibga kelgan holati magnetikning to‘yinishi deyiladi, bu holatni yuzaga keltirgan elektr toki esa to‘yinish elektr toki deb ataladi. To‘yinish tokidan ferromagnit o‘zak hosil qiladigan umumiy magnit maydoni to‘yinish tokining o‘zi hosil qila oladigan magnit maydoniga nisbatan bir necha ming, hatto bir necha o‘n ming marta kuchli bo‘lishi mumkin.

286. **Elementar magnetiklar (E.m.) – элементарные магнетики – elementary magnets** – magnetiklar molekulyar tok hosil qiluvchi zarrachalar – E.m dan iborat bo‘ladi. Magnetikning magnitlanmagan holatida E.m betartib bo‘ladi va ularning umumiy yig‘indisi nolga teng bo‘ladi. Magnitlanish natijasida E.m ning bir qismi yoki barchasi tashqi magnit maydoni qutblari tomon burilib bir tartibga keladi, bunda umumiy magnit maydoni keskin kuchayadi, ya‘ni magnetik magnitlanadi.

287. **Magnit maydoni yo‘nalishi – направление магнитного поля – elementary magnets** –uning har bir nuqtasida magnit strelkasining shimoliy qutbiga ko‘rsatadigan ta‘siri yo‘nalishiga aytiladi.

288. **Parma qoidasi – правило буравчика – right-hand rule** –tokli o‘tkazgich atrofidagi magnit maydoni yo‘nalishini aniqlash qoidasi bo‘lib, unga ko‘ra agar o‘tkazgichdagi tok yo‘nalishi parmaning ilgariylanma harakatiga mos bo‘lsa, magnit maydonining kuch chiziqlari yo‘nalishi parma dastagi aylantirilgan yo‘nalishga mos bo‘ladi va aksincha.

289. **Kommutatsiya** – коммутация – **switching** –elektr zanjirida ulash yoki uzish jarayoni.

290. **O'ng qo'l qoidasi** – правило правой руки – **right-hand rule** –agar o'ng qo'lning to'rt barmog'i yordamida induktiv g'altak undan o'tayotgan elektr toki yo'nalishiga mos ravishda yo'naltirilgan holatda xayolan ushlansa, 90^0 ga burilgan bosh barmoq g'altak ichidagi magnit oqimi yo'nalishini ko'rsatadi.

291. **Asosiy magnitlanish egri chizig'i** – основное кривое намагничивание – **basic magnetization curve** –ferromagnit materialni turli darajalargacha magnitlash va magnitsizlash yo'li bilan bir nechta simmetrik gisterezis sirtmoqlari yasab, ularning uchlarini birlashtirish natijasida hosil qilingan $B = f(H)$ bog'lanish grafigi.

292. **Amper qonuni** – закон Ампера – **Ampere's law** –magnit maydoniga kirilgan tokli o'tkazgichga maydon tomonidan ta'sir qiladigan mexanik kuch (F) magnit maydoni induksiyasi (V) ga, o'tkazgichning magnit maydoni ta'sirida bo'lgan aktiv uzunligi (l) ga va o'tkazgichdan o'tayotgan elektr toki (I)ga to'g'ri proporsional, ya'ni: $F = BIl$, N. Bu kuchning yo'nalishi chap qo'l qoidasi yordamida aniqlanadi.

293. **Tokli ikkita parallel o'tkazgichning o'zaro ta'siri (Amper qonuni)** – правило левой руки – **left hand rule** – birinchi o'tkazgich I_1 elektr tokidan B_1 induksiyali magnit maydoni I_2 elektr tokli ikkinchi o'tkazgichga $F_{12} = B_1 l I_2 = \mu \mu_0 H_1 l I_2 = \mu \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi a} l$, [N] kuch bilan ta'sir qilsa, ikkinchi o'tkazgichdagi I_2 elektr tokidan hosil bo'lgan B_2 induksiyali magnit maydoni I_1 elektr tokli o'tkazgichga $F_{21} = B_2 l I_1 = \mu \mu_0 H_2 l I_1 = \mu \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi a} l$ kuch bilan ta'sir qiladi, bu yerda μ, μ_0 – mos ravishda muhitning nisbiy magnit singdiruvchanligi va magnit doimiysi; l, a – o'tkazgichlar uzunligi va ular orasidagi masofa. $|F_{12}| = |F_{21}|$ bo'lib, yo'nalishlari chap qo'l qoidasi yordamida aniqlanadi.

294. **Chap qo'l qoidasi** – правило левой руки – **left hand rule** – magnit maydoniga kiritilgan tokli o'tkazgichga maydon tomonidan ta'sir etuvchi mexanik kuch (F) ning yo'nalishini aniqlash uchun chap qo'l kaftini magnit maydoni induksiyasi (V) chiziqlariga tik tutib, oldinga cho'zilgan to'rt barmoq o'tkazgichdagi elektr toki (I) yo'nalishi tomon yo'naltirilsa, kaftga nisbatan 90^0 ga burilgan bosh barmoq o'tkazgichga ta'sir etuvchi F kuch yo'nalishini ko'rsatadi.

295. **Amper (A)** – Ампер – **Ampere** –bir amper shunday o'zgarmas elektr tokiki, bu tok vakumda bir–biridan bir metr masofada joylashgan, ko'ndalang kesimi juda (cheksiz) kichik, uzunligi esa cheksiz katta ikkita parallel o'tkazgichdan o'tayotganda, ular orasida $F_0 = 2 \cdot 10^{-7} \frac{N}{m}$ ga teng

o‘zaro ta’sir kuchi hosil qiladi.

296. **O‘ng qo‘l qoidasi – правило правой руки – right-hand rule** – o‘ng qo‘l kaftini magnit maydoni induksiyasi (V) chiziqlariga tik tutib, kaftga nisbatan 90° ga burilgan bosh barmoqni o‘tkazgichning harakat tezligi (v) tomon yo‘naltirilsa, oldinga cho‘zilgan to‘rt barmoq o‘tkazgichda magnit maydoni tomonidan induksiyalangan EYUK yo‘nalishini ko‘rsatadi.

297. **Elektr toki egri chizig‘ining amplituda koeffitsiyenti – амплитудный коэффициент кривой электрического тока – amplitude ratio of the electric current curve** – o‘zgaruvchan elektr tokining amplituda qiymati (I_m) ni uning effektiv qiymati (I) ga nisbati, ya’ni $k_a = \frac{I_m}{I}$. Sinusoidal elektr toki uchun $k_a = \sqrt{2}$.

Eslatma: elektr kuchlanish, elektr yurituvchi kuch, magnit oqimi va boshqa kattaliklar egri chiziqlarining amplituda koeffitsiyenti ham shu singari aniqlanadi.

298. **Elektr toki egri chizig‘ining shakl koeffitsiyenti – коэффициент формы кривой электрического тока – coefficient of electrical current waveform** – o‘zgaruvchan elektr toki effektiv qiymati (I) ni uning o‘rtacha qiymati (I_{or}) ga nisbati, ya’ni $k_{sh} = \frac{I}{I_{or}}$. Sinusoidal elektr toki uchun $k_{sh} = 1,11$.

299. **Vektor diagramma – вектор диаграмма – vector chart** – bir xil chastota (ω) li sinusoidal kattaliklarning soat mili harakati yo‘nalishida (ω) burchak tezlik bilan aylanadigan vektorlar orqali ifodasi. Bunda sinusoidal kattaliklar boshlang‘ich fazasi noldan katta ($\Psi > 0$) bo‘lganda, sinusoidal kattalik maksimal yoki effektiv qiymatini ifodalaydigan vektor absissa o‘qidan yuqoriga Ψ burchak ostida, $\Psi < 0$ bo‘lganda esa, Ψ burchak ostida pastga yo‘naltiriladi. Vektor diagramma sinusoidal kattaliklarni qo‘shish va ayirish amallarini ancha soddalashtiradi va ularning bir–biriga nisbatan holatini yaqqolroq tasavvur etish imkoniyatini yaratadi.

300. **Ferrorezonans – феррорезонанс – Ferro-resonance** – nochiziq induktiv elementli va chiziqli sig‘im elementli elektr zanjirlaridagi elektr toki yoki elektr kuchlanishining o‘zgarishida nochiziq element qarshiligining o‘zgarishi natijasida hosil bo‘ladigan rezonans.

301. **Kuchlanishlar ferrorezonansi – феррорезонанс напряжений – ferro-resonance voltage** – ketma–ket ulangan nochiziq induktiv qarshilik va chiziqli sig‘im qarshilikdan iborat elektr zanjiridagi sinusoidal elektr kuchlanish yoki elektr tokining o‘zgarishida sodir bo‘ladigan rezonans hodisasi.

302. **Toklar ferrorezonansi – феррорезонанс токов – Ferro-**

resonance currents –parallel ulangan nochiziq induktiv qarshilik va chiziqli sig‘im qarshilikdan iborat elektr zanjiridagi sinusoidal elektr kuchlanish va elektr tokining o‘zgarishida sodir bo‘ladigan rezonans.

303. **Volt (V) – Вольт – Volt** –o‘tkazgich ikkita nuqtasi orasidagi shunday kuchlanish(potensiallar ayirmasi)ga tengki, bunda o‘tkazgichning ushbu uchastkasidan 1 A elektr toki o‘tganda undan 1 Vt ga teng bo‘lgan quvvat ajraladi.

304. **Om (Ω) – Ом – Ohm** –o‘tkazgich uchastkasining shunday elektr qarshiligiga tengki, bunda unga 1 V kuchlanish berilganda undan 1 A miqdorida elektr toki o‘tadi.

305. **Kirxgof birinchi qonuni - первый закон Кирхгофа – first Kirchhoff's law** –zanjirning tugunlariga tegishli bo‘lib, unga ko‘ra zanjirning istalgan tugunida toklarning algebraik yig‘indisi nolga teng bo‘ladi, ya’ni:

$$\sum_{k=1}^m I_k = 0$$
 yoki elektr zanjirining istalgan tuguniga kiruvchi toklarning arifmetik yig‘indisi shu tugundan chiquvchi toklarning arifmetik

yig‘indisiga tengdir, ya’ni:
$$\sum_{i=1}^m I_i = \sum_{j=1}^q I_j.$$

306. **Kirxgof ikkinchi qonuni - второй закон Кирхгофа – second Kirchhoff's law** –zanjirning berk konturlariga tegishli bo‘lib, unga ko‘ra elektr zanjirining istalgan berk konturida kuchlanishlar pasayishining algebraik yig‘indisi shu konturdagi EYKlarning algebraik yig‘indisiga

teng, ya’ni:
$$\sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{i=1}^m E_i.$$

307. **Elektr zanjirlarida quvvatlar balansi - баланс мощностей в электрических цепях – balance of power in electrical circuits** – Energiya saqlanish qonuniga ko‘ra o‘zgaras tok zanjiriga ulangan manbalar quvvatlari algebraik yig‘indisi ($\sum EI$) zanjirning barcha iste’molchilaridagi quvvatlar arifmetik yig‘indisi ($\sum I^2 R$) ga tengdir, ya’ni: $\sum EI = \sum I^2 R.$

308. **Kommutatsiyaning birinchi qonuni - первый закон коммутации – first switching law** – tarkibida induktiv g‘altak bo‘lgan har qanday shoxobchada tok va magnit oqimi kommutatsiya paytida undan bevosita oldingi qiymatlarini saqlaydi va kommutatsiyadan keyin ana shu qiymatlaridan boshlab o‘zgaradi yoki boshqacha aytganda induktivlikdagi tok va magnit oqimi o‘z qiymatini sakrab o‘zgartira olmaydi. Bu qonun

matematik jihatdan quyidagicha yoziladi: $i_L(0_-) = i_L(0_+)$, $\Phi(0_-) = \Phi(0_+)$, bu yerda $i_L(0_-)$, $i_L(0_+)$, $\Phi(0_-)$, $\Phi(0_+)$ - mos ravishda induktivlikdagi tok va magnit oqimining kommutatsiyadan oldingi va kommutatsiya paytidagi qiymatlari.

309. **Kommutatsiyaning ikkinchi qonuni - второй закон коммутации – second switching law** – Kondensatorli har qanday shoxobchada kuchlanish va zaryad kommutatsiya paytida undan bevosita oldingi qiymatlarini saqlaydi va kommutatsiyadan keyin ana shu qiymatlaridan boshlab o'zgaradi yoki boshqacha aytganda sig'imdagi kuchlanish va zaryad kommutatsiya paytida o'z qiymatini sakrab o'zgartira olmaydi: $u_C(0_-) = u_C(0_+)$, $q(0_-) = q(0_+)$, bu yerda

$u_C(0_-)$, $u_C(0_+)$, $q(0_-)$, $q(0_+)$ - kondensatordagi kuchlanish va zaryadning mos ravishda kommutatsiyadan avvalgi va kommutatsiya paytidagi qiymatlari.

310. **Divergensiya – дивергенция – divergence** – biron bir hajm (V) ni chegaralab turuvchi berk sirt (S) ni kesib o'tuvchi vektor kattalik oqimi ($\underline{D}$) ni shu hajmga nisbatini hajm o'lchamlari nolga intilgandagi limitiga aytiladi, ya'ni: $\text{div} \underline{D} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\oint \underline{D} d\mathbf{S}}{V}$.

311. **Rotor – ротор – rotor** – maydonning ko'rilayotgan nuqtasida uyurma hosil bo'lishi qobiliyatini tavsiflaydigan, uning har bir nuqtasini aniqlaydigan va uni tavsiflovchi vektor kattalikning hajmiy hosilasiga teng bo'lgan hamda teskari ishora bilan olingan vektor kattalik.

312. **Ustma-ustlash (superpozitsiya) teoremasi - теорема наложения(суперпозиции) – theorem imposing (superposition)** – chiziqli elektr zanjirlarida o'zaro bog'liq bo'lmagan bir nechta manbalarining umumiy ta'siri alohida olingan har bir manba ta'siri natijalarining algebraik yig'indisiga teng.

313. **O'zarolik xususiyati - свойство взаимности – reciprocity property** – agar elektr zanjirning ab shoxobchasidagi EYK shu zanjirning passiv cd shoxobchasida I tok hosil qilsa, xuddi shu EYK cd shoxobchaga ulanganda, u ab shoxobchada xuddi shunday I tok hosil qiladi.

314. **Kompensatsiya teoremasi – теорема компенсации – compensation theorem** – agar chiziqli elektr zanjiri istalgan uchastkasini kattaligi shu uchastkadagi kuchlanish pasayishiga, yo'nalishi esa undan o'tayotgan tok yo'nalishiga qarama-qarshi bo'lgan EYK bilan almashtirilsa, zanjirdagi barcha toklar o'zgarishsiz qoladi.

315. **Aktiv ikki qutblik(Ekvivalent EYK manbayi) haqida teorema – теорема об активном двухполюснике(эквивалентном источнике**

ЭДС) – theorem is an active two-terminal network (equivalent to the source EMF) –agar chiziqli elektr zanjirining istalgan mn shoxobchasiga nisbatan uning qolgan qismi EYKi ajratilgan mn hoxobcha qismalaridagi salt ish rejimi kuchlanishiga, ichki qarshiligi esa shu shoxobcha uzilgan holatda m va n qismalari orasidagi passiv elektr janjirining kompleks qarshiligiga teng bo‘lgan aktiv ikki qutblik(ekvivalent EYK manbayi) bilan almashtirilsa, mn shoxobchadagi tok o‘zgarishsiz saqlanadi.

316. Ekvivalent tok manbayi haqida teorema – теорема об эквивалентном источнике тока – theorem equivalent to the current source –agar chiziqli elektr zanjirining istalgan mn shoxobchasiga nisbatan uning qolgan qismi toki ajratilgan mn hoxobcha qisqa tutashish tokiga, ichki qarshiligi esa shu shoxobcha uzilgan holatda m va n qismalari orasidagi passiv elektr janjirining kompleks o‘tkazuvchanligiga teng bo‘lgan ekvivalent tok manbayi bilan almashtirilsa, mn shoxobchadagi tok o‘zgarishsiz saqlanadi.

317. Dual zanjirlar – дуальные цепи – dual circuit –bir zanjir kontur toklarining o‘zgarish qonuniyati boshqa zanjir tugun potentsiallarining o‘zgarish qonuniyatiga o‘xshash bo‘lgan zanjirlar. Duallik shartini qanoatlantiruvchi elementlar dual elementlar deb ataladi. Masalan: qarshilik - o‘tkazuvchanlik; induktivlik - sig‘im; EYK manbayi – tok manbayi.

318. Laplas tenglamasi – уравнения Лапласа – Laplace equation –Puasson tenglamasining xususiy ($\rho = 0$) holi bo‘lib, u quyidagicha yoziladi: $\underline{E} = \text{divgrad}\varphi = \nabla^2\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 0$.

319. Puasson tenglamasi – уравнения Пуассона – Poisson equation –elektrostatikaning asosiy differensial tenglamasi bo‘lib, u quyidagicha yoziladi: $\underline{E} = \text{divgrad}\varphi = \nabla^2\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_a}$.

320. Gradiyent – градиент – gradient – Maydon nazariyasida skalyar funksiyaning gradiyenti deb, shu funksiyaning eng katta o‘sish yo‘nalishi bo‘yicha olingan hosilasi(tezligi)ga aytiladi.

321. Maksvell birinchi tenglamasi - первое уравнение Максвелла – Maxwell's first equation – magnit maydoni kuchlanganligi (H) ning rotori shu nuqtadagi to‘la tok zichligining vektori ($\underline{\delta}_T$) ga teng, ya’ni: $\text{rot}\underline{H} = \underline{\delta}_T$. To‘la tokning tashkil etuvchilarini hisobga olib, Maksvellning elektromagnit maydonni ifodalovchi birinchi tenglamasini quyidagi variantlarda yozish mumkin: a) o‘tkazuvchi muhit uchun:

$$\underline{\delta}_T = \underline{\delta}_o = \gamma \underline{E}, \text{ rot}\underline{H} = \gamma \underline{E}; \text{ b) vakuum uchun: } \underline{\delta}_T = \underline{\delta}_{vs} = \epsilon_o \frac{\partial \underline{E}}{\partial t},$$

$rot \underline{H} = \varepsilon_o \frac{\partial \underline{E}}{\partial t}$; v) dielektrik singdiruvchanligi doimiy bo'lgan dielektrik

muhit uchun esa: $\underline{\delta}_\tau = \underline{\delta}_o + \underline{\delta}_s = \gamma \underline{E} + \varepsilon_a \frac{\partial \underline{E}}{\partial t}$, $rot \underline{H} = \gamma \underline{E} + \varepsilon_a \frac{\partial \underline{E}}{\partial t}$.

322. Maksvell ikkinchi tenglamasi – второе уравнение Максвелла – Maxwell's second equation – magnit maydonining vaqt bo'yicha har qanday o'zgarishi ($\frac{\partial B}{\partial t}$) uyurmaviy elektr maydonini hosil qiladi, ya'ni: $rot \underline{E} = \frac{\partial \underline{B}}{\partial t}$. Mazkur tenglama elektromagnit induksiya qonunining differensial shaklidir.

323. Maksvell uchunchi tenglamasi (magnit oqimining uzluksizlik prinsipi) - третьей уравнение Максвелла (принцип непрерывности магнитного потока) – Maxwell's third equation (the principle of continuity of magnetic flux) – yopiq sirt(s)ni kesib o'tayotgan magnit oqimi(F) nolga teng, ya'ni: $F = \oint_S \underline{B} d\underline{S} = 0$ yoki: $div \underline{B} = 0$, bu yerda V – magnit induksiyasi, $[T]$.

324. Maksvell to'rtinchi tenglamasi (Gauss teoremasining differensial shakli) - четвертое уравнение Максвелла (дифференциальная форма теоремы Гаусса) – Maxwell's fourth equation (differential form of Gauss' theorem) – har qanday elektr zaryadi elektr maydonining manbayi bo'lishini ko'rsatadi, ya'ni: $div \underline{D} = \rho$ yoki $div \underline{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_o}$, bu yerda $\underline{D}, \underline{E}$ - mos ravishda elektr maydonining elektr siljish va kuchlanganlik vektorlari, $\left[\frac{C}{m^2} \right], \left[\frac{V}{m} \right]$.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Amirov S.F., Yoqubov M.S., Jabborov N.G'. Elektrotexnikaning nazariy asoslari: Oliy o'quv yurtlari talabalari uchun o'quv qo'llanma. – Toshkent: O'zbekiston, 2007. – 430 b.
2. Каримов А.С. Назарий электротехника: Олий ўқув юртлари талабалари учун ўқув қўлланма. – Тошкент: ОЎМТВ “ЎАЖБНТ” маркази, 2007. 1- том. – 405 б.
3. Теоретические основы электротехники: В 3-х томах. Учебник для вузов. – 4-е изд./ К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – Санкт-Петербург: Питер, 2006. – Том 1 (320 с.), Том 2 (576 с.), Том 3 (377 с.).
4. Основы теории цепей: Учебник для вузов/ Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов.– 5-е изд., перераб. - Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
5. Горбунов А.Н., Кравцов А.В. и др. Теоретические основы электротехники. – Москва: УМЦ «ТРИАДА», 2003. – 411 с.
6. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники: Линейные электрические цепи. Учебник для вузов. – Санкт-Петербург: Издательство «Лан», 2009. – 592 с.
7. Атабеков Г.И., Купалян С.Д., Тимофеев А.В., Хухриков С.С. Теоретические основы электротехники: Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле. Учебник для вузов. – Санкт-Петербург: Издательство «Лан», 2010. – 432 с.
8. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей: Линейные цепи. - Москва: Высшая школа, 1990. – 400 с.
9. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей: Нелинейные цепи. - Москва: Высшая школа, 1986. - 372 с.
10. Бычков Ю.А., Золотницкий В.М., Чернышев Э.П. Основы теории электрических цепей. Учебник для вузов. – Санкт-Петербург: Издательство «Лан», 2004. – 464 с.
11. Бычков Ю.А. и др. Теоретические основы электротехники: Справочник по теории электрических цепей. – Санкт-Петербург: Издательство «Лан», 2008. – 350 с.
12. Коровкин Н.В. и др. Сборник задач по теоретическим основам электротехники. - Санкт-Петербург: Питер, 2006. – 340 с.
13. Арсеньев Г.Н., Градов И.И. Основы теории цепей. Учебное пособие. – Москва: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2007. – 160 с.
14. Прянишников В.А. Теоретические основы электротехники. Учебное пособие. - Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2007. – 220 с.

15. Amirov S.f., Yoqubov M.S., Jabborov N.G‘., Sattarov X.A., Balgaev N.E. Elektrotexnikaning nazariy asoslaridan masalalar to‘plami: Oliy o‘quv yurtlari talabalari uchun o‘quv qo‘llanma. – Toshkent: Adabiyot uchqunlari, 2015. – 424 b.

16. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма: Учебное пособие для студентов вузов.- 2-е, стереотип.- Москва: Высшая школа, 1991. – 212 с.

17. Новгородиев А.Б. Расчет электрических цепей в МАТЛАБ: Учебный курс – Санкт-Петербург: Питер, 2004. – 250 с.

18. Марченко А.Л. Освальд С.В. Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim+CD. Учебное пособие для вузов. Москва: ДМК Пресс. 2010. - 448 с.

19. Шебес М.Р., Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей: Учебное пособие для электротехнич., радиотехнич. спец. вузов. – 4-ое изд., пераб. и доп. - Москва: Высшая школа, 1990. - 544 с.

20. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники /Под ред. П.А. Ионкина. – Москва: Энергоиздат, 1982. - 492 с.

21. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: В 2-х частях. Учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. – 8-е изд., перераб. И доп. - Москва: Высшая школа, 1996. – Часть 1 (480 с.), Часть 2 (263 с.)

22. А.Д. Нестеренко. Введение в теоретическую электротехнику: Учебное пособие для вузов. – Киев: Наукова думка, 1969. – 351 с.

23. ГОСТ Р 52002-2003. Государственный стандарт Российской Федерации. Электротехника. Термины и определения основных понятий. – Москва, 2003. – 75 с.

24. История электротехники/Под. ред. И.А. Глебова. – Москва: Издательство МЭИ, 1999. – 524 с.

25. Русча-Ўзбекча политехника атамалари лугати/ О.У. Салимов ва А.С. Каримов тахрири остида. – Тошкент: ФАН нашриёти, 1995. – 356 с.

26. Филиппов Е. Нелинейная электротехника. Пер. с нем. Под. Ред. А.Б. Тимофеева. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва: «Энергия», 1976. – 496 с.

27. М. И. Ибодуллаев. Назарий электротехникадан масалалар тўплами. – Тошкент: Ўзбекистон, 2007. – 187 с.

28. Мажидов С. Электротехникадан русча-ўзбекча луғат-маълумотнома: Олий ўқув юртларининг ноэлектротехник мутахассислиги бўйича ўқув қўлланма. – Т.: Ўзбекистон, 1994.- 262 б.
29. Elektr texnikasining nazariy asoslari: Oliy o‘quv yurtlari talabalari uchun darslik. 1- qism/K.T. Alimxodjayev, B.A. Abdullayev, Q.G‘. Abidov, M.I. Ibodullayev.– Toshkent: “Fan va texnologiya”, 2015. - 322 b.
30. Nazirova Z.G. O‘tkinchi jarayonlar: Oliy o‘quv yurtlari talabalari uchun o‘quv qo‘llanma. – Toshkent: O‘zbekiston, 2016. – 224 b.
31. Nazirova Z.G. Elektrotexnikaning nazariy asoslaridan virtual laboratoriya ishlarini bajarishga oid uslubiy ko‘rsatmalar. - Toshkent: Toshkent temir yo‘l muhandislari instituti, 2016. – 56 b.
32. C. K. Alexander. Fundamentals of Electric circuits. New York, 2012. – 1217 p.
33. C.L. Wadhwa. Electrical Power Systems New Age International, 2009. -980 p.
34. U.A.Bakshi, V.U.Bakshi. Electrical And Electronics Engineering Technical Publications, 2009. – 636 p.
35. Chakrabarti. Basic Electrical Engineering Tata McGraw-Hill Education, 2009. – 961 p.
36. Richard C. Dorf, Ronald J. Tallarida Pocket Book of Electrical Engineering Formulas CRC Press, 2003. -224 p.
37. Richard C. Dorf The Electrical Engineering Handbook, Second Edition CRC Press, 1997. -2752 p.
38. Andrzej Krawczyk, S. Wiak. Electromagnetic Fields in Electrical Engineering IOS Press, 2002. – 561p.
39. Lincoln D. Jones, Joseph A. Pinnello. Electrical Engineering: Problems and Solutions Dearborn Trade Publishing, 2005. – 210 p.
40. Edward Karalis. 350 Solved Electrical Engineering Problems Dearborn Trade Publishing, 2004. – 278 p.
41. Lincoln D. Jones. Electrical Engineering License Review Dearborn Trade Publishing, 2003. – 382 p.
42. Wai Kai Chen. The Electrical Engineering Handbook Academic Press, 2004. – 1018 p.
43. Arun G. Phadke. Handbook of Electrical Engineering Calculations CRC Press, 1999. – 336 p.

Laplas oʻzgartirishi boʻyicha original va tasvirlar

Tasvir	Original	Tasvir	Original
$F(p)$	$f(t)$	$\frac{p}{p^2 + a^2}$	$\cos at$
1	$\delta(t) = \begin{cases} \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} & \text{bo'lganda } 0 < t < \tau \\ 0 & \text{bo'lganda } \tau < t < 0 \end{cases}$	$\frac{1}{p^2 - a^2}$	$\frac{1}{a}$ shat
$\frac{1}{p}$	1	$\frac{p}{p^2 - a^2}$	chat
$\frac{1}{p^2}$	t	$\frac{p \cos b - a \sin b}{p^2 + a^2}$	$\cos(at + b)$
$\frac{1}{p^n}$	$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!}; n - \text{butun}$ musbat son	$\frac{p \sin b - a \cos b}{p^2 + a^2}$	$\sin(at + b)$
$\frac{1}{p + a}$	e^{-at}	$\frac{1}{(p^2 + a^2)^2}$	$\frac{\sin at}{2a^3} - \frac{t \cos at}{2a^2}$
$\frac{1}{p(p + a)}$	$\frac{1}{a}(1 - e^{-at})$	$\frac{p}{(p^2 + a^2)^2}$	$\frac{1}{2a} t \sin at$
$\frac{1}{p^2(p + a)}$	$\frac{1}{a^2}(e^{-at} + at - 1)$	$\frac{p^2}{(p^2 + a^2)^2}$	$\frac{1}{2a}(\sin at + at \cos at)$
$\frac{1}{(p + a)^2}$	te^{-at}	$\frac{p^2 - a^2}{(p^2 + a^2)^2}$	$t \cos at$
$\frac{p}{(p + a)^2}$	$(1 - at)e^{-at}$	$\frac{1}{(p^2 - a^2)^2}$	$\frac{t \text{chat}}{2a^2} - \frac{\text{shat}}{2a^3}$
$\frac{1}{(p + a)^3}$	$\frac{1}{2}t^2 e^{-at}$	$\frac{p}{(p^2 - a^2)^2}$	$\frac{1}{2a} t \text{shat}$
$\frac{p}{(p + a)^3}$	$t\left(1 - \frac{a}{2}t\right)e^{-at}$	$\frac{1}{(p^2 + a^2) + b^2}$	$e^{-at} \frac{\sin bt}{b}$
$\frac{1}{(p + a)^n}$	$\frac{1}{(n-1)!} t^{n-1} e^{-at}$	$\frac{p + a}{(p^2 + a^2) + b^2}$	$e^{-at} \cos bt$
$\frac{1}{p(p + a)^n}$	$\frac{1}{a^n} \left[1 - e^{-at} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(at)^k}{k!} \right]$	$\frac{(p + a) \cos \psi - b \sin \psi}{(p^2 + a^2) + b^2}$	$e^{-at} \cos(bt + \psi)$
$e^{-at} \sum_{k=0}^n \frac{n!(-a)^k}{(n-k)!(k!)^2} t^2$		478	

$\frac{p^n}{(p+a)^{n+1}}$	butun musbat son	$\frac{(p+a)\sin\psi - b\cos\psi}{(p^2+a^2)+b^2}$	$e^{-at}\sin(bt+\psi)$
$\frac{1}{(p+a)(p+b)}$	$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{bt})$	$\frac{1}{(p+a)^2 - b^2}$	$e^{-at}\frac{\text{sh}bt}{b}$
$\frac{1}{p(p+a)(p+b)}$	$\frac{1}{ab} + \frac{1}{b-a}\left(\frac{e^{-bt}}{b} - \frac{e^{-at}}{a}\right)$	$\frac{p+a}{(p+a)^2 - b^2}$	$e^{-at}\text{ch}bt$
$\frac{p}{(p+a)(p+b)}$	$\frac{1}{b-a}(be^{-bt} - ae^{-at})$	$p^{-\frac{1}{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{\pi t}}$
$\frac{1}{p^2+a^2}$	$\frac{1}{a}\sin at$	$p^{-\frac{3}{2}}$	$2\sqrt{\frac{t}{\pi}}$
$\frac{1}{p(p^2+a^2)}$	$\frac{1}{a^2}(1 - \cos at)$		

Laplas bir tomonlama o'zgartirishining asosiy xossalari

Nomi	Formulasi
Chiziqlilik xossasi	$\sum_{i=1}^n a_i f_i(t) \doteq \sum_{i=1}^n a_i F_i(p)$
Laplas o'zgartirishi va Re va Im amallarining kommutativlik xossasi	$\text{Re } f(t) \doteq \text{Re } F(p)$ $\text{Im } f(t) \doteq \text{Im } F(p)$
Originalni differensiallash (differensiallash teoremasi)	$f'(t) \doteq pF(p) - f(0)$
Originalni integrallash (integrallash teoremasi)	$\int_0^t f(t)dt \doteq \frac{F(p)}{p}$
Tasvirni differensiallash	$(-t)^n f(t) \doteq \frac{d^n F(p)}{dp^n}$
Tasvirni integrallash	$\frac{f(t)}{t} \doteq \int_0^\infty F(p)dp$
Parametr bo'yicha differensiallash	$\frac{\partial}{\partial x} f(t, x) \doteq \frac{\partial}{\partial x} F(p, x)$
Parametr bo'yicha integrallash	$\int_{x_0}^x f(t, x)dx \doteq \int_{x_0}^x F(p, x)dx$
Bog'liq bo'lmagan o'zgaruvchi masshtabini o'zgartirish (o'xshashlik teoremasi)	$f(at) \doteq \frac{1}{\alpha} F\left(\frac{p}{\alpha}\right)$
Haqiqiy o'zgaruvchili sohada siljish (siljish teoremasi)	$f(t-t_0) \doteq e^{-pt_0} F(p)$
Kompleks o'zgaruvchili sohada siljish (siljish teoremasi)	$e^{\pm\lambda t} f(t) \doteq F(p \mp \lambda)$

Chegaraviy munosabatlar: Original boshlang'ich qiymati Original oxirgi qiymati	$\lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{p \rightarrow \infty} pF(p)$ $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{p \rightarrow 0} pF(p)$
Tasvirlar ko'paytmasi (o'rama teoremasi)	$\int_0^t f_1(\tau) f_2(t-\tau) d\tau \doteq F_1(p) F_2(p)$
O'rama teoremasi natijasi	$\frac{d}{dt} \int_0^t f_1(\tau) f_2(t-\tau) d\tau \doteq pF_1(p) F_2(p)$
Dyuamel integrali	$f_1(t) f_2(0) + \int_0^t f_1(\tau) f_2'(t-\tau) d\tau = f_1(0) f_2(t) +$ $+ \int_0^t f_1'(\tau) f_2(t-\tau) d\tau \doteq pF_1(p) F_2(p)$
Originalni kosinus yoki sinusga ko'paytirish	$\cos \omega_1 t \cdot f(t) \doteq \frac{1}{2} [F(p - j\omega_1) + F(p + j\omega_1)]$ $\sin \omega_1 t \cdot f(t) \doteq \frac{1}{2j} [F(p - j\omega_1) - F(p + j\omega_1)]$

SI SISTEMASIDA ELEKTR VA MAGNIT KATTALIKLAR BIRLIKLARI

Kattaliklar	Shartli belgisi	O'lchov birliklar			SI ning boshqa birliklar orqali ifodalanishi
		Nomi	O'zbekcha belgisi	Xalqaro belgisi	
Elektr toki kuchi	I	amper	A	A	
Elektr kuchlanish	U	volt	V	V	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} / \text{A} \cdot \text{s}^3$
Elektr yurituvchi kuch	E	volt	V	V	Vt / A
Aktiv quvvat	P	vatt	Vt	W	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} / \text{s}^2$
Reaktiv quvvat	Q	volt-amper reaktiv	var	var	
To'la quvvat	S	volt-amper	VA	VA	
Elektr energiyasi	W	vatt-soat	Vt-soat	W·h	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} / \text{s}^2$
Elektr sig'imi	S	farada	F	F	Kl / V
Elektr qarshiligi	R, r	Om	Om	Ω	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} / \text{A}^2 \cdot \text{s}^3$
Elektr o'tkazuvchanlik	G	simens	Sm	S	$\text{A}^2 \cdot \text{s}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{kg}$
Induktivlik va o'zaro induktivlik	L, M	genri	G	H	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} / \text{A}^2 \cdot \text{s}^2$
Chastota	f	gers	Gts	Hz	s^{-1}
Burchak tezlik	ω	radian/sekund	rad/s	rad/s	
Elektr zaryadi miqdori	Q, q	kulon	Kl	C	$\text{A} \cdot \text{s}$
Elektr maydoni kuchlanganligi	E	volt/metr	V/m	V/m	$\text{m} \cdot \text{kg} / \text{A} \cdot \text{s}^3$
Elektr doimiysi	ϵ_0	farada/metr	F/m	F/m	$\text{A}^2 \cdot \text{s}^4 / \text{m}^3 \cdot \text{kg}$
Magnit oqimi	F	veber	Wb	Wb	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} / \text{A}^2 \cdot \text{s}^2$
Magnit induksiyasi	B	tesla	T	T	$\text{kg} / \text{A} \cdot \text{s}^2$
Magnit doimiysi	μ_0	genri/metr	G/m	H/m	$\text{m} \cdot \text{kg} / \text{A}^2 \cdot \text{s}^2$
Magnit maydoni kuchlanganligi	H	amper/metr	A/m	A/m	
Magnit yurituvchi kuch	F	amper/o'ram	A	A	
Magnit qarshilik	R_μ	amper/veber	A / Vb	A / Wb	$\text{A}^2 \cdot \text{s}^2 / \text{m}^2 \cdot \text{kg}$
Magnit momenti	p_m	amper·m ²	$\text{A} \cdot \text{m}^2$	$\text{A} \cdot \text{m}^2$	

**Amirov Sulton Fayzullayevich
Yoqubov Mirjalil Sagatovich
Jabborov Nasim G'afforovich**

NAZARIY ELEKTROTEXNIKA

**Muharrir:
Amirov Sulton Fayzullayevich**

**Texnik muharrir:
Yuldashev Nurulla Rahmatullayevich**

**Dizayner sahifalovchilar:
Badretdinov Temur Nailovich
Mamadaliyev Ulug'bek Shuxratovich**

Nashriyot litsenziyasi 10-3702. 31.05. 2016 yil.

Bosishga 03.08.2016 yilda ruxsat etildi.

Bichimi 60x84_{1/16}.

Hajmi 30,06 bosma taboq.

Adadi 65 nusxa. Buyurtma № 02.

ToshTYMI tahririy nashriyot va poligrafiya bo'limi.

Toshkent shahar, Odilxo'jayev ko'chasi, 1- uy.

«SIRIUS-MEDIA» MChJ da chop etildi.

Toshkent shahar, Yakkasaroy tumani, Bobur ko'chasi, 4- uy.