O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIY TA‘LIM, FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI

Abidov Q.G‘., Karimov R.Ch., Omonov F.B.,
Qodirov J.U., Xalmanov D.X.

NAZARIY ELEKTROTEXNIKA

I-qism

O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi ruxsatiga asosan o‘quv qo‘llanma sifatida tavsiya etilgan

Termiz – 2023

UDK 621.3(075.8) A 17

BBK 31.2ya73

Abidov Q.G‘., Karimov R.Ch., Omonov F.B., Qodirov J.U., Xalmanov D.X.

Nazariy elektrotexnika 1-qism. O‘quv qo‘llanma. / – T.: “SHUHRAT MATBUOT-SERVIS”, 2023. – 316 b.

Ushbu o‘quv qo‘llanma “Nazariy elektrotexnika” fanining I qismiga taalluqli bo‘lib, asosan elektr zanjirlarining elementlari va asosiy tushunchalari, o‘zgarmas va o‘zgaruvchan tok zanjirlarini tahlil qilishdagi asosiy qonunlar va hisoblash usullari hamda rezonans hodisalari, o‘zaro induktivlik, uch fazali zanjirlar mavzulari batafsil yoritilgan. O‘quv qo‘llanma texnika oliy o‘quv yurtlarining bakalavr va magistratura talabalari hamda ilmiy tadqiqot izlanuvchilari uchun ham mo‘ljallangan bo‘lib, bundan ishlab chiqarish sohalarining mutaxassislari, muhandislar va ilmiy-texnik xodimlar ham foydalanishlari mumkin.

Mazkur o‘quv qo‘llanma O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim muassasalari 60710600 – Elektr energetikasi (tarmoqlar va yo‘nalishlar bo‘yicha), 60710700 – Elektr texnikasi, elektr mexanikasi va elektr texnologiyalari (mashinasozlik), 60711300 – Metrologiya, standartlashtirish va mahsulot sifati menejmenti (tarmoqlar bo‘yicha) ta’lim yo‘nalishlari talabalari uchun tavsiya etilgan

Taqrizchilar:

B.X.Xushboqov – TMTI “Energetika va konchilik ishi” fakulteti dekani, t.f.n., dots.;

N.N.Niyozov – TDTU “Elektr ta’minoti” kafedrasi dotsenti, PhD.,

ISBN -978-9943-7772-1-7 ©«SHUHRAT MATBUOT-SERVIS»nashriyoti

KIRISH

“Nazariy elektrotexnika” o‘quv qo‘llanmasi o‘quv reja va fan dasturi asosida tayyorlangan hamda fan bo‘yicha o‘qiladigan barcha mavzularga tegishli bo‘lgan tayanch iboralar, atamalar, qisqacha nazariy ma’lumotlar, qoidalar, misol va masalalar hamda hisob-grafik ishlariga oid mustaqil vazifalar keltirilgan bo‘lib, u Elektr energetikasi, Elektr texnikasi, elektr mexanikasi va elektr texnologiyalari, Metrologiya, standartlashtirish va mahsulot sifati menejmenti sohalariga oid ta’lim yo‘nalishi talabalari uchun mo‘jallangan. Undan ishlab chiqarish sohalarining barcha energetik-mutaxassislari, texnik xodimlari va magistrantlar ham foydalanishlari mumkin.

Ushbu o‘quv qo‘llanma ikkinchi bosqich talabalariga elektr texnikasi yo‘nalishi bilan yaqindan tanishtiradi hamda elektr texnikaning hozirgi jamiyatdagi o‘rni, rivojlanish tarixi va ilmiy-texnika taraqqiyotidagi ta‘sirlarini chuqur o‘rgatadi.

“Nazariy elektrotexnika” fanining rivojlanishi jamiyat hayotining barcha sohalariga jadal kirib borishi – elektr energiyasini ishlab chiqarish, uni uzoq mosofalarga uzatish va ta’minlash, signallar turini ham qayta o‘zgartirish muammolarini yechishga imkon berishi bilan izohlash mumkin. Kompyuter texnolgiyalarining juda katta tezlikda murakkab matematik amallarni va tenglamalarni yechishida, murakkab ishlab chiqarish jarayonlarini avtomatik boshqarishda signallar, tasvir va axborotning boshqa har xil turlarini (telegraf, radio, televideniya va h.k.) qayta ishlash, uzatish jarayonlarida elektr signallardan foydalaniladi.

Hozirgi zamon elektr energetikasi, axborotni, signallarni uzatish, qayta ishlash tizimlari shunday murakkab texnik qurilmalar bo‘lib, elektrotexnika nazariy asoslari, radiotexnika, elektronika va hisoblash texnikasining eng oxirgi ilmiy texnik yutuqlarini o‘z ichida mujassamlantirgandir. Keyingi yillarda dunyoning bir qancha rivojlangan davlatlaridagi kabi, bizning davlatimizda ham, elektr energiyasini ishlab chiqarishning bir qancha usullari, uzoq va yaqin masofalarga uzatish, elektr energiyasini boshqa turdagi energiyalarga aylantirib,

foydaliy ish bajarib, inson faoliyatining barcha sohalarida tadbiq etish, raqamli avtomatik kommutatsiya stansiyalari, raqamli va tolali uzatish tizimlari, raqamli televideniya, sputnik aloqa tizimlari bilan jihozlangan har xil xalqaro telekommunikatsiya tarmoqlari ishlab chiqarishga joriy etilmoqda va ekspluatatsiya qilinmoqda.

XIX asr boshlarida magnitizm va elektr sohalaridagi bajarilgan ilmiy tadqiqotlar elektr va magnit hodisalarining muhim xususiyatlarini, ya'ni elektr zaryadlangan zarrachalarning harakati doimo magnit xodisalari bilan birgalikda sodir bo‘lishini va ularning mutloq bog‘liqligini ochib berdi. Bu bilan 1600-yilda Gilbert tomonidan ta'kidlangan elektr va magnit hodisalarining har biri mustaqil va o‘zaro bog‘liq bo‘lmagan jarayonlar ekanligi haqidagi tushuncha mutlaqo noo‘rin ekanligi isbotlandi. 1831-yilda Faradey elektromagnit induksiyasi hodisasini ochishi magnit maydoni yoki tokli konturga nisbatan harakat qilayotgan boshqa konturda tok hosil bo‘lishi mumkinligini aniqladi, elektr va magnit hodisalari o‘zaro bog‘liq va ajralmas jarayonlar ekanligi ko‘rsatib berildi.

Elektr texnikasi va elektr o‘lchash texnikasi, sanoat korxonalarini elektr energiyasi bilan ta'minlash tizimlari, tezkor elektron hisoblash mashinalari, axborot texnologiyalari, avtomatik boshqaruv va nazorat tizimlarining mislsiz murakkablanishi va rivojlanishi natijasida ularning elektr zanjirlarini tahlil qilish uchun umumlashtirilgan uslublarni ishlab chiqish zaruriyati tug‘ilmoqda. Ular vositasida shu murakkab tizimlarning alohida qismlari bo‘lgan va ma'lum vazifani bajaruvchi elektr zanjirlarining bir qancha elementlari o‘zlarining umumlashtirilgan parametrlari orqali qaraladi. Zanjirning bunday elementlari kompleksi tarkibiga, masalan, simli aloqa tizimlaridagi radio, teleuzatishlarda elektr o‘lchashlar, avtomatik boshqarish va nazoratidagi signallar generatorlari, kuchaytirgichlari, energiya manbalari, kompyuter texnolgiyalaridagi mantiqiy vazifalarni bajaruvchi bloklari, diskret raqamli o‘zgartkichlari va h.k. kirishi mumkin.

Murakkab tizimlarni tahlil qilishning umumlashtirilgan usullari, tizimning

bir qismi bo‘lgan ushbu alohida komplekslarning o‘zaro ta’sirini tadqiqot qilish imkonini beradi. Bunday umumlashtirilgan uslublarni qurishning boshlang‘ich asoslari sifatida, nisbatan murakkab bo‘lmagan elektr zanjirlarini hisoblashda qo‘llanilgan, elektrotexnikani nazariy asoslarining fizik qonuniyatlari ishlatiladi.

1-BOB. ELEKTR VA MAGNIT MAYDON XUSUSIYATLARI, TOK VA KUCHLANISHLAR TAVSIFLARI

1.1. Zaryadlangan zarrachalar va elektromagnit maydon, elektr maydonining o‘tkazgichdagi tok bilan bog‘liqligi

Elektromagnit hodisalari sohasidagi tadqiqotlar modda tuzilishi haqidagi hozirgi zamon tasavvurini hosil qilish uchun asosiy g‘oya va vositalarni berdi. Ushbu tadqiqotlarda asosiy va muhim o‘rinni zaryadlangan elementar zarrachalar – musbat elementar zaryadli (masalan, proton va pozitron) va manfiy elementar zaryadli (masalan, elektron) zarrachalar tashkil etadi. Zaryadlangan elementar zarrachalar moddaning atomlari va molekulalari tarkibiga kirishi, shuningdek, erkin holatda bo‘lishi mumkin. Ular uzluksiz harakatda bo‘lib, shu harakatning xarakteriga ko‘ra elektr maydoni yoki magnit maydoni (elektromagnit maydoni) sifatida bo‘lishi mumkin. Elektr zaryadiga ega bo‘lgan zarrachalar va ularning elektromagnit maydonlari materiyaning alohida turini tashkil etadi. Chunki materiya harakatining boshqa shakllarida, masalan, mexanik harakat shaklida e’tiborga olinmagan xususiyatlar, elektr zaryadli zarrachalarda mavjud.

Bunday zarrachalarning elektr zaryadi ularning muhim fizik xususiyatidir. Bu xususiyat zarracha va uning elektromagnit maydoni orasidagi o‘zaro bog‘liqlikni hamda tashqi elektromagnit maydon bilan o‘zaro ta’sirini xarakterlaydi. Elektr zaryadlari – shu materiya zarrachalarining asosiy farqlantiruvchi xususiyatlaridir, ular yana materiyaning boshqa, masalan, mexanikada o‘rganiladigan harakatning shakllariga xos bo‘lgan xususiyatlarga ham ega: massa, energiya va h.k.

Mexanika fanida moddiy jismning harakatini massa, uzunlik va vaqt orqali ifodalansa, elektromagnit hodisalarini tasvirlashda, elektromagnit hodisalarining mohiyatini ifodalovchi to‘rtinchi asosiy qiymatni kiritish zarur. Bu qiymat ixtiyoriy elektromagnit miqdor, masalan zaryadning qiymati bo‘lishi mumkin. Qiymat jihatdan materiya yoki jism zarrachasining elektr zaryadi faqat

boshqa elektr zaryadlangan zarracha yoki boshqa zaryadlangan jism bilan yoki ularning tashqi elektr maydoni bilan o‘zaro ta’siri orqali aniqlanishi mumkin.

Shunga o‘xshash, elektromagnit maydoni tushunchasini aniqlashda zaryadlangan zarracha tushunchasini ishlatmasdan ham biror natijaga erishib bo‘lmaydi. Chunki boshqa turdagi materiyalarga nisbatan elektromagnit maydonining farqli xususiyati - uning zaryadlangan zarrachalarga bo‘lgan ta’siridir. Elektromagnit maydonining zaryadlangan zarrachalarga bo‘lgan kuch ta’siri vektor xarakteriga ega va zarrachaning harakat tezligiga va ular elektr zaryadlari miqdoriga bog‘liq. Yuqorida keltirilgan fikrlar asosida quyidagi ta’riflarni keltirish mumkin.

Elektromagnit maydon *deb zaryadlangan zarrachalarga ularning tezligi va qiymatiga bog‘liq ravishda kuch ta’sirini o‘tkazadigan, uning barcha nuqtalarida «elektr maydoni» va «magnit maydoni» deb nomlangan ikki tomonini xarakterlovchi ikki vektor qiymatlari bilan aniqlanadigan materiyaning turiga aytiladi*. ***Elementar elektr zaryadi*** *deb elektron yoki protonning shunday xususiyatiga aytiladiki, unda xususiy elektr maydoni va tashqi elektr maydoni bilan ularning o‘zaro ta’sirini son qiymati jihatidan absolyut miqdorga teng, ishorasi teskari* (bunda elektronga shartli ravishda manfiy ishora, protonga – musbat ishora beriladi) *bo‘lgandagi xususiyatini aniqlaydi*.

Ushbu ta’riflar asosida bir yoki bir necha elementar elektr zaryadlaridan iborat bo‘lgan ixtiyoriy zaryadlangan zarracha - zaryad tashuvchi bo‘ladi. Masalan, elektron, proton, ion, shuningdek yarim o‘tkazgichlardagi shartli «teshik» zaryad tashuvchi hisoblanadi.

Aslida, zaryadlangan elementar zarrachalar va ularning elektromagnit maydonlari bir butundir. Ikkinchi tomondan, elektr zaryadlangan zarracha va uning elektromagnit maydoni orasidagi aniq chegarani ko‘rsatib bo‘lmaydi. Shu bilan birga, shunday faraz qilish mumkinki, zarracha va uning elektr zaryadi, masalan elektron, proton va h.k. zaryadi, fazoning juda kichik sohasida mujassamlangan. Fazoning aynan shu juda kichik sohasi uchun materiyaning

shunday harakat shakli xarakterliki, u bilan elektr zaryadlangan zarracha tushunchasi bog‘langan bo‘ladi. Moddaning zarrachalari bilan bog‘lanmagan erkin holatidagi elektromagnit maydoni juda kuchli gravitasiya maydonlari mavjud bo‘lmagan vaziyatda bo‘shliqda $c=2{,}998\cdot10^{8}$ m/s $\approx 3\cdot10^{8}$ m/s tezlikda tarqaladi.

Elektromagnit qiymatlar uchun xalqaro birliklar tizimidan (XT yoki SI) foydalaniladi. Bu tizim yetti asosiy birliklardan tashkil topgan: *metr* – uzunlik birligi, *kilogramm* – massa birligi, *sekund* - vaqt birligi, *amper* – elektr toki kuchi birligi, *kelvin* – termodinamik harorat birligi, *mol* – modda miqdori birligi, *kandela* – yorug‘lik kuchi birligi.

Elektromagnit qiymatlarni hisoblash uchun, yuqorida keltirilganlardan to‘rtta (metr, kilogramm, sekund, amper) asosiy birliklarni olish zarur va kifoyadir. Qolgan elektromagnit qiymatlar, ularga mos ravishda, ularning birliklari olingan to‘rtta asosiy birliklardan kelib chiqadi, ya’ni u yoki bu qonuniyatlar asosida aniqlanishi mumkin. XT birliklar tizimida elektromagnit qiymat uchun to‘rtinchi asosiy birlik sifatida *elektr toki kuchining birligi* - *Amper* qabul qilingan.

Birlik tizimi MKSA (metr, kilogramm, sekund, amper) XT tizimining bo‘lagidir. MKSA birlik tizimi elektromagnit maydoni rasional tizimi tenglamalari bilan bog‘langan bo‘lib, unda 4π ko‘paytma tenglamalarda tushunishga oson bo‘lgan holatlarda uchraydi, ya’ni sferik simmetriyalar bilan xarakterlanuvchi bog‘lanishlar tarkibiga kiradi.

Elektr zaryadining birligi (elektr miqdori) *Kulon*dir(Kl).

Har qanday umumlashtirilgan elektromagnit hodisasi ikki tomonlama xarakterlanadi – elektr hodisasi va magnit hodisasi hamda ular orasida uzviy aloqa mavjudligidir. Xususan, elektromagnit maydoni ikki o‘zaro bog‘langan maydonlardan iborat - ***elektr maydoni*** va ***magnit maydoni***.

Elektr maydoni - elektr zaryadlari va o‘zgarayotgan magnit maydoni yordamida hosil bo‘ladi. Magnit maydoni esa harakatlanayotgan zaryadlangan zarrachalar va o‘zgarayotgan elektr maydoni yordamida hosil bo‘ladi.

Elektr maydoni *deb, elektr zaryadlangan zarrachaga bo‘lgan ta’siri zarrachaning zaryadiga proporsional va uning tezligiga bog‘liq bo‘lmagan kuch bilan xarakterlanadigan elektromagnit maydonining ikki holatlaridan biriga aytiladi.*

Elektr maydoni fazoda uzluksiz taqsimlanganligi sababli, fazoning har bir nuqtasida va vaqtning har bir onida zaryadlangan sinov jism ma’lum qiymatga ega va ma’lum yo‘nalishda bo‘lgan mexanik kuch ta’sirida bo‘ladi. Bu ikki elementar elektr zaryadi orasidagi hosil bo‘ladigan kuchni aniqlovchi Kulon qonunidan aniqlanadi. ***Kulon qonuni*** *deb ikki qo‘zg‘almas elementar elektr zaryadi orasidagi o‘zaro ta’sir etuvchi kuchning miqdori, zaryadlar miqdorlari ko‘paytmasiga to‘g‘ri va ular orasidagi masofaga teskari proporsionaldir*.

Bundan foydalanib, elektr maydonini uning har bir nuqtasida xarakterlovchi *elektr maydonining kuchlanganligi* deb nomlangan asosiy fizik qiymatning ta’rifini aniqlash mumkin.

Elektr maydoni kuchlanganligi *deb elektr maydonini xarakterlovchi va elektr maydoni tomonidan zaryadlangan zarrachaga ta’sir etayotgan kuchni xarakterlovchi vektor qiymatga aytiladi.*

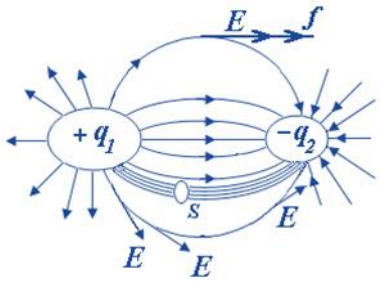
Yo‘nalishi bo‘yicha musbat zaryadli sinov jismga ta’sir etuvchi mexanik kuch f bilan mos keluvchi elektr maydon kuchlanganligi E quyidagicha ifodalanadi:

$$E = \frac{f}{q_0}$$

O‘rganilayotgan maydon taqsimlanishiga q_0 zaryadning ta’sirini butkul yo‘qotish uchun q_0 ning qiymati nolga intilishi zarur. Shu sababli, elektr maydoni kuchlanganligi uchun quyidagi aniqroq bo‘lgan ta’rifni keltirish mumkin: ***elektr maydoni kuchlanganligi*** *deb, elektr maydonining ko‘rilayotgan nuqtasiga kiritilgan zaryadlangan qo‘zg‘olmas nuqtaviy jismga ta’sir etayotgan kuch miqdorini shu zaryad nolga intilgandagi miqdoriga nisbatining, nuqtaviy jismga ta’sir etayotgan musbat kuch yo‘nalishi bilan mos bo‘lgan vektor miqdoriga aytiladi:*

$$E = \lim_{q_0 \to 0} \frac{f}{q_0}$$

Elektr maydonining barcha nuqtalaridagi kuchlanganlikni aniqlab, shunday chiziqlarni o‘tkazish mumkinki, bu chiziqlarning har qanday nuqtalaridan o‘tkazilgan urinmalar yo‘nalishi maydon kuchlanganligi yo‘nalishi bilan mos bo‘lsin (1.1-rasm). Bu chiziqlar *elektr maydoni kuchlanganlik chiziqlari* deyiladi. Chizmalarda ularni *Ye* vektorining yo‘nalishini ko‘rsatuvchi strelkalar bilan keltiriladi. Bunday chiziqlar majmuasi elektr maydoni tasvirini ifodalaydi.



1.1-rasm. **Qarama-qarshi zaryadli ikki jism yaqinidagi elektrostatik maydon**

Biror yuzani cheklaydigan berk konturni faraz qilib, shu konturning barcha nuqtalaridan elektr maydoni kuchlanganlik chiziqlarini o‘tkazamiz. Bunday chiziqlar majmuasi naysimon yuzani hosil qiladi. Shunday naysimon yuza bilan cheklangan elektr maydoni sohasi *maydon kuchlanganligi naychasi* deyiladi.

1.1-rasmda miqdorlari teng va qarama-qarshi zaryadli ikki jism yaqinidagi elektrostatik maydon tasviri keltirilgan. Rasmda *s* yuza bilan cheklanuvchi va maydon kuchlanganligi naychasini hosil qiluvchi kontur nuqtalari orqali o‘tayotgan maydon kuchlanganligining bir necha chiziqlari ham ko‘rsatilgan.

Yuqorida bayon qilingan fikrlarga ko‘ra *q* zaryadli ixtiyoriy qo‘zg‘almas tuqtaviy jism elektrostatik maydonda $f_1 = q \cdot E$ kuch ta’sirida bo‘ladi.

Bu kuch, yuqorida keltirilgan ta’rifga ko‘ra, elektrostatik maydon vujudga keladi.

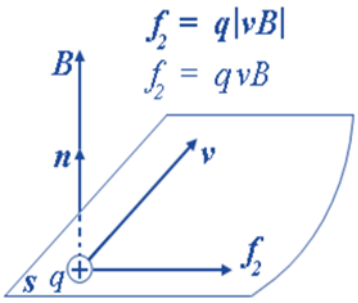
Agar harakatlanayotgan zaryadlangan zarrachaga ta’sir etayotgan kuch harakat tezligiga ham bog‘liq bo‘lsa, bu hodisa shuni anglatadiki, zarrachaga

elektr maydoni kuchi ta’siridan tashqari, magnit maydoni mavjudligi sababli hosil bo‘layotgan qo‘shimcha f_2 kuch ham ta’sir etar ekan.

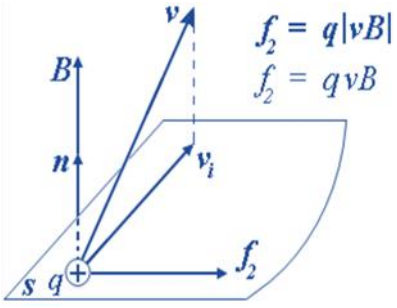
Shunga ko‘ra, *magnit maydoni* deb harakatlanayotgan zaryadlangan zarrachaga uning zaryadi va tezligiga proporsional bo‘lgan kuch ta’siri bilan xarakterlanuvchi elektromagnit maydonning ikki tomonlaridan biriga aytiladi.

Bundan shu ma’lum bo‘ladiki, magnit maydoni faqat harakatlanayotgan zaryadlangan zarracha va jismlarga ta’sir etadi.

Qo‘shimcha kuch f_2 ning qiymati harakatlanuvchi q zaryad qiymatiga proporsional bo‘lib va uning yo‘nalishi tezligi vektori v yo‘nalishiga bog‘liq. Magnit maydonining har bir nuqtasida vaqtning har onida shunday yo‘nalish (uni birlik vektori p bilan belgilaymiz) mavjudki, vektor v vektor p ga perpendikulyar bo‘lganda f_2 kuch eng katta qiymatiga erishadi (1.2-rasm), ya’ni p ga perpendi-kulyar bo‘lgan s tekislikda yotadi. Tezlik v vektorining barcha boshqa yo‘nalish-larida f_2 kuch kichik - u v vektorning shu tekislikka proyeksiyasi v_i ga (1.3-rasm) proporsional bo‘ladi. Tezlik vektori f_2 ushbu yo‘nalishga perpendikulyar, ya’ni p vektoriga va yuqorida aytilganidek, v vektoriga perpendikulyar.



1.2-rasm. ***p* ga perpendikulyar bo‘lgan *s* tekislik**



1.3-rasm. ***v* vektorning shu tekislikka proyeksiyasi**

Magnit maydonining har bir nuqtasida uni tavsiflovchi asosiy fizik qiymat - *magnit induksiyasi*dir. U vektor qiymat bo‘lib, p yo‘nalishi (1.2 va 1.3-rasm) bilan mos keluvchi yo‘nalishli V vektor bilan belgilanadi. Kuch f_2 magnit induksiyasi qiymatiga proporsional. Ularni ifodalovchi $f_2=q\cdot|vE|$ mavjud, bunda $|vE|$ - vektorlar v va E ning vektor ko‘paytmalaridir.

Elektr maydoni va o‘tkazgichdagi tok bog‘liqligi. O‘tkazgich orqali tok

o‘tganda, uning atrofida magnit maydon hosil bo‘ladi. Magnit maydon to‘yinma-gan holatda uning miqdori tok miqdoriga proporsional bo‘ladi $F=L\cdot i$.

Bundan quyidagi xulosa kelib chiqadi: o‘tkazgichdan tok oqishida uning atrofida albatta magnit maydoni mavjud bo‘ladi va aksincha, o‘tkazgich atrofida magnit maydoni mavjud bo‘lsa, albatta magnit maydornni hosil qilgan shu o‘tkazgichda tok mavjud bo‘ladi.

1.2. O‘tkazuvchanlik, ko‘chirish va siljish toklari, tokning uzluksizligi

Erkin zaryadlarning yo‘naltirilgan harakat jarayoni va /yoki/ magnit maydoni mavjudligida elektr siljishi vektorining vaqt bo‘yicha o‘zgarishi, *to‘la elektr toki* deyiladi.

«Elektr toki» atamasi na faqat hodisani tavsiflash uchun, balki shu hodisa-ning jadalligini aniqlash uchun ham «elektr toki kuchi» atamasining sinonimi sifatida ishlatiladi.

«Elektr toki» atamasini ikki xil ta’riflashga barxam berish uchun «Elektr» atamasini faqat hodisani ifodalash uchun ishlatiladi.

To‘la elektr tokini quyidagi asosiy turlarga ajratish qabul qilingan: o‘tkazuv-chanlik toki, ko‘chirish toki va siljish toki.

O‘tkazuvchanlik elektr toki*, biror V hajmda* $\Sigma q_i \cdot v_i \neq 0$ *bo‘lgandagi elektr zaryadi erkin tashuvchilarining yo‘naltirilgan harakati hodisasidir*. Bunda q_i va v_i – jism V hajmining N erkin zaryadlar to‘plamiga kiruvchi i-zaryadining qiymati va harakat tezligi.

Ba’zi moddalar elektr o‘tkazuvchanlik, deb nomlangan, vaqt bo‘yicha o‘zgarmaydigan elektr maydon ta’sirida vaqt bo‘yicha o‘zgarmaydigan tok o‘tkazish xususiyatiga ega bo‘ladilar. Demak, bunday xususiyatga ega bo‘lgan moddalar o‘tkazgichlar yoki o‘tkazgich moddalari, deb nomlanganlar. Ular uchun asosiy elektrik xususiyat - elektr o‘tkazuvchanlikdir. Bir qator moddalar mavjudki, ular uchun elektr o‘tkazuvchanlikning tashqi omillarga (masalan, harorat, yorug‘lik, elektr va magnit maydonlar va h.k.) bog‘liqligi xarakterlidir.

O‘tkazuvchanlik toki miqdori biror yuza s orqali vaqt birligida o‘tayotgan

zaryad miqdori q bilan o‘lchanadi. Vaqtning ixtiyoriy onida o‘tkazuvchanlik toki ko‘rilayotgan *s* yuzadan zaryad tashuvchilar bilan ko‘chirilayotgan elektr zaryadi-ning vaqt bo‘yicha hosilasiga teng, ya’ni: $i=dq/dt$.

Elektr toki skalyar qiymatdir. Yuza *s* ning har xil elementlarida zaryad-langan zarrachalarning harakatlanish yo‘nalishlari har xil bo‘lishi mumkin. Biroq, ko‘rilayotgan yuzaning juda kichik elementi Δs ning barcha nuqtalarida zaryad-langan zarrachalar yo‘nalishi bir xil deb hisoblash mumkin. Bu holat Δs miqdor-ning kamayishi bilan, ya’ni $\Delta s \to 0$, yanada qat’iylashadi. Shu sababli, tekshirish jarayoniga vektor qiymat kiritiladi – zaryadlangan zarrachalar harakati yo‘nalishi-ga normal bo‘lgan Δs yuza elementi orqali oqayotgan Δi tokning shu element nolga intilayotgandagi nisbatining limitiga, yo‘nalishi zarrachalar musbat yo‘nalishi bilan mos kelgan yoki, mos ravishda, manfiy zaryadlangan zarrachalar yo‘nalishi bilan mos kelmagan

$$J = \lim_{\Delta s \to 0} \frac{\Delta i}{\Delta s} = \frac{di}{ds}.$$

Agar *J* vektori yuzaga musbat normal bilan β burchak hosil qilsa, u holda quyidagi ifoda mavjud bo‘ladi:

$$di = J\cos\beta ds = Jds$$

Tok chekli o‘lchovlardagi *s* yuzadan o‘tganligi uchun

$$i = \int_S J\cos\beta ds = \int_S Jds.$$

Faqat yuzaning barcha nuqtalarida tok zichligining qiymatlari bir xil bo‘lib, shu yuzaga normal bilan bir xil burchak hosil qilgandagina quyidagini yozish mumkin:

$$i = J\cos\beta \int_S ds = J\cos\beta s.$$

Tok birligi sifatida *amper* (*A*) va tok zichligi birligi sifatida *amper bo‘lingan kvadrat metr* (A/m^2) ishlatiladi.

O‘tkazgichlardagi o‘tkazuvchanlik tokining boshqa turdagi toklardan farqi shundaki, o‘tkazgich harorati o‘zgarmas bo‘lganda o‘tkazuvchanlik toki zichligi elektr maydoni kuchlanganligiga proporsional bo‘ladi. Bunda izotrop muhitda

tok zichligi vektori *J* yo‘nalishi elektr maydoni kuchlanganligi *Ye* vektori bilan mos bo‘ladi va tok chiziqlari elektr maydoni kuchlanganligi chiziqlari bilan mos bo‘ladi. Shu sababli o‘tkazuvchanlik toki zichligi uchun o‘tkazgich muhitida quyidagini yozish mumkin:

$$J = \gamma E.$$

Bunda γ kattalik *moddaning solishtirma o‘tkazuvchanligi* deyiladi.

Unga teskari bo‘lgan qiymat $\rho = 1/\gamma$ *moddaning solishtirma elektr qarshiligi deyiladi.*

Demak, elektr maydon kuchlanganligi va tok zichligi orasidagi bog‘lanishni quyidagicha yozish mumkin:

$$E=\rho J.$$

Solishtirma qarshilikning birligi *Om·metr* ($\Omega \cdot m$). Darhaqiqat, $\rho = E/J$ bog‘lanishdan, uning birligi uchun $1\frac{V}{m}\cdot\frac{m^2}{A}=1\frac{V\cdot m}{A}=1\Omega\cdot м$ chunki $1V/A=1\Omega$ qarshi-lik birligidir. Shuningdek, solishtirma o‘tkazuvchanlikning birligi *Simensni metrga nisbati (Sm/m)* bo‘ladi.

O‘tkazuvchi moddalarni biror qiymat γ (yoki ρ) bilan tavsiflash imkoniyati shuning natijasida paydo bo‘ldiki, o‘tkazuvchi moddalarda berilgan haroratda zaryadlangan zarrachalarning o‘rtacha tezligi, demak tok zichligi o‘zgarmas magnit maydonida o‘zgarmas bo‘lib qoladi, chunki bu zarrachalar elektr maydonida tezlanishidan hosil bo‘lgan kinetik energiya modda atomlariga uzatiladi va issiqlik harakatiga aylanadi.

Metallarda elektr toki o‘tkazuvchanligi elektronlarning harakatini tasvirlay-di. Metallardan tashqari, o‘tkazuvchi moddalarga ko‘mir va elektrolitlar ham kiradi. Elektrolitlarda o‘tkazuvchanlik musbat va manfiy ionlar bilan amalga oshiriladi. O‘tkazuvchi moddalarda solishtirma o‘tkazuvchanlik γ va demak, solishtirma qarshilik ρ modda haroratiga bog‘liq.

Ko‘chirish elektr toki deganda elektr zaryadlarini erkin fazoda harakat-lanayotgan zaryadlangan zarrachalar yoki jismlar bilan ko‘chirish hodisasi tushuniladi. Ko‘chirish toki o‘tkazgichlardagi o‘tkazuvchanlik tokidan shu bilan

farqlanadiki, uning zichligini $J=\gamma E$ bog‘lanish bilan ifodalab bo‘lmaydi, undagi solishtirma o‘tkazuvchanlik γ tok o‘tkazuvchi muhitni xarakterlovchi kattalik. Elektr zaryadli zarrachalar yoki jismlarning elektr maydonida erkin harakatida ularning tezliklari E maydon kuchlanganligiga proporsional emas. Darhaqiqat, elektr maydonida q zaryadli zarrachaga ta’sir etayotgan kuch qE ga teng. Bunday zarrachaning tezlanishi maydon kuchlanganligiga proporsional. Demak, uning erkin fazodagi harakati tekis tezlanuvchan bo‘ladi, chunki muhitning qarshiligi bo‘lmaydi.

Ko‘chirish elektr tokining muhim turlaridan biri – zaryadga ega bo‘lgan elementar zarrachaning bo‘shliqdagi harakatidir. Ko‘chirish elektr tokining yana bir turi – gazdagi elektr tokidir. Ko‘chirish toki zichligini v tezlikda harakat-lanayotgan zarrachalar o‘rtacha hajm zaryadi ρ bilan ifodalaymiz. Shu maqsadda fazoda hajmi $dl\cdot ds$ bo‘lgan to‘g‘ri burchakli paralellepiped ajratamiz. Uning dl qirrasi tezlik vektoriga parallel bo‘lsin. Paralellepiped ichidagi zaryad $dq=\rho\cdot dl\cdot ds$. Shu zaryadning barchasi ds yuzadan shunday dt vaqt oralig‘ida o‘tadiki, bu vaqt oralig‘ida zaryadlangan elementar zarrachalar dl masofani o‘tsin. Bu vaqt oralig‘i $dl=vdt$ sharti orqali aniqlanadi. Demak, ds yuza orqali oqayotgan tok $di=dq/dt=\rho v\ ds$ va tok zichligi quyidagicha bo‘ladi $J=di/ds=\rho v$. Manfiy zaryadli zarrachalar harakatida ($q<0$), tokning shartli musbat yo‘nalishi harakat yo‘nalishiga qarama-qarshi bo‘ladi va J bilan v orasida $J=-\rho v$ bog‘lanish mavjud bo‘ladi. Ikkala ifoda ρ ning ixtiyoriy ishorasida quyidagi vektor shaklida birlashtiriladi

$$J=\rho v.$$

Agar $\rho>0$ bo‘lsa J va v vektorlar yo‘nalishlari mos bo‘ladi.

Agar $\rho<0$ bo‘lsa, ular qarama-qarshi yo‘nalishda bo‘ladi.

Agar bir vaqtning o‘zida zaryadlarning ρ_+ hajm zichligi, v_+ tezlikda musbat zaryadlangan zarrachalar harakati va zaryadlarning ρ_- hajm zichligi, v_- tezlikda manfiy zaryadlangan zarrachalar harakati mavjud bo‘lsa, u holda ko‘chirish toki zichligi

$$J_{ko'ch}=\rho_+v_+ +\rho_-v_- .$$

Siljish elektr tokini dielektriklarda o‘zgaruvchan elektr maydoni mavjud bo‘lganda e’tiborga olish zarur bo‘ladi.

Asosiy elektr hususiyati - elektr maydoni ta’sirida qutblanish (*polyarizasiya*) *qobiliyatiga ega bo‘lgan modda* ***dielektrik*** *deyiladi.*

Dielektriklar maxsus turlari mavjud bo‘lib, ular segnetoelekirik deb nomlanadi. Segnetoelekiriklarda χ koeffisiyentining qiymati maydon kuchlangan-ligiga kuchli bog‘liqlikda bo‘lib, maydon kuchlanganligi va haroratning ba’zi qiymatlarida juda katta miqdorlarga erishishi mumkin. Koeffisiyent χ moddaning *absolyut dielektrik ta’sirchanligi* deyiladi.

Dielektrikning qutblanish jarayonini maydon ta’siridagi musbat va manfiy zaryadlangan zarrachalarning siljishi bilan tushuntirish mumkin. Agar q – dipolning musbat zaryadi va N_1 – birlik hajmdagi dipollar soni bo‘lsa, u holda maydonning s yuza orqali o‘tishi jarayonida E vektor yo‘nalishida $q \cdot N_1 \cdot x \cdot s$ musbat zaryad siljiydi va qarama-qarshi yo‘nalishda – manfiy zaryad $-qN_1(d-x)s$ siljiydi. Manfiy zaryadning maydoniga teskari yo‘nalishda siljishiga, musbat zaryadning maydoni yo‘nalishida siljishi ekvivalent bo‘lganligi uchun, s yuzadan o‘tgan umumiy zaryad

$$Q' = qN_1xs + qN_1(d-x)s = N_1qds = Ps,$$

bunda $N_1 \cdot q \cdot d = P$ bo‘lganligi uchun $P = \dfrac{Q'}{s}$.

Umumiy holatda bir jinsli bo‘lmagan maydon uchun

$$P = \lim_{\Delta s \to 0} \frac{\Delta Q'}{\Delta s} = \frac{dQ'}{ds}, \qquad (1.1)$$

ya’ni, *qutblanganlik - zarrachalar siljishi yo‘nalishiga normal bo‘lgan element yuzasi orqali maydon o‘rnatilishi jarayonida dielektrik moddasidagi siljigan zaryadlangan zarrachalar olib o‘tadigan elektr zaryadining, shu element yuzasi nolga intilgandagi nisbati limitiga teng.*

Elektr maydonining vaqt bo‘yicha har qanday o‘zgarishida dielektrikning qutblanganligi R o‘zgaradi. Bunda dielektrik moddasida atomlari va molekulalari tarkibiga kiruvchi elektr zaryadli elementar zarrachalar harakatlanadilar. Dielektrikdagi elektr tokining bu turi *qutblanganlik*

(polyarizasiya) elektr toki deyiladi. Dielektrikda zaryadlangan zarrachalar erkin bo‘lmaganligi va elektr maydoni ta’sirida siljishi mumkin bo‘lganligi uchun, qutblanganlik tokini siljish elektr toki ham deb ataladi, aniqrog‘i, u siljish tokining bir tashkil etuvchisidir. Bu tokning siljishini J' modda qutblanishining o‘zgarishi P bilan bog‘lash qiyin emas.

Agar biror yuza elementi ds zaryadlangan zarrachalar siljish yo‘nalishida ixtiyoriy o‘rnatilgan bo‘lsa, u holda $P_n=dQ'/ds$, bunda P_n – yuqoridagi P vektori-ning ds yuza elementiga normal o‘tkazilgan tashkil etuvchisi. P vektori vaqt bo‘yicha o‘zgarishida ds yuza elementidan quyidagi tok o‘tadi

$$di=\frac{d}{dt}(P_n ds)=\frac{dP_n}{dt}ds.$$

Ikkinchi tomondan, $di=J'_n ds$, bunda J'_n - tok zichligi J' vektorining ds elementiga normal tashkil etuvchisi. Shunday qilib

$$J'=\frac{dP_n}{dt}.$$

Yuza elementi ds ning vaziyatini ixtiyoriy olish mumkin bo‘lganligi uchun, tok zichligi vektori J' ning tashkil etuvchisi biror yo‘nalishda modda qutblangan-ligi P vektorining vaqt bo‘yicha xosilasiga teng bo‘ladi, degan hulosaga kelamiz. Xususan, J' ning OX, OY, OZ o‘qlariga proyeksiyalari quyidagicha:

$$J'_x=\frac{dP_x}{dt};\qquad J'_y=\frac{dP_y}{dt};\qquad J'_z=\frac{dP_z}{dt}.$$

Tok zichligi vektori

$$J'=i\frac{dP_x}{dt}+j\frac{dP_y}{dt}+k\frac{dP_z}{dt}=\frac{d}{dt}(iP_x+jP_y+kP_z),$$

bunda i, j, k – koordinata ox, oy, oz o‘qlari bo‘ylab yo‘nalgan vektorlar.

$iP_x + jP_y + kP_z = P$ bo‘lganligi uchun $J'=dP/dt$.

Demak, siljish elektr toki vektorining ko‘rilayotgan qismi modda qutblan-ganligi vektorining vaqt bo‘yicha hosilasiga teng ekan.

Yuqorida ta’kidlanganidek, modda qutblanganligining o‘zgarishi sababli hosil bo‘lgan siljish toki va, demak, siljish toki zichligi J', dielektrikdagi to‘la

siljish toki va, demak, to‘la siljish toki zichligining bir qismini tashkil etadi.

Darhaqiqat, dielektriklardagi elektr siljish vektori D ikki D_0 va P tashkil etuvchilardan iborat:

$$D=D_0+P,$$

bunda $D_0=\varepsilon_0 E$. Elektr maydoni o‘zgarganda ikkala tashkil etuvchilar ham o‘zgaradi. Shunday qilib,

$$dD/dt=dD_0/dt+dP/dt.$$

Keyingi ifodaning ikkinchi tashkil etuvchisi, yuqorida hozirgina aniqlanganidek, dielektrik moddasida zaryadlangan elementar zarrachalar harakati natija-sida hosil bo‘lgan siljish elektr toki zichligi vektoridir. Ifodaning birinchi tashkil etuvchisi ham tok zichligi birligiga ega. U elektr maydoni vaqt bo‘yicha o‘zgargandagi fizik jarayonni xarakterlaydi. Yuqorida, materiyaning maydon sifatida mavjudlik shaklini ifodalaydigan fazoni, ya’ni bizga ma’lum bo‘lgan materiya zarralari bo‘lmagan sohani bo‘shliq, deb atasak, unda birinchi tashkil etuvchini *bo‘shliqdagi siljish tokining zichligi*, deb nomlash mumkin. Uning belgilanishi quyidagicha bo‘ladi

$$dD_0/dt.$$

Shunday qilib, dielektrikdagi *to‘la siljish toki* zichligining J_{sj} vektori:

$$J_{sj}=dD/dt=J_0+J'=dD_0/dt+dP/dt\ .$$

Elektr siljishi D vektorining vaqt bo‘yicha hosilasini vektor tushuncha sifatida ko‘rish shart.

Siljish toki zichligi vektorining tashkil etuvchilari uchun barcha holatlarda

$$J_{silx}=\frac{D_x}{dt};\ J_{sily}=\frac{dD_y}{dt};\ J_{silz}=\frac{dD_z}{dt}.$$

O‘zgaruvchan tok bo‘lganda, ayniqsa, axborot tizimlarida uchraydigan yuqori va o‘ta yuqori chastotalarda siljish toki, na faqat dielektriklarda mavjud bo‘ladi, balki yarim o‘tkazgich va o‘tkazgich moddalarda ham paydo bo‘ladi.

Darhaqiqat, tashqi maydon ta’sirida ushbu moddalar molekulalari, dielektriklardagidek qutblanishi zarur. Bundan tashqari, bo‘shliqdagi siljish ham paydo bo‘lishi shart. Yarim o‘tkazgich moddalarda siljish toklarini yuqori chastota bilan o‘zgaradigan maydonlarda e’tiborga olish zarur. O‘tkazgich

moddalarda esa, katta chastotalarda siljish toklari o‘tkazuvchanlik toklariga nisbatan sezilarli bo‘ladi, biroq ularni, aksariyat, e’tiborga olinmaydi.

Bu fikrlar asosida quyidagini ta’kidlash mumkin: elektr tokining eng muhim xususiyati – u bilan bog‘liq bo‘lgan magnit maydonining hosil bo‘lishini – tokning barcha tashkil etuvchilari uchun ham bir xil tatbiq etish mumkin. Bu fikrlar tajribada to‘laligicha tasdiqlandi.

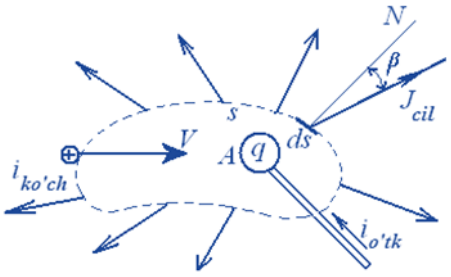
Yuqorida keltirilgan mulohazalar asosida to‘la elektr toki, yoki to‘la tok skalyar qiymat bo‘lib, ko‘rilayotgan yuza orqali o‘tayotgan o‘tkazuvchanlik toki va siljish toki yig‘indilariga teng, ya’ni

$$i = \frac{dq}{dt} + \frac{d}{dt}\int_S D_0 ds.$$

Ushbu ifodada q ning tarkibiga erkin tashuvchilarning zaryadlari ham, modda qutblanganidagi yuzadan o‘tayotgan yig‘indi bog‘langan zaryadlar ham kiradi. Dielektrikda biror s berk yuzani tasavvur qilaylik (1.4-rasm) va shu yuza ichida joylashgan A jism zaryadlanayapti, deb faraz qilaylik. Jismning zaryadi q ortganda uni o‘rab turgan elektr maydoni kuchayadi va dielektrikda elektr siljishi ortadi. Shuning uchun s yuza orqali ichkaridan tashqariga tomon siljish toki oqadi. Yuza s orqali siljish vektorining oqimi yuza ichida joylashgan q erkin zaryadga teng:

$$\oint_S (dD/ds)d\vec{s} = q$$

Shu tenglikdan vaqt bo‘yicha hosila olamiz $\frac{dq}{dt} = i_{sil}$ $\oint_S J_{sil} ds = i_{sil}$ bunda tenglikning o‘ng qismi yuza s ichkarisidan tashqariga tomon oqayotgan siljish tokidir.



1.4-rasm. **Dielektrikdagi *s* berk yuzani tasviri.**

Qiymat *dq/dt* yuza *s* ichida joylashgan erkin zaryadning tezligi. Yuza *s* bilan cheklangan fazo hajmidagi musbat erkin zaryadning ortishi faqat tashqi fazodan hajm ichiga musbat zaryadlarning kiritilishi yoki manfiy zaryadlarning teskari yo‘nalishda uzatilishi bilan bajarilishi mumkin. Bu uzatish yoki *s* yuzani kesib o‘tuvchi o‘tkazgichlardagi o‘tkazuvchanlik toki $i_{o'tk}$ yordamida yoki yuza orqali zaryadlangan jismlarda yoki fazoda harakatlanayotgan zaryadlangan zarrachalar yordamida ko‘chirish toklari $i_{ko'ch}$ bilan amalga oshirish mumkin. Agar $dq/dt>0$ bo‘lsa, musbat zaryadlar tashqi fazodan *s* yuza chegaralagan hajm ichiga olib kiriladi, demak, $(i_{o'tk}+i_{ko'ch})$ toklar yig‘indisi manfiy ishorali bo‘ladi, chunki musbat ishorali deb tashqi normal qabul qilingan edi. Shunday qilib

$$dq/dt=-(i_{o'tk}+i_{ko'ch}),$$

tenglik $\oint_S (dD/ds)dt = \frac{dq}{dt}$ quyidagicha qayta yozilishi mumkin

$$i=-(i_{o'tk}+i_{ko'ch}) \quad \text{yoki} \quad i+i_{o'tk}+i_{ko'ch}=0.$$

Demak, *ixtiyoriy berk yuza orqali oqayotgan barcha turdagi toklar yig‘indisi (o‘tkazuvchanlik, ko‘chirish va siljish toklari) nolga teng ekan.*

Agar δ orqali to‘la tok zichligini $(\delta=J+J_{cj})$ hamda *i* bilan yuzadan o‘tayotgan barcha tokni belgilasak, u holda ixtiyoriy berk yuza uchun quyidagi qiymat

$$i=\oint_S \delta ds=0$$

elektr toki uzluksizlik prinsipining umumiy ifodasi deyiladi. Ushbu muhim prinsip quyidagicha ta’riflanadi: *ixtiyoriy muhitda olingan berk yuza orqali o‘tayotgan to‘la elektr toki nolga teng.* Bunda yuzadan chiqayotgan tok musbat, kirayotgan – manfiy hisoblanadi.

Shunday qilib, tok chiziqlari hyech qayerida na boshlanishi va na oxiri bo‘lmaydigan, prinsipial ravishda berk chiziqlardir. Elektr toki har doim berk yo‘ldan oqadi.

Barcha keltirilgan fikrlardan shu ayon bo‘ladiki, tokning uzluksizlik prinsipi yoki berklik prinsipi faqatgina dielektriklardagi siljish toki va aynan bo‘shliqdagi siljish toki tushunchasini kiritish bilan umum-tatbiq ahamiyatiga

ega bo‘ladi.

1.5-rasm. **Signallarni uzatish liniyasi.**

Misol sifatida signallarni uzatish liniyasini ko‘raylik (1.5-rasm). O‘zgaruvchan kuchlanish bo‘lganda o‘tkazgichlar orasidagi dielektrikda siljish toklari bo‘ladi. Berk yuza s ni shunday o‘tkazamizki, u liniyaning bitta o‘tkazgichini qamrab olsin.

O‘tkazgichdagi s_1 yuzaga kiruvchi $(i+i_{sj})$ va undan s_2 yuza orqali chiquvchi (i) toklar dielektrikdagi siljish toki miqdori bilan o‘zaro farqlanadilar. Shu sababli o‘tkazgichdagi o‘zgaruvchan tok o‘tkazgichning har xil kesim yuzalarlarida [masalan, s_1 yuzadagi tok $(i+i_{sj})$, s_2 yuzadagi tok (i)] vaqtning bir onida har xil bo‘ladi. Ushbu fizik jarayonni o‘tkazgichlar orasidagi kuchlanish tez o‘zgaradigan (katta chastotali) zanjirlarda va uzun liniyalarda e’tiborga olinadi.

1.3. Kuchlanish, potensiallar farqi, elektr yurituvchi kuch

Kuchlanish. Elektr zanjirlari va elektr maydoni bilan bog‘liq bo‘lgan eng muhim qiymatlardan bo‘lgan elektr kuchlanishi, elektr potensiallari farqi va elektr yurituvchi kuchlarni o‘rganishga o‘tamiz.

Agar q zaryadli zarracha elektr maydonida biror masofa bo‘ylab ko‘chirilsa, u holda unga ta’sir etuvchi kuchlar ish bajaradi. Bu ishning ko‘chirilayotgan zaryadga nisbati *elektr kuchlanishi* deb atalmish, fizik qiymatga teng bo‘ladi. Zarracha q ning dl masofaga (1.3-rasm) ko‘chirilishini ko‘raylik, bunda maydon kuchlari quyidagi ishni bajaradi:

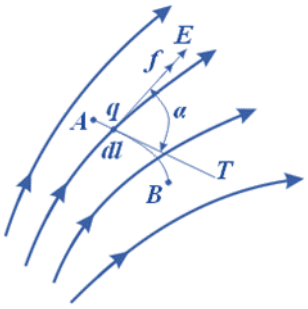
$$dA = f \cdot \cos\alpha dl = qE\cos\alpha dl = qEdl$$

Yo‘nalishi T urinmaga mos, uzunligi dl yo‘l elementiga teng bo‘lgan miqdor dl vektori bilan belgilangan. Bunda α vektorlar Ye va dl orasidagi

burchakdir.

A nuqtadan (1.6-rasm) *V* nuqtagacha masofa bo‘ylab zarrachani ko‘chirishda maydon kuchlari bajarayotgan ish quyidagiga teng

$$A=\int_A^B f\cos\alpha dl=q\int_A^B E\cos\alpha dl=q\int_A^B Edl$$



1.6-rasm. **Maydon kuchlanganligi chiziqlari.**

Bu ish berilgan masofa bo‘ylab maydon kuchlanganligining chiziqli integral $\int_A^B E\cos\alpha dl$ga proporsional. Bu chiziqli integral *A* dan *V* gacha masofa bo‘ylab elektr kuchlanishiga teng. Kuchlanishni *u* harfi bilan belgilash qabul qilingan.

Shunday qilib, ikki nuqtalar orasidagi elektr kuchlanish quyidagicha aniq-lanadi:

$$u_{AB}=\int_A^B E\cos\alpha dl=\int_A^B Edl$$

Demak,

$$A=q\cdot u_{AB}$$

Umumiy holda ko‘rilayotgan masofa ixtiyoriy muhitdan o‘tishi mumkin, xususan, u butunlay o‘tkazgichdan o‘tishi mumkin, butunlay yarim o‘tkazgichdan va qisman o‘tkazgichdan, qisman yarim o‘tkazgichdan o‘tishi mumkin.

Bayon etilganlarga muvofiq, ***elektr kuchlanishi*** - *ko‘rilayotgan masofa bo‘ylab elektr maydonini xarakterlovchi va qiymati jihatidan elektr maydoni kuchlanganligining shu masofa bo‘ylab chiziqli integraliga teng bo‘lgan fizik*

kattalikka aytiladi. Aksariyat, biror masofa sohasi bo‘ylab elektr kuchlanishi haqida gapirganda, soha bo‘ylab *kuchlanishlar pasayuvi* atamasini ishlatadilar. Shu asosda, biror berk kontur bo‘ylab elektr maydoni kuchlanganligining chiziqli integrali $\oint Edl$ shu kontur bo‘ylab barcha bo‘laklar elementi kuchlanishlar pasayuvining yig‘indisiga teng bo‘ladi.

Kuchlanishning birligi *Volt* [*V*].

Keltirilgan fikrlardan shu kelib chiqadiki, ***elektr maydonining kuchlangan-ligi*** - *kuchlanishlar pasayuvining maydon kuchlanganligi chizig‘ining uzunlik birligiga nisbatiga teng.* Darhaqiqat, agar masofa yo‘nalishi maydon kuchlangan-ligi birligi bilan mos kelsa, *dl* masofadagi kuchlanishlar pasayuvi *du=E dl*, demak *E=du*/*dl*. Shuning uchun, elektr maydoni kuchlanganligining o‘lchov birligi Volt bo‘lingan metr (1 *V/m*).

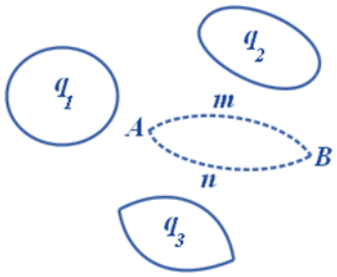
***Elektr potensiali va potensiallar farqi*.** Yuqorida ta’kidlanganidek, o‘tkazgich muhitida elektr maydon kuchlanganligi *Ye* tok zichligi *J* bilan quyidagi bog‘lanishda $E = \rho J$ bo‘ladi, bunda ρ – muhitning solishtirma qarshiligi. Oddiy holatda, o‘zgarmas tokli *i* to‘g‘ri chiziqli *l* uzunlikdagi va kesim yuzasi *s* bo‘lgan o‘tkazgichda kuchlanishlar pasayuvi *u=El* bo‘ladi, tok esa *i=Js* ga teng. Shunday qilib, *u=ρJl=ρli/s=ri.* Qiymat *r=ρl/s=u/i* ko‘rilayotgan o‘tkazgich bo‘lagining elektr qarshiligidir. Elektr qarshilik *Om*da (Ω) o‘lchanadi. Ifoda *u=ri* ko‘rilayotgan o‘tkazgich bo‘lagi uchun Om qonuni deyiladi. O‘tkazgichda vaqt birligida issiqlik sifatida ajralib chiqayotgan energiya miqdorini ifodalaydigan quvvat quyidagicha $p=A/t=uq/t=ui=r^2i$ yoziladi. Bu bog‘lanish Joul-Lens qonunini ifodalaydi. Quvvatning birligi *Vatt* (*W*).

Elektrostatik maydon, ya’ni zaryadlangan harakatsiz zarrachalar maydoni (1.4-rasm) mavjud bo‘lsin. Elektrostatik maydonda ixtiyoriy berk kontur bo‘yicha maydon kuchlanganligining chiziqli integrali nolga teng: $\oint Edl = 0$. Elektrostatik maydonning bu muhim xususiyati energiya saqlanish qonuni prinsipidan kelib chiqadi. Zaryadi *q* ga teng bo‘lgan nuqtaviy jism *AmBnA* (1.7-rasm) berk konturi bo‘ylab ko‘chmoqda, deb faraz qilaylik. Berk konturning bir

qismida harakat maydon kuchlari yo‘nalishida bo‘ladi va maydon kuchlari hosil qilayotgan ish musbat bo‘ladi. Berk konturning qolgan qismida harakat maydon kuchlari yo‘nalishiga teskari bo‘ladi va maydon kuchlari hosil qilayotgan ish manfiy bo‘ladi. Maydon kuchlari *q* zaryadli jismni butun berk kontur bo‘ylab ko‘chirishda bajargan ish nolga teng bo‘lishi shart.

$$q\oint Edl=0, \qquad \text{ya’ni} \qquad \oint Edl=0.$$

Darhaqiqat, agar shu shart bo‘lmaganda edi, *AmBnA* konturni aylanib o‘tish yo‘nalishini shunday tanlab olish mumkin bo‘lar ediki, unda bajarilgan ish musbat bo‘lar edi. Biroq, berk kontur bo‘yicha aylanib o‘tilgandan so‘ng, tizim va *q* zaryadli jism yuqori aniqlikda boshlan-g‘ich holatga qaytadi, demak, *q* zaryadli jism konturni birnecha (ixtiyoriy) marta qayta aylanishi mumkin va har bir aylanishda musbat ishni hosil qilishi mumkin bo‘ladi (1.7-rasm).



1.7-rasm. **Zaryadi *q* ga teng bo‘lgan nuqtaviy jism *AmBnA* berk konturi bo‘ylab ko‘chishi**

Bunday cheksiz energiya manbasini hosil qilish imkoniyatining mavjudligi energiya saqlanish qonuniga zid bo‘ladi. Shunday qilib, elektrostatik maydonda ixtiyoriy kontur bo‘ylab kuchlanganlikning chiziqli integrali nolga teng bo‘lishi shart. Bundan, bevosita berilgan boshlanich va keyingi *A* va *V* nuqtalar tanlanishidan maydon kuchlanganligi chiziqli integralining bog‘liq emasligi kelib chiqadi. Darhaqiqat,

$$\oint\limits_{AmBnA} Edl=\int\limits_{AmB} Edl+\oint\limits_{BnA} Edl=0,$$

bundan

$$\int\limits_{AmB} Edl=-\int\limits_{BnA} Edl+\int\limits_{AnB} Edl,$$

integrallashdagi *m* va *p* yo‘llar ixtiyoriy tanlangan va demak, elektrostatik maydonda integral $\int_A^B Edl$ qiymati itegrallash yo‘lini tanlashga bog‘liq bo‘lmaydi va faqat *A* va *V* koordinatalar tanlanishiga bog‘liq ekan.

Shu integralga teng bo‘lgan qiymatni A va V nuqtalar ***potensiallari farqi*** *deyiladi va* φ_A-φ_B *kabi belgilanadi.* Demak

$$\varphi_A - \varphi_B = \int_A^B Edl$$

kelib chiqadi.

Ikkinchi tomondan, ushbu integral *A* nuqtadan *V* nuqtagacha biror yo‘l bo‘ylab aniqlangan kuchlanishga teng. Demak, elektrostatik maydon uchun qo‘llaganda «*kuchlanish*» va «*potensiallar farqi*» atamalari *bir hil qiymatga ega* ekan.

Bundan buyon potensiallar farqini, kuchlanishga o‘xshash *u* harfi bilan belgilaymiz, shu sababli φ_A-φ_B=u_{AB} belgilashni qabul qilamiz.

Yuqoridagilardan shu ma’lum bo‘ladiki, *elektrostatik maydonning ikki nuqtasi potensiallari farqi, qiymati birga teng bo‘lgan musbat ishorali zaryadli nuqtaviy jismni bir nuqtadan ikkinchi nuqtaga ko‘chirgandagi maydon kuchlari bajargan ishga teng ekan.*

Keyingi nuqta sifatida fazodagi *P* nuqtani olamiz. U holda integral $\int_A^P Edl$ ning qiymati faqat *A* nuqtaning *x, y, z* koordinatalari funksiyasi bo‘ladi. Bu funksiyani U_A yoki *U(x, y, z)* belgilasak, quyidagicha yozish mumkin bo‘ladi

$$\int_A^B Edl = \varphi_A = \varphi(x, y, z)$$

U qiymatni ko‘rilayotgan maydon nuqtasining elektr potensiali deyiladi. Berilgan nuqta *P* potensiali nolga teng, chunki $\varphi_A = \int_A^B Edl = 0$.

Berilgan maydonni xarakterlovchi elektr potensialini, potensiali nolga teng deb qabul qilinadigan ixtiyoriy *P* nuqtaning faqat ixtiyoriy o‘zgarmas

qiymati-gacha aniqlikda hisoblash mumkin. Elektr potensiali deb nomlangan, har bir nuqtasida skalyar qiymat bo‘lgan ixtiyoriy kattalik bilan xarakterlanuvchi elektr maydoniga *potensial elektr maydoni* deyiladi. Ularga elektrostatik maydon, elektr yurituvchi kuch manbalari ta’sirida bo‘lmagan va qo‘zg‘olmas o‘tkazgichlardan o‘tgan o‘zgarmas tok elektr maydoni kiradi. Darhaqiqat, bu holda o‘tkazgichlarda zaryadning taqsimlanishi, elektrostatikadagidek vaqt bo‘yicha o‘zgarmas bo‘ladi. O‘zgarmas tokli qo‘zg‘olmas o‘tkazgichlar atrofidagi va ular ichidagi elektr maydoni *stasionar elektr maydoni* (E_{stas}) deb ataladi.

Elektrostatikaning real masalalarini yechishda, aksariyat yerning sathi potensiali nolga teng deb qabul qilinadi. Fazoning cheklangan sohalarida joylash-gan va cheksiz dielektrik muhit bilan o‘ralgan zaryadlangan jismlar masalalarining nazariy tadqiqotlarida, aksariyat zaryadlangan zarrachalardan cheksiz uzoqlikda bo‘lgan nuqtalarning potensiallari nolga teng deb qabul qilinadi, ya’ni potensialni quyidagi integral kabi aniqlanadi

$$\varphi_A = \int_A^{\infty} E dl$$

Elektr maydoni kuchlanganligi chiziqlarini to‘g‘ri burchak ostida kesib o‘tuvchi yuzalar *teng elektr potensialli yuzalar* deyiladi. Darhaqiqat, bu yuzadagi ixtiyoriy chiziq bo‘ylab $\int_A^{\infty} E\cos\alpha dl = 0$ ga ega bo‘lamiz, chunki $\cos\alpha = 0$. Demak, ushbu yuzada joylashgan ikki ixtiyoriy A va V nuqtalari potensiallari farqi nolga teng. $U(x,y,z)$=const tenglama teng potensialli yuzada joylashgan nuqtalar majmuasini aniqlaydi, ya’ni shu yuza tenglamasidir. Teng elektr potensialli yuzalarning chizma tekisligidagi izi ***teng potensiallar chizig‘i*** deyiladi. Ayonki, teng potensiallar chiziqlari maydon kuchlanganligi chiziqlari bilan har qayerda to‘g‘ri burchak ostida kesishadi.

Zaryadlarning statik holatida o‘tkazgichlar ichidagi elektr maydon kuchlan-ganligi nolga teng bo‘lishi kerak, chunki tokning (J=0) yo‘qligida $E=\rho J=0$ bo‘ladi. Shu sababli, elektrostatik holatda har bir o‘tkazgich jism

o‘zining barcha hajmida bir xil potensialga ega bo‘ladi: bu jismlar yuzalari teng elektr potensialli yuzalar bo‘lib, dielektriklardagi kuchlanganlik liniyalari ularga normal ekanini bildiradi.

Agar zaryadlangan o‘tkazgich jismni o‘rab olgan izolyasiyalovchi muhitning dielektrik singdiruvchanligi elektr maydoni kuchlanganligiga bog‘liq bo‘lmasa, u holda dielektrikning hamma joyida *Ye* qiymat ham, demak jismning *U* potensiali ham jismning *q* zaryadiga proporsional bo‘ladi. Zaryad *q* ning *U* ga nisbati jismning ***elektr sig‘imi*** deyiladi.

$$C = \frac{q}{U},$$

bunda, potensial cheksiz katta bo‘lganda $C=0$ bo‘ladi. Alohida jismning elektr sig‘imi jismni aniqlovchi *g* geometrik parametrlariga va uni o‘rab turgan muhitning absolyut dielektrik ε singdiruvchanligiga bog‘liq: $C=F'(g,\varepsilon)$. Agar dielektrik bir jinsli bo‘lsa, u holda $C=\varepsilon \cdot f(g)$. Dielektrik singdiruvchanlik ε qiymati *E* ga bog‘liq bo‘lmasa, *C* ning qiymati *q* va *U* ga bog‘liq bo‘lmaydi.

Dielektrik bilan izolyasiyalangan, zaryadlari teng va qarama-qarshi ishorali $q_1=-q_2$ bo‘lgan ikki o‘tkazgich potensiallari farqi zaryadlardan birining qiymatiga proporsional bo‘ladi. Bunda quyidagi miqdor

$$\mathrm{C} = \frac{q_1}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q_2}{\varphi_2 - \varphi_1},$$

shu jismlar orasidagi *elektr sig‘imi* deyiladi. *C* jismning shakli, o‘lchovlari va o‘zaro joylashganligini ifodalovchi *g* geometrik parametrlarga, shuningdek dielektrikning absolyut dielektrik ε singdiruvchanligiga bog‘liq. Bir jinsli dielektrik uchun $C=\varepsilon f(g)$.

Elektr sig‘imlarida ishlatish uchun maxsus tayorlangan bunday ikki jismlar tizimi *kondensator* deyiladi. Ikki jism orasidagi sig‘imning analitik ifodasi uchun potensiallar farqi hisoblanishidagi qismining zaryadi olinadi. Bunda *doimo* $C>0$. Sig‘imning o‘lchov birligi sifatida *Farada* (*F*) qabul qilingan.

Ifoda $\varepsilon=D/E$ dan ε qiymatning birligi

$$1\frac{\text{Kl}}{m^2}:\frac{V}{m}=1\frac{Kl}{V\cdot m}=1\frac{F}{m}.$$

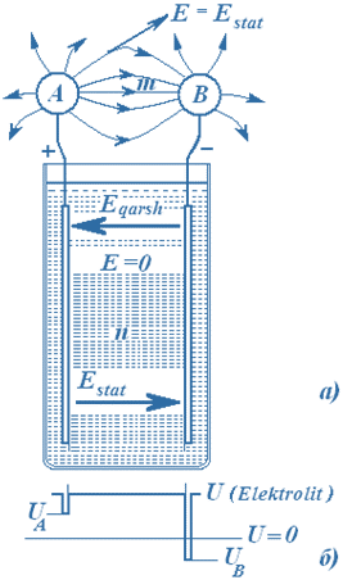
Elektr yurituvchi kuch. Endi *elektr yurituvchi kuch* kattaligini o‘rganaylik. Har qanday potensial elektr maydonining, xususan, elektrostatik maydonining xarakterli hususiyati, aynan, maydon kuchlanganligining ixtiyoriy berk kontur bo‘ylab chiziqli integrali nolga tengligi, *elektr yurituvchi kuch* (*EYuK*) deb nomlangan manbai bo‘lmagan fazo sohasiga taalluqlidir.

EYuK tushunchasining paydo bo‘lishi noelektrik va nopotensial xarakterdagi elektr maydonlarining mavjudligidan kelib chiqadi.

Umumiy holda quyidagicha talqin qilamiz: *agar berk kontur bo‘ylab elektr maydon kuchlanganligining chiziqli integrali nolga teng bo‘lmasa, berk konturda ye elektr yurituvchi kuch ta’sir etayotgan bo‘ladi,* quyida ko‘rsatganimizdek, bu chiziqli integral konturda ta’sir etayotgan *EYuK*ga teng bo‘ladi

$$\oint Edl=e\neq 0$$

EYuK manbalari sifatida, masalan, elektr generatorlari, galvanik elementlar, akkumulyatorlar, termoelementlar ishlatilishi mumkin. «Elektr yurituvchi kuch» tushunchasi taalluqli bo‘lgan miqdorning qanday ekanligini aniqlash uchun, 1.8-rasm misol tariqasida galvanik elementni ko‘ramiz.



1.8-rasm. **Galvanik element**

Galvanik element klemmalari-ga ulangan *A* va *B* jismlar *EYuK* ta'sirida zaryadlanadi. Dielektrikda *A* va *B* jismlar orasidagi ixtiyoriy yo'l bo'ylab *E* vektordan olingan integral ular potensiallari farqiga teng:

$$\int_{AmB} Edl = \varphi_A - \varphi_B = u_{AB}$$

A dan *B* jismgacha integrallash yo'lini ikki xil yo'nalishda bajarish mumkin: birinchisi ko'rsatilayotgan *AmB* yo'lni olsak – *A* jismdan ulanish o'tkazgichi – elementning musbat elektrodi – elektrolit – manfiy elektrod - ulanish o'tkazgichi –*B* jism; ushbu yo'l bo'ylab integral $\int_{AmB} Edl=0$ nolga teng bo'ladi. Darhaqiqat, bu yo'l to'laligicha o'tkazgich muhitidan o'tadi. Metallda o'tkazuvchanlik jarayoni elektron o'tkazuvchanligi bilan ta'minlanadi, elektrolitda – musbat va manfiy ionlar bilan ta'minlanadi. $J=0$ bo'lganligi uchun $E=\rho J=0$.

Elektrodlarning yuzalaridagi yupqa qatlamda elektrod va elektrolit zaryad-lari kuchlanganligi E_{stat} bo'lgan elektr maydoni va kuchlanganligi E_{qarsh} ga teng va unga qarshi yo'nalgan tashqi elektr maydoni hosil bo'ladi. Ular yig'indisi

$$E=E_{stat}+E_{qarsh}=0 \quad \text{yoki} \quad E_{stat}=-E_{qarsh}.$$

Bundan

$$\int_{AnB} E_{stat}dl = -\int_{AnB} E_{qarsh}dl = \int_{BnA} E_{qarsh}dl$$

qiymat

$$\int_{BnA} E_{kirish}dl = e$$

galvanik elementning *EYuK* ni ifodalaydi. Bu *EYuK* element ichidagi zaryadli zarrachalarni elektrostatik maydon E_{stat} kuchlariga qarama-qarshi yo'nalishda harakatni amalga oshiradi.

E'tiborni shunga qaratish zarurki, agar manbaning ichida integrallash yo'li uning manfiy klemmasidan musbati tomon bo'lsa, *EYuK* musbat bo'ladi.

Ushbu elektr yurituvchi kuchning paydo bo'lish tabiati shundaki, *erish bosimi* ostida musbat ionlar (o'tkazuvchanlik elektronlarisiz qolgan metall

atomlari) elektroddan elektrolitga o‘tishga intiladi. Bu o‘tishga elektrolitdagi metall atomlarining musbat ionlari *osmotik bosim* bilan qarshilik ko‘rsatadi. Bu ikki bosimlarning farqi ta’sirida musbat ionlarning elektroddan elektrolitga o‘tishi yoki shu bosimdan qay biri kattaroqligi sababli, teskari yo‘nalishda o‘tishi (elektroliz jarayoni) sodir bo‘ladi. Natijada, birinchi holatda - elektrod manfiy zaryadlanadi (metallda ortiqcha o‘tkazgich elektronlari bilan), ikkinchi holatda – musbat zaryadlanadi, elektrolit esa qarama-qarshi zaryad oladi. Elektrod va elektrolit orasida potensiallar farqi o‘rnatiladi va ionlarning o‘tishiga qarshilik ko‘rsatuvchi elektrostatik maydon E_{stat} hosil bo‘ladi. Ionlar o‘tishi elektrostatik maydon kuchlari ta’sirida bosimlar farqi muvozanatlanganda yakunlanadi.

Bosimlar farqi natijasida hosil bo‘lgan mexanik f kuchning ionga ta’siri, E_{stat} ga teng bo‘lgan elektrostatik maydon kuchlanganligiga proporsionaldir; bunda q – ionlar zaryadi. Shunday qilib, muvozanat holati quyidagi shartlar bajarilganda hosil bo‘ladi

$$E_{stat}+E_{qarsh}=E=0.$$

1.5,*a*-rasmda E_{qarsh} va E_{stat} vektorlar shartli ravishda elektrolit joylashgan elektrodlar orasidagi fazoda o‘rnatilgan, aslida, yuqoridagi fikrlarga ko‘ra, ular faqatgina elektrolit va elektrodlar orasidagi yupqa qatlamlarda noldan farqli bo‘ladilar. Bu fikrlar 1.5,*b*-rasmdagi potensiallar taqsimlanishi grafigida o‘z aksini topgan.

O‘zining bir qismi bilan *EYuK* manbasi *ichidan* o‘tgan berk kontur (1.5,*a*-rasm) *AmBnA* bo‘ylab E vektorining chiziqli integralini tuzamiz va quyidagini hosil qilamiz

$$\int\limits_{AmBnA} Edl=\int\limits_{AmB} Edl+\int\limits_{BnA} Edl=\varphi_A-\varphi_B,$$

chunki

$$\int\limits_{BnA} Edl=0,$$

Ikkinchi tomondan,

$$\int\limits_{AmBnA} Edl=\oint E_{stat}dl+\oint E_{qarsh}dl=e,$$

chunki $\oint E_{stst} dl = 0, \quad \oint E_{qarsh} dl = \int E_{qarsh} dl = e$

Demak $e = \varphi_A - \varphi_B = U_A - U_B$,

ya’ni *elementning elektr yurituvchi kuchi potensiallar farqiga teng yoki* ushbu misolda bir hil -*tashqi zanjiri uzilgan klemmalardagi* (zanjirda tok bo‘lmagandagi) *kuchlanishga teng*.

Bu fikrlardan ko‘ramizki, $\oint Edl = 0$ shart faqat *EYuK* manbasidan tashqarida bo‘lgan fazo uchun taalluqlidir.

Galvanik elementdan tashqari, *EYuK* ni hosil qilishning birnecha usullari mavjud. Bulardan biri – *kontakt EYuK* laridir. Bunda turli jinsli metallar kontakti mavjud bo‘lganda bir metalldan ikkinchi metallga o‘tkazuvchanlik elektronlari o‘tishi va, shu tufayli, bir metallda ortiqcha musbat, ikkinchi metallda ortiqcha manfiy elektr zaryadlari paydo bo‘ladi. Elektronlarning bunday o‘tishi kontakt joyidagi noelektrik xarakterdagi tashqi elektr maydonining ta’siri sifatida ko‘rilishi mumkin. Tutashgan metallarda har xil ishorali zaryadlarning paydo bo‘lishi natijasida kontaktlar potensiallari farqi bo‘lishiga, tokning yo‘qligida esa kontakt *EYu*K deb nomlangan *EYuK*ning hosil bo‘lishiga olib keladi. Kontakt *EYuK* tutashuvchi metallar turlariga va haroratiga bog‘liq.

Ushbu holat termoelementlarda ishlatiladi. Agar ikki turli jinsdagi o‘tkaz-gichlardan berk kontur hosil qilsak, ikki payvandlangan o‘tkazgichlar kontakt-laridagi har xil t va t_0 haroratda ulangan joylardagi kontakt *EYuK*lari har xil bo‘ladi va kontur bo‘ylab o‘zaro kompensasiyalanmaydi. Shu sababli, berk konturda *termoelektrik yurituvchi kuch deb nomlangan* natijaviy *EYuK* hosil bo‘ladi. Termoelektrik yurituvchi kuchning umumiy qiymati tarkibiga uning qo‘shimcha *EYuK*lari ham kiradi. Qo‘shimcha *EYuK*lar ikki bir jinsli o‘tkazgichlar bo‘ylab, ularning bir uchi ikkinchi uchiga qaraganda yuqoriroq haroratli muhitda bo‘lganli-gi sababli hosil bo‘ladi. Bu qo‘shimcha *EYuK*lar bir haroratli metalldagi elektron-larning issiqlik harakati boshqa haroratdagidan jadalroq bo‘lganligidan o‘tkazgich elektronlarining o‘tishi sababli hosil bo‘ladi. Termoelementda tokning oqishi natijasida *EYuK*ning ta’siri issiqlik energiyasining elektr energiyasiga aylanishi bilan bog‘liq. Aksariyat

qo‘llaniladigan termoparalarda sovuq va issiq qatlamning haroratlari, mos ravishda, 0 va 100^{o}C bo‘lganda, *EYuK* qiymati taxminan birnecha millivolt yoki birnecha o‘n millivolt bo‘ladi. Keyingi boblarda magnit maydoni-ning vaqt bo‘yicha o‘zgarganidagi induktivlanadigan *EYuK* ni o‘rganganimizda, «elektr yurituvchi kuch» tushunchasi kengaytiriladi, shunda bu muhim hodisaning umumiy ta’rifi keltiriladi.

E’tiborni shunga qaratish zarurki, *EYuK*ni ta’riflaganda, yuqorida keltirilganidek, integrallash yo‘li energiya manbaining *ichida* manfiy klemmadan musbat klemmaga tomon o‘tkaziladi ($e = \int\limits_{BnA} E_{tash} dl$), uning *A* va *B* klemmalaridagi kuchlanishni aniqlaganda esa, integrallash tashqaridagi yo‘ldan musbat klemmadan manfiy klemmaga tomon o‘tkaziladi

$$u_A = \varphi_A - \varphi_B = \int\limits_{AmB} Edl.$$

Nazorat savollari

1. Elekr maydonini tushuntirib bering
2. Kulon qonunini izohlang.
3. Elektromagnit maydonini tushuntirib bering.
4. Elementar elektr zaryadi deb nimaga aytiladi?
5. Elektr maydon kuchlanganligini tushuntirib bering.
6. O‘tkazuvchanlik toki deb nimaga aytiladi?
7. Ko‘chirish elektr tokini tushuntirib bering.
8. Siljish elektr tokini tushuntirib bering.
9. Dielektrik deb nimaga aytiladi.
10. Elektr kuchlanishini izohlab bering.
11. Elektr potensiali va potensiallar farqini tushuntiring.
12. Elektrostatik maydonni tushuntirib bering.

2-BOB. ELEKTR ZANJIRLARINING ELEMENTLARI VA ASOSIY TUSHUNCHALARI

2.1. Elektr va magnit zanjirlari

Birinchi bobda bayon etilgan ma’lumotlardan shunday fikr ayon bo‘ladiki, zaryadlangan zarrachali jismlar va tokli konturlardagi, ya’ni ixtiyoriy telekommunikasion, axborot yoki elektrotexnik tizimlarda sodir bo‘layotgan ixtiyoriy elektromagnit hodisa, na faqat tokli konturlarni hosil qilgan zaryadlangan zarrachalar va o‘tkazgichlardagi fizik jarayonlar bilan ifodalanadi, balki shu jismlarni o‘rab turgan dielektriklar va o‘tkazgichlardagi elektromagnit hodisalari bilan ham aniqlanadi. Bundan ko‘ra ahamiyatliroq qilib aytish mumkinki, aynan zaryadlangan zarrachalar va tokli konturlarni o‘rab turgan dielektriklardagi elektromagnit maydon, tizimning bir yeridan ikkinchi yeriga uzatilishi mumkin bo‘lgan signallarning, ya’ni energiyaning tashuvchilari hisoblanadi. Zaryadlangan jismlarning elektr maydoni shu jism tashqarisida – uni o‘rab turgan dielektrikda bo‘ladi. O‘tkazgichlarda oqayotgan elektr tokining magnit maydoni esa shu o‘tkazgich tashqarisida va uning ichida mavjud bo‘ladi. Biroq tokli o‘tkazgichning ichidagi elektr maydoni faqat shu o‘tkazgich materialining cheklangan solishtirma qarshiligiga bog‘liq va o‘tkazgichlardagi energiya isrofini aniqlaydi. O‘tkazgich orqali uzatilayotgan energiya esa, to‘la-to‘kis o‘tkazgichni o‘rab turgan muhit elektromagnit maydoniga taalluqli. Telekommunikasion va elektrotexnik qurilmalarning ixtiyoriy elementi elektr sig‘imi va induktivligi ularning elektr va magnit maydonlari bilan aniqlanadi.

Shunday qilib, elektrotexnik hodisalarni tahlil qilishda va ularning to‘la-ligicha ko‘rishning barcha holatlarida tekshirilayotgan qurilmaning elektromagnit maydonini o‘rganish zarur.

Ko‘pgina tahliliy vaziyatlarda, elektrotexnik qurilmalar elektromagnit maydonlarining barcha nuqtalarini xarakterlovchi E_{tashq}, E_{ind}, E, D, δ, H va B kattaliklarining fazoda va vaqt bo‘yicha taqsimlanish ifodalarining murakkab tahlilini qilmasdan, faqatgina elektr yurituvchi kuch $e=\oint(E_{tash}+E_{induk})dl$, elektr

kuchlanish $u=\int_A^B Edl$, elektr zaryadi $q=\oint Dds$, elektr toki $i=\oint_S \delta ds$, magnit oqimi $\Phi=\oint_S Bds$ kabi integral qiymatlardan foydalanib, elektrotexnik qurilmalardagi jarayonlarni yetarli darajada aniq ifodalash imkoniyati mavjud bo‘lar ekan. Bunday imkoniyatning vujudga kelishiga sabab – elektr toklari oqishi uchun biz aksariyat yaxshi izolyasion muhitga o‘ralgan, yuqori elektr o‘tkazuvchanligiga ega bo‘lgan materiallardan, yetarli darajada tor yo‘llar hosil qilinishiga harakat qilishimizdir (masalan elektr tarmoqlari) yoki ushbu yo‘llar bo‘ylab geometrik o‘lchamlari cheklangan, yaxshi o‘tkazgich qurilmalarni o‘rnatishimizdir (masalan, elektron lampalar, yarim o‘tkazgich asboblar, elektrolitik vannalar).

Elektromagnit jarayonlarini ifodalanishda elektr yurituvchi kuch, tok va kuchlanish tushunchalaridan foydalanish mumkin bo‘lgan, elektr toki oqishi uchun yo‘llarni hosil qiluvchi qurilmalar va obyektlar majmualari ***elektr zanjirlari*** *deyiladi.*

Shunga o‘xshash, ko‘pgina vaziyatlarda magnit induksiyasi berk chiziqlari oqishi uchun yo‘llarni, shu yo‘llar bo‘ylab yuqori magnit singdiruvchanligiga ega bo‘lgan ferromagnit materialli jismlar va ular atrofida past magnit singdiruvchan-ligiga ega bo‘lgan muhit (masalan, havo) hosil qilishga harakat qilamiz. Bunday vaziyatlarda jarayonlarni yetarli darajadagi aniqlik bilan magnit yurituvchi kuch $iw=\oint Hdl$ va magnit oqimi $\Phi=\oint Bds$ kabi integral tushunchalar yordamida ifodalash imkoniyati paydo bo‘ladi.

Elektromagnit jarayonlari magnit yurituvchi kuch va magnit oqimi tushunchalari bilan ifodalanishi mumkin bo‘lgan, ferromagnit jismli qurilmalar majmualari ***magnit zanjirlari*** *deyiladi*.

Elektromagnit maydoni jarayonlarining murakkab ko‘rinishidan elektr zarjirlaridagi jarayonlarning soddalashtirilgan ko‘rinishiga o‘tish usullari, bundagi jarayonlarning haqiqatan murakkab ko‘rinishidan og‘ishdagi joizlikni e’tiborga olish, demak bundagi qabul qilinadigan abstraksiyalarni o‘rganish, ushbu bobning asosiy maqsadi bo‘ladi. Bunda, yana keyingi boblarga taalluqli, elektr zanjirlari-ning asosi bo‘lgan umumiy tushunchalarni ham keltiramiz.

2.2. Elektr zanjirlarining elementlari

Elektr zanjirlarining asosiy elementlariga elektromagnit energiyasi manba-lari, elektromagnit energiyasini uzatish, qayta ishlash va qabul qiluvchi qurilmalari kiradi.

*Elektromagnit energiyasining manbalari*ga energiyaning u yoki bu (issiqlik, kim'yoviy, yadro, quyosh, shamol, mexanik harakat va h.k.) turlaridan elektro-magnit energiyasiga aylantiruvchi generator qurilmalari kiradi. Bularga, masalan aylanuvchi elektr generatorlari, galvanik elementlar, akkumulyatorlar, termo-elementlar va h.k. kiradi. Hozirgi kunda issiqlik, yadro, kim'yoviy energiyalarni elektromagnit energiyasiga aylantiruvchi yangi uskunalar yaratilmoqda, masalan, magnitogidrodinamik generatorlar, issiqlik elementlari, quyosh batareyalar va h.k.

*Elektromagnit energiyani uzatish elementlari*ga aloqa liniyalari, elektr uzatish liniyalari, elektr tarmoqlari kiradi.

*Elektromagnit energiyani qayta ishlash*ga tok va kuchlanishni o‘zgartiruvchi transformatorlar, chastota o‘zgartkichlari, kuchaytirgichlar, shuningdek, o‘zgarmas tokni o‘zgaruvchan tokka aylantiruvchi yarim o‘tkazgichli invertorlar, o‘zgaruv-chan tokni o‘zgarmas tokka aylantiruvchi to‘g‘rilagichlar va h.k. kiradi.

Elektr zanjirlaridagi *iste'molchilar* yoki *yuklamalar* qatoriga elektr energiyasini boshqa turdagi energiyaga aylantiruvchi qurilmalar kiradi, masalan akkumulyatorlar, isitkich jihozlari, radio va televizion jihozlar, elektr motorlar, elektroliz uskunalari va h.k.

Agar u yoki bu qurilma elektr zanjiri elementining asosiy vazifasi sifatida elektromagnit energiyaning generasiyasi, uni uzatish, qayta ishlash yoki iste'mol qilish masalalari qo‘yilsa, birinchi o‘ringa uning foydali ish koeffisiyenti yuqori bo‘lishi talabi qo‘yiladi.

Kam quvvatli elektr zanjirlari elementlarining asosiy vazifasi qilib signal-larni uzatish, qayta ishlash, o‘zgaruvchiliklar qiymatlarini o‘lchash operasiyasini bajarish, u yoki bu jarayonlarning sifatini boshqarish masalasi qo‘yiladi. Bu

elementlar qatoriga telekommunikasiya tizimlari, telefon va telegraf aloqa liniyalari va ularning uchlaridagi qurilmalar, avtomatika qurilmalarining har turdagi elementlari, elektr o‘lchash qurilmalari, elektron hisoblash mashinalarining hisoblash va boshqarish qurilmalari, har turdagi radiotexnik qurilmalar va h.k.lar kiradi. Ularning barchasi uchun eng muhim talab – uzatilayotgan va qayta ishlanayotgan signallarning ma’lum sifatda bo‘lishidir. Tabiiyki, bu holatlar uchun ham elektromagnit energiyasining uzatilishi va qayta ishlanishi amalga oshiriladi va asosiy bo‘lmasa ham, imkon qadar yuqori foydali ish koeffisiyentiga erishish maqsadi qo‘yiladi.

Keltirilgan talablar bilan birgalikda, elektr zanjiri elementlari yana bir qator talablarni qoniqtirishi zarur – ishlashining ishonchliligi, ko‘pga chidamliligi, zarur bo‘lsa – tez ishlovchanligi, ishdagi barqarorligi, amaldagi aniqligi va h.k.

Shunga muvofiq, hozirgi zamon elektrotexnik qurilmalarining elektr zanjir-lari juda murakkabdir. Shu sababli ham elektr zanjirlar nazariyasi doimiy rivojlan-moqda va unga yanada umumlashtirilgan usullar xos bo‘lmoqda. Ushbu darslikda eng sodda elektr zanjirlarini hisoblashdan boshlab, asta - sekin murakkab zanjirlarni tadqiqotining umumiy usullariga o‘tamiz.

Elektr zanjirining elektromagnit energiyasi manbalari ta’sir etayotgan qismini *zanjirning aktiv qismi*, qisqacha – aktiv zanjir deb nomlaymiz. Aksariyat, uni o‘rtasida ***A*** harfi bo‘lgan to‘g‘ri to‘rtburchak shaklida va zanjirning qolgan qismiga ulash uchun zarur bo‘lgan sondagi klemmalar (qutblar) bilan chiziladi (2.1-rasm). Elektr zanjirining elektromagnit energiyasi manbalari bo‘lmagan qismini *zanjirning passiv qismi*, yoki qisqacha – *passiv* zanjir deb ataymiz. Uni esa o‘rtasida *P* harfi bo‘lgan to‘g‘ri to‘rtburchak shaklida va zanjirning qolgan qismiga ulash uchun zarur bo‘lgan sondagi klemmalar bilan belgilaymiz (2.2-rasm).

2.1-rasm. **Aktiv zanjir**

2.2-rasm. **Passiv zanjir**

Elektr zanjirlarini aktiv va passiv elementlari umumiy xolda ikkiqutublik elementlardir.

2.3. Elektr zanjirlarining fizik xususiyatlari va elektr zanjirlarini soddalashtirish

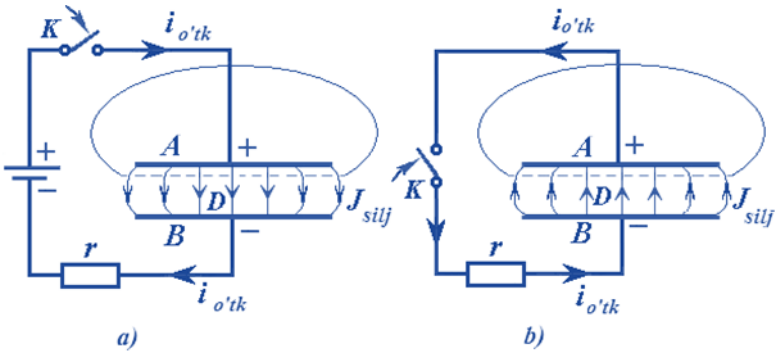
Nisbatan soddaroq fizik jarayonlar o‘zgarmas tok zanjirlarida sodir bo‘ladi. O‘zgarmas tok elektr zanjiridagi uzoq vaqt davom etadigan tok yoki o‘tkazuvchanlik, yoki ko‘chirish toki sifatida bo‘lishi mumkin. Dielektrikdagi siljish toki o‘zgarmas va uzoq vaqt davomli bo‘la olmaydi, chunki dielektrikning elektr chidamliligi buzilmagan holda, elektr siljish toki va dielektrikning polyarizasiyasi cheksiz davomli bo‘lishi mumkin emas. Shu sababli, o‘zgarmas tok zanjiri tarkibiga faqat o‘tkazuvchanlik toki shaklida mavjud bo‘lgan, masalan uzatish liniyalari o‘tkazgichlari, induktivlik g‘altaklarining chulg‘amlari, elektrolitik vannalar, galvanik elementlar, akkumulyatorlar va h.k., yoki toklari faqat ko‘chirish toki shaklida bo‘lgan, masalan elektron lampalar va h.k. qurilmalar kirishi mumkin. *Solishtirma o‘tkazuvchanligi nolga teng deb ehtimol qilingan ideal dielektrikli kondensatordan barqarorlik jarayonida o‘zgarmas tok oqib o‘tmaydi*.

O‘zgarmas tok zanjiri atrofida magnit maydoni mavjud bo‘lsa ham, u vaqt bo‘yicha o‘zgarmaydi, demak, Faradey qonuniga ko‘ra, *o‘zgarmas tok zanjirida EYuK induktivlanmaydi*.

Agar o‘tkazgichlar orasidagi izolyasiyalovchi muhit kichik bo‘lib, chekli solishtirma o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lsa, u holda o‘tkazgichlar orasidagi o‘zgar-mas kuchlanish ta’sirida dielektrik orqali siljish toki oqib o‘tadi. Siljish toki izolyatsiyalovchi muhitga unga tutashgan barcha o‘tkazgich elementlaridan o‘tadi, natijada o‘tkazgich bo‘ylab tok har xil qiymatlarga ega bo‘ladi. Bunda biz shunday sodda zanjirga ega bo‘lamizki, unda parametrlari tarqoq, ya’ni zanjir bo‘ylab siljish o‘tkazuvchanligi tarqoq bo‘ladi. O‘zgaruvchan toklar va kuchlanishlarda elektr zanjiridagi hodisalar juda murakkablashgan bo‘ladi. O‘zgaruvchan tok, ya’ni vaqt bo‘yicha o‘zgaradigan tok dielektrikda ham siljish

toki sifatida mavjud bo‘ladi. Shuning uchun o‘zgaruvchan tokli elektr zarjiri tarkibiga qoplamalari dielektrik bilan ajratilgan kondensator ham kirishi mumkin. O‘zgaruvchan kuchlanish bo‘lganda kondensatorning metall qoplamalari orasida o‘zgaruvchan elektr maydoni paydo bo‘ladi, demak qoplamalarni ajratib turuvchi dielektrikda siljish toki sodir bo‘ladi. Elektr siljish tokini e’tiborga olib, oldin ta’kidlanganidek, tok chiziqlari doimo berk bo‘ladi.

Ketma-ket ulangan kondensatorli elektr zanjiridagi sig‘imning zaryadlanishi va razryadlanishidagi jarayonni ko‘raylik. Agar siljish toklarini e’tiborga olmasak, bu zanjir uzilgandek ko‘rinadi. *K* kalit yordamida vaqtning biror onida zaryad-lanmagan kondensator o‘zgarmas *EYuK* zanjiriga ulanayapti, deb faraz qilaylik (2.3,*a*-rasm). Kondensator zaryadlanadi; *EYuK* manbasidan o‘tkazgich simlari orqali kondensator qoplamalariga o‘tkazilayotgan elektr zaryadlari shu qoplama-larda yig‘ila boshlaydi.



2.3-rasm. **Ketma-ket ulangan kondensatorli elektr zanjiri**

Qoplamalardagi zaryadlarning ortishi natijasida qoplamalar orasidagi elektr maydoni ortib boradi va dielektrikda siljish toklari sodir bo‘ladi. Agar qoplamalardan birini, masalan *A* qoplamani, *s* yuza bilan qamrab olsak, bu yuzani kesib o‘tgan o‘tkazgichdan *A* qoplamaga o‘tkazuvchanlik $i_{o'tk}$ toki oqib o‘tishi sodir bo‘lada, dielektrikda *s* yuza orqali ichkaridan tashqariga yo‘nalgan va aynan o‘tkazuvchanlik $i_{o'tk}$ tokiga teng bo‘lgan siljish toki paydo bo‘ladi.

Dielektrikdagi siljish toki chiziqlari o‘tkazgichdagi o‘tkazuvchanlik tokining davomi bo‘ladi. Darhaqiqat, elektr maydon musbat *A* qoplamadan manfiy *B* qoplamaga yo‘nalgan va ortuvchi bo‘ladi. Demak, siljish toki chiziqlari ham musbat qoplamadan manfiy qoplamaga yo‘nalgan bo‘ladi.

O‘tkazgichdan musbat qoplama tomon oqayotgan o‘tkazuvchanlik toki, dielektrikda siljish toki J_{silj} sifatida oqishda davom etadi va manfiy qoplamaga yetganda yana undan o‘tkazgich orqali o‘tkazuvchanlik toki $i_{o‘tk}$ sifatida oqishda davom etadi. Shunday qilib, elektr toki zanjiri berk kontur hosil qiladi.

Agar zaryadlangan kondensatorni *EYuK* manbaidan uzib, qarshiligi *r* bo‘lgan rezistorga *K* kalit yordamida berk ulansa (2.3,*b*-rasm), u holda kondensator razryadlana boshlaydi; bunda o‘tkazgichdagi $i_{o‘tk}$ toki *A* musbat qoplamadan *V* manfiy qoplamaga tomon oqa boshlaydi. Dielektrikdagi elektr maydoni avvalgidek *A* musbat qoplamadan *B* manfiy qoplamaga tomon yo‘nalgan bo‘ladi. Biroq, endi maydon susaya boshlaydi, demak tok zichligi J_{silj} vektori elektr maydoni yo‘nalishiga teskari bo‘ladi. Siljish toki chiziqlari manfiy qoplamadan musbat qoplama tomon yo‘naladi va o‘tkazgichdagi tok chiziqlarining davomi bo‘ladi.

Elektr tokining uzluksizligi prinsipiga muvofiq (§1.2), vaqtning ixtiyoriy onida, kondensatorning zaryadlanayotganida ham, yoki uning razryadlanaytganida ham, kondensator qoplamalarining orasida joylashgan dielektrikdagi siljish toki o‘tkazgichlardagi $i_{o‘tk}$ o‘tkazish tokiga aynan teng bo‘ladi.

O‘zgaruvchan kuchlanish bo‘lganda siljish toki, na faqat kondensatorlarda, ya’ni sig‘imlarini ishlatish uchun maxsus tayyorlangan qurilmalarda sodir bo‘ladi, balki o‘zgaruvchan tok zanjiri ixtiyoriy elementning atrofidagi dielektrikda ham vujudga keladi, chunki shu elementlar orasida o‘zgaruvchan kuchlanish mavjud, ya’ni o‘zgaruvchan elektr maydoni mavjud. Masalan, agar elektr uzatish liniyasida o‘tkazgichlari orasidagi kuchlanish vaqt bo‘yicha o‘zgarsa, o‘tkazgichlar orasidagi dielektrikda siljish toki vujudga keladi. Shu sababli, dielektrikning solishtirma o‘kazuvchanligi nolga teng bo‘lganda ham, liniya uzunligi bo‘ylab o‘tkazgich-lardan tok dielektrik orqali siljish toki sifatida tarmoqlanadi (1.2-rasm) va liniyaning har xil nuqtalarida o‘tkazgichlardagi tok qiymati bir xil bo‘lmaydi.

Shu sababli, liniyaning o‘tkazgichlari bir-biriga nisbatan, kondensatorga

o‘xshab, sig‘imga ega bo‘ladi. Bu ta’kidlashlar o‘zgaruvchan tokdagi ixtiyoriy qurilma uchun taalluqlidir. Masalan, o‘zgaruvchan tokdagi reostatda o‘zgaruvchan kuchlanishlar pasayuvi vujudga keladi, ya’ni reostat o‘tkazgichi (simi)da va uni o‘rab turgan dielektrikda o‘zgaruvchan elektr maydoni hosil bo‘ladi. Shuning uchun, reostatning alohida qismlari orasida dielektrik orqali siljish toki oqib o‘tadi, natijada reostatning har xil joylaridagi tok miqdori har xil bo‘ladi. Shu sababli, reostatning alohida qismlarida bir-birlariga nisbatan elektr sig‘imi mavjud.

Agar endi induktivlik g‘altagidan o‘zgaruvchan tok oqib o‘tsa, u holda g‘altakning alohida o‘ramlarida *EYuK* induktivlanadi. G‘altakning klemmalarida va uning o‘ramlari orasida o‘zgaruvchan kuchlanish, ya’ni o‘zgaruvchan elektr maydoni hosil bo‘ladi u, o‘z navbatida, g‘altak o‘ramlari orasidagi dielektrikda siljish tokining paydo bo‘lishiga sabab bo‘ladi. Bu holatda ham, g‘altak o‘tkazgichining har xil joylarida tok har xil qiymatga ega bo‘ladi. Shu sababli, g‘altak o‘ramlari orasida elektr sig‘imi mavjud bo‘ladi. Demak, *elektr sig‘imi zanjirning uzunligi bo‘ylab doimo taqsimlangan bo‘ladi*.

Zanjirning induktivligi haqida ham shu fikrlarni keltirish mumkin. Zanjirdan tok oqib o‘tganda magnit maydoni hosil bo‘lmaydigan uning birorta qismi yo‘qdir. Shuning uchun o‘zgaruvchan tokda zanjirning har bir qismida o‘zinduksiya va o‘zaro induksiya *EYuK*lari induktivlanadi. Shu sababli zanjirning har bir qismi, har bir elementi induktivlikka ega. Induktivlikka na faqat g‘altaklar ega bo‘ladi, balki liniyaning o‘tkazgichlari, reostatlar va o‘zgaruvchan tok zanjirining ixtiyoriy boshqa elementlari ham ega. Hatto kondensator ham, juda kichik bo‘lsada, induktivlikka ega bo‘ladi. Shunday qilib, *induktivlik ham doimo zanjir bo‘ylab taqsimlangan bo‘lar ekan*.

Shunga o‘xshash, o‘zgaruvchan tokda elektromagnit energiyaning yutilishi va uning issiqlik energiyasiga aylanishi, zanjirning barcha elementlarida sodir bo‘ladi. Na faqat reostatlar, balki induktivlik g‘altaklar ham, liniyalarning o‘tkazgichlari ham va zanjirning boshqa elementlari ham noldan farqlanuvchi elektr qarshiliklariga ega, ulardan tok oqib o‘tganda elektromagnit

energiya yutilishi sodir bo‘ladi va issiqlik ajralib chiqadi. Agar g‘altak ferromagnit materialli o‘zakka ega bo‘lsa, u holda g‘altak chulg‘amida energiya isrofidan tashqari, o‘zakda gisterezis va uyurma toklarning energiya isrofi ham mavjud bo‘ladi. O‘zgaruvchan kuchlanish bo‘lganda kondensatorlarda dielektrikdagi quvvat isrofi mavjud bo‘ladi. Elektron lampalarda issiqlik anodda ajralib chiqadi, chunki elektr maydonida tezlatilgan elektronlar bu yerda o‘zining tezligini yo‘qotadilar. Ionli asboblarda elektromagnit energiya issiqlik energiyasiga na faqat elektrodlarda, balki elektrodlar orasidagi gaz muhitida ham aylanadi.

Zanjirning biror qismidan tok o‘tishi natijasida shu qism elektr qarshiligining elektromagnit energiyani yutish qobiliyati mavjudligini ta’kidlash bilan birga, shuni e’tirof etishimiz zarurki, *elektr qarshilik elektr zanjirining hamma joyida taqsimlangandir*.

Elektr qarshiliklari va o‘tkazuvchanliklari, induktivliklari va elektr sig‘im-lari zanjir bo‘ylab taqsimlangan elektr zanjirlari, ***parametrlari taqsimlangan elektr zanjirlari*** *deb ataladi*. Shunga muvofiq, bunday zanjirlardagi tok va kuchlanishlar vaqtga bog‘liq ravishda va biror fazoviy koordinataga bog‘liq ravishda o‘zgaradi, demak ikki o‘zgaruvchining funksiyasidir. Bu vaziyat elektr zanjirlari fizik jarayonlarini tahlil qilishni tubdan murakkablashtiradi.

Ba’zi elektr zanjiri qismlarida elektromagnit energiya, na faqat issiqlikka, balki boshqa turdagi energiyaga ham aylanishi mumkin, masalan akkumulyatorlarning zaryadlanishida - kim’yoviy energiyaga, elektr motorlarida – mexanik energiyaga o‘zgartirish amalga oshiriladi. Biroq, elektr zanjirining barcha element-larida bunday energiya o‘zgartirilishi amalga oshirilishi shart emas.

O‘zgaruvchan tokli elektr zanjirlaridagi energetik jarayonlarni o‘rganishda, elektr va magnit maydonlari ma’lum energiya miqdorini tashuvchilar ekanligiga alohida e’tibor berishimiz lozim bo‘ladi. O‘zgaruvchan tok va kuchlanishlarda bu maydonlar vaqt bo‘yicha o‘zgaradi. Maydon kuchayganda ulardagi energiya zahirasi ortadi, maydon susayganda – kamayadi,

boshqa turdagi energiyaga aylanadi yoki zanjirda ishlab turgan energiya manbaiga qaytariladi.

Albatta, amaldagi o‘zgaruvchan tok zanjirlari ishini tahlil qilishda yoki yangi zanjirlarni yaratishda sodir bo‘ladigan fizik jarayonlarning barcha murakkab-liklarini e’tiborga olish – zanjirlarga qo‘yiladigan texnik va texnologik talablarning so‘zsiz bajarilishini ta’minlaydi. Hozirgi kunda kompyuter va ularning dasturiy ta’minoti keskin rivojlanishi, bunday vazifalarni bajarish imkoniyatini oshiradi. Ushbu usullarni qo‘llash masalalari darslikning keyingi boblarida o‘rganiladi.

Yaqin o‘tmishda hisoblash vositalari imkoniyatining cheklanganligi sababli, zanjirlarni hisoblashdagi u yoki bu murakkab fizik jarayonlarni e’tiborga olmaslik shartlarini taklif etib, hisoblash jarayonini soddalashtiruvchi, shu bilan birga, tajriba natijalaridan uncha keskin farq qilmaydinan bir qator usullar taklif qilingan.

Hozirgi davrda texnika, texnologiya jarayonlarini loyihalash maqsadida ushbu ikki yo‘ldan birini tanlashda, zanjirlardagi murakkab jarayonlarni e’tiborga olish zaruratini, murakkab hisoblash dasturlarini ishlab chiqarishni, ularni hisoblash amaliyotiga joriy etish va aniq hisoblash natijalariga ega bo‘lish masala-larini tarozining bir tomoniga qo‘yib, zanjirlarni soddalashtirib, nisbatan osonroq va kam mablag‘ sarflanadigan usullarni qo‘llash masalalarini tarozining ikkinchi tomoniga qo‘yib, ushbu usullarning texnik, texnologik va iqtisodiy samarasini e’tiborga olib, hisoblash yo‘llarining tanlovini tashkil etilmoqda.

Ushbu usullarni talabalar, muhandis-texnik xodimlar tomonidan o‘rganish jarayonida esa, zanjirlarni hisoblashning avval soddalashtirilgan usullarini o‘rganish, so‘ngra murakkab usullarini o‘rganishga o‘tish zarurligi barcha olimlar tomonidan ta’kidlanmoqda.

Quyida elektr zanjirlarining murakkab fizik jarayonlarini soddalashtirib hisoblashga asos bo‘luvchi omillarini o‘rganamiz.

Darhaqiqat, elektr zanjirlari bo‘ylab elektr va magnit maydonlarining noravon taqsimlanishi nisbatan kam hollarda, masalan uzun liniyalar deb

nomlangan o‘ta yuqori chastotali zanjirlarda, axborot tizimlarida va boshqalarda uchraydi. Zanjir bir qismida, masalan kondensatorlarda, elektr maydoni miqdori ustun bo‘ladi va uning o‘zgarishlari bilan bog‘liq bo‘lgan holatlar masalaning asosini tashkil etadi; zanjirning boshqa qismlarida, masalan induktivlik g‘altak-larida, magnit maydoni miqdori ustun bo‘ladi va magnit maydonining o‘zgarishlari bilan bog‘liq bo‘lgan jarayonlar asosiy hisoblanadi.

Shunga o‘xshash, elektromagnit energiyasining issiqlik energiyasiga aylani-shi, aksariyat zanjirning bir yoki birnecha qismlarida mujassamlangan bo‘ladi.

Misol sifatida reostatni olaylik. У *r* qarshilikdan tashqari, uning o‘ramlari orasidagi biror miqdordagi sig‘imga ega va biroz induktivlik ham mavjud. Agar o‘zgaruvchan tokning chastotasi katta yoki tokning o‘zgarishi sekin, ammo ixtiyoriy qonuniyat bilan sodir bo‘lsa, reostat o‘tkazgichining qismlaridan dielektrikka o‘tayotgan siljish toklari, reostat o‘tkazgichida oqayotgan o‘tkazuvchanlik tokiga nisbatan juda kichik bo‘ladi. Bunday holatda siljish toklarini e’tiborga olmasa ham bo‘ladi, bu esa reostat qismlari orasidagi *S* sig‘imni nolga teng deb hisoblash bilan ekvivalentdir. Shunga o‘xshash, tokning chastotasi kichik yoki umuman uning o‘zgarishi sekin kechsa, qarshilikdagi kuchlanishlar pasayuvi qiymatiga nisbatan, reostatdagi o‘zinduksiya elektr yurituvchi kuchining qiymatini e’tiborga olmasa ham bo‘ladi, bu esa reostatning *L* induktivligi nolga teng deb qabul qilishga ekvivalentdir. Boshqacha qilib aytganda, voqyelikda jarayonning murakkab tasvirini abstraktlashtirib faraz qilamizki, reostar faqat $r \neq 0$ bo‘lgan qarshilikka hamda $L=0$ bo‘lgan induktivlik va $C=0$ bo‘lgan sig‘imga ega.

E’tibor beraylik, zanjirning bunday qismini $g=1/r$ o‘tkazuvchanlik bilan tasvirlashimiz ham mumkin.

Amaliyotda asosiy xarakteristikai elektr qarshiligidan iborat qilib maxsus konstruk-siya shaklida yasalgan qurilmalar juda keng qo‘llaniladi.

Elektr qarshiligidan foydalanish uchun mo‘ljallangan elektr zanjir elementi ***rezistor*** *deyiladi*.

O‘tkazgichdan faqat o‘zgarmas tok oqib o‘tganda uning kesim yuzasi bo‘ylab tok ravon taqsimlangan bo‘ladi. Bunga mos kelgan o‘tkazgich qarshiligi *omik qashilik* deyiladi. O‘zgaruvchan tokli o‘tkazgichda esa, tokning chastotasi qanchalar katta bo‘lsa, «*yuza effekti*» ta’siri shunchalar kuchli bo‘ladi va shu sababli o‘tkazgichda tok kesim yuzasida ravon taqsimlanmasdan, o‘tkazgich yuzasi bo‘ylab oqadi. Bunga mos kelgan o‘tkazgich qarshiligi *aktiv qarshilik* deyiladi.

Boshqa muhim misol sifatida kondensatorni ko‘raylik. Juda yuqori chastota-largacha kondensatorning L induktivligini e’tiborga olmay, faqat uning S sig‘imini hisobga olish mumkin. Agar zanjirda reostat va sig‘im bo‘lsa va reostat yutayotgan energiya miqdori, kondensator dielektrikidagi sarflanayotgan energiyadan ancha katta bo‘lsa, u holda birlamchi hisoblarda kondensatordagi energiya isrofini e’tiborga olmasak bo‘ladi, yoki qarshilikni xos ravishda o‘zgartirish uchun uni ishlatish mumkin. Bunday abstraktlashda, kondensator $C\neq0$ sig‘imga ega, ammo uning uchun $L=0$ va $r=0$.

Muhim misollardan yana biri - induktivlik g‘altagidir. Agar zanjirdagi tokning chastotasi juda katta bo‘lmasa, g‘altak o‘tkazgichidagi o‘tkazuvchanlik toki miqdoriga nisbatan, g‘altak o‘tkazgichi o‘ramlari orasidagi siljish tokini juda kichik hisoblab, uni e’tiborga olmasa bo‘ladi, ya’ni g‘altak o‘ramlari orasidagi S sig‘imni hisobga olinmaydi.

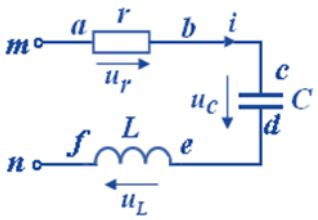
Juda kichik bo‘lmagan chastotalarda, g‘altakdagi induktivlanayotgan *EYuK* miqdoriga nisbatan g‘altak o‘tkazgichi qarshiligidagi kuchlanishlar pasayuvi qiymatini juda kichik deb, uni e’tiborga olmaslik mumkin, ya’ni g‘altak qarshiligini nolga teng deb qabul qilish mumkin. Zarur bo‘lganda g‘altak qarshiligini hisobga olish mumkin, bunda faraz qilinadi: qarshiligi $r = 0$ bo‘lgan g‘altak bilan qarshiligi haqiqiy o‘tkazgich qarshiligi r ga teng bo‘lgan reostan ketma-ket ulangan, deb hisoblanadi. Bunday abstraktlash natijasida g‘altak parametrlarini $L\neq0$, $C=0$ va $r=0$ deb hisoblaymiz.

Misol uchun ketma-ket (2.4-rasm) ulangan rezistor (*a-b* oraliq), kondensator (*c-d* oraliq) va induktivlik g‘altagi (*e-f* oraliq) dan iborat bo‘lgan

zanjir tuzilgan bo‘lsin.

Faraz qilaylik, elektromagnit energiyasi issiqlik energiyasiga faqat sohadagi rezistordagina o‘tayapti, ya’ni zanjirning barcha *r* miqdoridagi qarshiligi *a-b* oraliqda mujassamlangan; elektr siljish toklari faqat *c-d* oraliqda kondensator qoplamalari orasida mavjud, ya’ni zanjirning barcha *C* sig‘imi *c-d* oraliqda mujas-samlangan; nihoyat, o‘zgaruvchan magnit maydon *EYuK*ni faqat *e-f* oraliqdagi g‘altakda induktivlaydi, ya’ni zanjirning barcha *L* induktivligi faqat ushbu sohada yig‘ilgan. Sxemada keltirilgan *r-S-L* elementlar joylashgan *m*, *n* klemmalar va *a-b*, *c-d*, *e-f* sohalar orasidagi *m-a*, *b-c*, *d-e* va *f-n* o‘tkazgichlarning qarshiliklari, sig‘imlari va induktivliklari nolga teng deb faraz qilamiz.

Umumiy holda, ancha murakkabroq ko‘rinishga ega bo‘lgan va har xil elementlardan tashkil topgan shunga o‘xshash elektr zanjirlari, ***mujassamlangan parametrli elektr zanjirlari*** *deyiladi.*



2.4-rasm. **Ketma-ket ulangan rezistor, kondensator va induktiv elementli elektr zanjir sxemasi**

Bunda birinchi *a-b* oraliqdagi *r* rezistor qarshiligi orqali *i* tokni o‘tkazishga zarur bo‘lgan u_r kuchlanishni Om qonunini tatbiq etib aniqlash mumkin

$$u_r = i\,r. \tag{2.1}$$

Ikkinchi *c-d* oraliq elementi kondensatorni tasvirlaydi. Agar *C* sig‘im ma’lum bo‘lsa, berilgan *q* zaryadning qiymati uchun $u_C=q/C$ kuchlanishni aniqlash mumkin. Tok *i* bilan *q* zaryad orasida $i_r=dq/dt=Cdu/dt$ bog‘lanishi mavjud. Demak,

$$q=\int_0^t i\,dt+q(0), \tag{2.2}$$

bunda $q(0)$ – vaqtning $t=0$ oni uchun, (ya'ni vaqtning hisoblanish boshi uchun) kondensatordagi zaryad miqdori. Unda

$$u_C = \frac{1}{C}\int_0^t i dt + \frac{q(0)}{C} = \frac{1}{C}\int_0^t i dt + u_C(0), \qquad (2.3)$$

bunda $u_C(0)$ - vaqtning $t=0$ oni uchun kondensatordagi kuchlanish.

Zanjirning uchinchi *e-f* oralig'i g'altakning induktivligini tasvirlaydi. G'altakning L induktivligi berilgan bo'lsa, tok i uchun o'zinduksiya magnit ilashuvini $\Psi_L = Li$ aniqlash mumkin va berilgan tok tezligi di/dt uchun zanjirda induktivlanayotgan o'zinduksiya $e = L \cdot di/dt$ *EYuK* ni, shuningdek g'altak klemma-laridagi kuchlanishni aniqlash mumkin

$$u_L = -e = +L \cdot di/dt. \qquad (2.4)$$

G'altakdagi tok i va magnit ilashuvi Ψ_L ni uning klemmalaridagi u_L kuchlanish bilan ifodalasak

$$i = \frac{1}{L}\int_0^t u_L dt + i(0)$$

va

$$\Psi_L = L \cdot i = \int_0^t u_L dt + \Psi(0) \qquad (2.5)$$

bunda i (0) va $\Psi(0) = L \cdot i(0)$ - vaqtning $t=0$ oni uchun tok va magnit oqimi.

O'zaro induktivlik mavjud bo'lganda, shunga o'xshash

$$\Psi_{1M} = Mi_2; \qquad e_{1M} = -M\frac{di_2}{dt}$$

va

$$u_{1M} = -e_{1M} = +M\frac{di_2}{dt}. \qquad (2.6)$$

Tok i_2 va magnit $\Psi_{1M} = Mi_2$ oqimni u_{1M} kuchlanish bilan ifodalab, quyidagini olamiz

$$i_2 = \frac{1}{M}\int_0^t u_{1M} dt + i_2(0)$$

va

$$\Psi_{1M} = Mi_2 = \int_0^t u_{1M}dt + \Psi_{1M}(0). \qquad (2.7)$$

Ushbu ilmiy abstraksiyalarning amaliy ahamiyati juda kattadir. Unda keltirilgan farazlarni qabul qilish natijasida har xil texnik qurilmalar tarkibida mavjud bo‘lgan, elektr zanjirlarining juda katta turkumlarini o‘z ichiga olgan, mujassamlangan parametrli elektr zanjirlari nazariy asoslarini tuzish imkoniyatiga ega bo‘lamiz. Ushbu turkum elektr zanjirlariga, elektr energiyasi va signallarni uzatish uzun aloqa liniyalaridan tashqari, barcha sanoat qurilmalaridagi, shuningdek tovush chastotasidagi elektr zanjirlari kiradi. Aloqa, televideniye tizimlarida ishlatiladigan ko‘pgina yuqori chastotali elektr zanjirlari ham, yuqori aniqlikda, mujassam parametrli elektr zanjirlari deb ko‘rilishi mumkin.

Ushbu abstraksiyalarning qo‘llash chegaralarini aniq tasavvur qilish g‘oyat muhimdar. Chunki bir real zanjir har xil chastotalarda o‘zini har xil ko‘rsatishi mumkin. Masalan, agar quyi chastotalarda induktiv g‘altagi o‘ramlari orasidagi sig‘imni e’tiborga olmaslik haqida faraz qilish mumkin bo‘lsa, shu g‘altakning o‘zida juda yuqori chastotalarda bunday faraz katta hatolikni tug‘diradi va hodisalar haqiqiy tasvirining buzilishiga olib keladi. Chunki yuqori chastotalardagi real sharoitlarda g‘altak o‘ramlari yaqinidagi dielektriklarda siljish toklari qiymatlari o‘tkazish toklari miqdoriga juda yaqin bo‘lib qoladi.

Yuqoridagi fikrlardan shu aniq bo‘ladiki, qarshilik *r*, sig‘im *C* va induktivlik *L* kattaliklari elektr zanjirlari uchun asosiy parametrlar hisoblanar ekan. Agar ushbu zanjirga boshqa zanjirlar tomonidan ta’sir ko‘rsatiladigan bo‘lsa yoki shu zanjir ichida boshqa qismlardan birining ikkinchisiga shunday ta’siri mavjud bo‘lsa, u holda parametrlar qatoriga o‘zaro induktivlik *M* ham qo‘shiladi.

Ushbu va kelgusi boblarda mujassamlangan parametrli elektr zanjirlari o‘rganiladi, tarqoq parametrli elektr zanjirlari esa o‘n to‘rtinchi bobda batafsil o‘rganiladi.

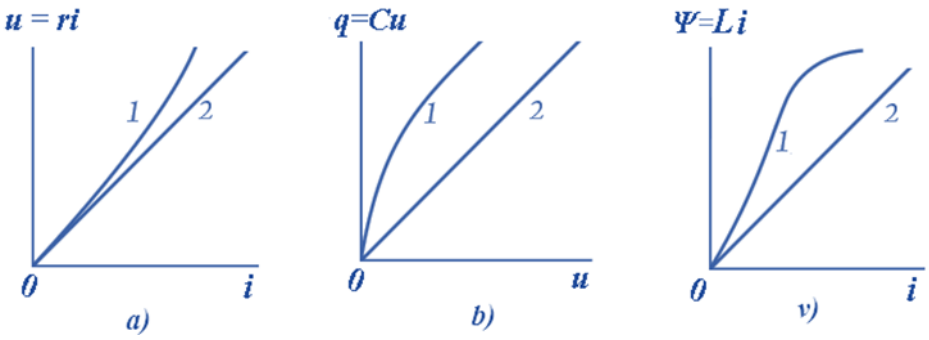
Sinchiklab tahlil qilganda shu fikrga kelish mumkinki, zanjirning asosiy parametrlari (*r*, *C*, *L*) ham tok yoki kuchlanishga bog‘liq bo‘lar ekan. Rezistorning harorati o‘zgarganda uning qarshiligi *r* ham o‘zgarmay qolmaydi. Agar kondensa-tor qoplamalari orasidagi dielektrik moddaning dielektrik singdiruvchanligi elektr maydon kuchlanganligiga bog‘liq bo‘lsa, kondensator sig‘imi kuchlanishga bog‘liq bo‘ladi. Agar induktiv g‘altak magnit o‘zagi moddasi magnit maydon kuchlanganligiga bog‘liq bo‘lsa, g‘altak induktivligi *L* ham tokka bog‘liq bo‘ladi.

Umumiy holda *r*, *C*, *L* parametrlarining tok, kuchlanish yoki ular yo‘nalishlariga bog‘liqligi shunga olib keladiki, elektr zanjiri elementlari xarakteristikalari nochiziqli bo‘ladi (2.5-rasm, 1-egri chiziqlar).

Elektr zanjiri elementi klemmalaridagi kuchlanishning undagi tokka bog‘liq-ligi *Volt-Amper xarakteristikai* deyiladi (VAT) (2.5, *a*-rasm).

Kondensator zaryadining unga keltirilgan kuchlanishga bog‘liqligi *Kulon-Volt xarakteristikai* deyiladi (2.5,*b*-rasm).

Elektr zanjiri elementi yoki bir qismi magnit ilashuvining undagi tokka bog‘liqligi *Veber-Amper xarakteristikai* deyiladi (2.5,*v*-rasm).



2.5-rasm. **Elektr zanjiri elementini veber-amper xarakteristikai**

Ko‘pgina holatlarda xarakteristikalarning nochiziqli ekanligi yaqqol bo‘lmaydi va sust ko‘rinishda bo‘ladi. Bunday nochiqlikni e’tiborga olmasdan, zanjir parametrlari tokka ham, kuchlanishga ham bog‘liq emas deb hisoblanadi. Bunday hollarda diagrammalarda elektr zanjiri elementining xarakteristikai to‘g‘ri chiziqdan iborat bo‘ladi (2.5-rasmda 2-chiziq). Bunday elementlar

chiziqli element deyiladi. Faqat *chiziqli elementlari* bo‘lgan zarjirlar fizik jarayonlarining matematik ifodalari (matematik modellari) o‘zgarmas tok bo‘lganda *chiziqli* algebraik, vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan toklarda esa – chiziqli algebraik va *differensial tenglamalar* bilan ifodalanadi. Bunday zanjirlar ***chiziqli elektr zanjirlari*** deyiladi.

Elektr zanjir elementlarining parametrlari tok yoki kuchlanishga bog‘liq bo‘lsa va shu elementlar xarakteristikalari diagrammada egri chiziqli bo‘lsa, bunday ***elementlar nochiziqli*** deyiladi. Agar elektr zanjiri hyech bo‘lmaganda bitta nochiziqli elementga ega bo‘lsa, bunda u ***nochiziqli elektr zanjiri*** deyiladi.

Ferromagnit materialiga ega bo‘lgan elektr zanjirlari, aksariyat nochiziqli bo‘ladi, chunki bu materiallarning magnit singdiruvchanligi magnit maydoni kuchlanganligiga bog‘liq bo‘ladi.

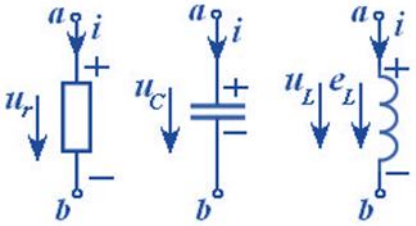
Nochiziqli elektr va magnit zanjirlarini o‘rganish katta amaliy ahamiyatga ega, chunki bunday zanjirlarning maxsus xususiyatlari hozirgi zamon aloqa tizim-larida, ayniqsa radiotexnika, axborot tizimlarida, avtomatik boshqarish va rostlash qurilmalarida, elektr o‘lchov texnikasida va h.k. keng qo‘llaniladi. Nochiziqli zanjirlardagi jarayonlar chiziqli zanjirlardagidan nisbatan murakkabroq, shu sababli nochiziqli zanjirlardagi qo‘llaniladigan usullar ham murakkabroqdir. Nochiziqli elektr va magnit zanjirlari nazariyasidagi asosiy tushunchalar o‘n oltinchi bobda ko‘riladi.

Ushbu va kelgusi boblarda zanjir parametrlari tok va kuchlanishga bog‘liq emas, ya’ni chiziqli zanjir hamda alohida ta’kidlanmagan bo‘lsa, vaqtga ham bog‘liq emas deb, ya’ni o‘zgarmas deb hisoblaymiz.

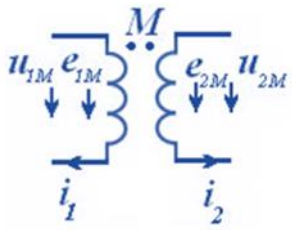
2.4. Elektr zanjiri elementlaridagi tok, kuchlanish va EYuK larning shartli musbat yo‘nalishlari

Elektr zanjirlaridagi jarayonlarni tahlil qilganda albatta zanjir element-laridagi tok va *EYuK*ning shartli musbat yo‘nalishlarini, ular klemmalaridagi kuchlanishning yo‘nalishlarini keltirish va rasmda shu yo‘nalishlarni strelka bilan belgilash zarur. Ushbu shartli musbat yo‘nalishlarni ihtiyoriy berish

mumkin. Agar tok, kuchlanish va *EYuK*ning haqiqiy yo‘nalishlari berilgan onda ularning shartli musbat yo‘nalishlari bilan mos kelsa, u holda tok *i*, kuchlanish *u* va *EYuK e* ning haqiqiy qiymatlari musbat bo‘ladi. Bundan so‘ng, qisqalik uchun «shartli» so‘zidan foydalanmasdan «musbat yo‘nalishi» atamasini qoldiramiz, hamda agar alohida ta’kidlanmagan bo‘lsa, haqiqiy yo‘nalish emas, balki shartli musbat yo‘nalishni nazarda tutgan bo‘lamiz.



2.6-rasm. **Bir tomonga yo‘naltirilgan zanjirlar**



2.7-rasm. **Ikki konturli o‘zaro *M* induktivlik**

Ba’zan tok, *EYuK* yoki kuchlanishning shartli musbat yo‘nalishlarini strel-kalar bilan emas, ularning harfli belgilarida ikkita indeks bilan belgilash qulayroq-dir (i_{12}, u_{12}, e_{12}, i_{ab}, u_{ab}, e_{ab}). Bu indekslar zanjir grafik tasvirining nuqtalariga mos bo‘lishi zarur, bunda birinchi indeksni ifodalovchi nuqtadan ikkinchi indeksni ifodalovchi nuqtaga bo‘lgan yo‘nalishni musbat yo‘nalish deb qabul qilinadi. Masalan, $u_{ab} > 0$ bo‘lganda haqiqiy kuchlanish yo‘nalishi *a* nuqtadan *b* nuqtaga tomon yo‘nalgan bo‘ladi.

Yuqorida keltirilgan u_r va *i*, *q* va u_C hamda u_L va *di/dt* orasidagi bog‘lanishlarni e’tiborga olib, 2.6-rasmda keltirilganidek, bir tomonga yo‘naltiril-gan zanjirning har bir klemmasidagi tok, kuchlanish va *EYuK* ning musbat yo‘nalishini aniqlashimiz mumkin.

Darhaqiqat, yuqoridagi $u_{ab}=ri_{ab}$ ga muvofiq, bunda qarshilik $r > 0$ bo‘lganda $u_r=u_{ab}$ va $i=i_{ab}$ bir xil ishorali, ya’ni vaqtning bir onida musbat ishorali (2.6-rasmdagi «+» va «-») yoki vaqtning bir onida manfiy ishorali bo‘lishi shart. Bu esa ularning musbat yo‘nalishini bir xil qilib tanlashga, ya’ni strelkalarning bir xil yo‘nalishda bo‘lishiga mos keladi. Bu shartlar quvvat doimo musbat $p_r=u_ri > 0$ bo‘lishiga mos keladi.

Kondensator uchun $u_{ab}=q_a/C$, chunki $C>0$ bo‘lishi uchun kuchlanishning

hisoblanishi boshlanayotgan onda kondensator qoplamasi zaryadini olishi kerak, ya’ni

$$C=\frac{q_a}{u_a-u_b}=\frac{q_b}{u_b-u_a}\ .$$

Agar vaqtning biror onida tokning haqiqiy yo‘nalishi *a* klemmadan *b* klemma tomon yo‘nalgan bo‘lsin (ya’ni $i_{ab}>0$), ushbu bog‘lanishga muvofiq u_{ab} va q_a bir xil ishorali kattaliklar. Agar kondensator zaryadlansa, ya’ni $q_a>0$ bo‘lsa (2.6-rasmda «+» va «-» ishoralar), demak, $u_S=u_{ab}>0$, bunga esa tok *i* va u_S kuchlanishning musbat yo‘nalishida, ya’ni strelkalarni bir xil yo‘nalishda joylash-tirish zarur. Bu yana kondensator zaryadlanayotganda energiya unga kirib kelishini va uning klemmalaridagi quvvat musbat $p_s=u_s\ i>0$ ekanligini ko‘rsatadi.

G‘altak uchun bog‘lanish $u_L=+Ldi/dt$, bunda doimo $L>0$ bo‘ladi, chunki $\Psi_L=Li$ va o‘zinduksiya Ψ_L oqimi bilan tok *i* doimo bir xil ishorali bo‘ladi, chunki tok yo‘nalishi va o‘zinduksiya oqimi yo‘nalishi o‘zaro «o‘ng vint qoidasiga» binoan bog‘langan. Agar tokning haqiqiy yo‘nalishi *a* klemmadan *b* klemmaga yo‘nalgan bo‘lsa, u holda $i_{ab}>0$. Agar bunda tok ortsa, ya’ni $di/dt>0$ bo‘lsa, u holda $u_L=u_{ab}>0$ (2.6-rasmda «+» va «-»).

Shunday qilib, g‘altak uchun ham $u_L=+Ldi/dt$ bog‘lanishni tanlab, *i* tok va u_L kuchlanishlarning shartli musbat yo‘nalishlarini tanlaymiz, ya’ni ular strelkalari-ning yo‘nalishlari bir tomonga qaratilgan. Bularning hammasi yana, musbat tokning ortishida, ya’ni tokning absolyut qiymati ortganda, g‘altakdagi magnit maydon energiyasi ortishiga va klemmalardagi quvvat musbat ishorali $p_L=u_Li>0$ bo‘lishiga olib keladi.

EYuKning e_L shartli musbat yo‘nalishlarini tanlaganda, u_L uchun tanlagan-dagidek bajarish zarur, chunki bunda $e_L=-u_L=-Ldi/dt$ bog‘lanishga muvofiq, ye_L va u_L haqiqiy yo‘nalishlari doimo qarama-qarshi bo‘ladi, ya’ni agar, misol uchun, u_L ning haqiqiy yo‘nalishi g‘altak klemmalarida uning strelkasi bo‘yicha (2.6-rasmda «+» dan «-» ga qaratilgan) bo‘lsa, unda ye_L ning haqiqiy yo‘nalishi g‘altak klemmalarida uning strelkasiga teskari (2.6-rasmda «-

» dan «+»ga qaratilgan) bo‘ladi.

Endi ikki kontur orasidagi o‘zaro *M* induktivlikni ko‘raylik. Shuni yodda tutish muhimki, agar ixtiyoriy elektr konturlari uchun faqat *L*>0 bo‘lsa, o‘zaro induktivlik *M* musbat ham, manfiy ham bo‘lishi mumkin, xususan, nolga teng bo‘lishi ham mumkin, chunki o‘zaro induksiya maydonlarining ishoralari, kontur-lardagi musbat toklarning tanlangan yo‘nalishlarida konturlarning o‘zaro joylashuviga ham bog‘liq. Ikkala konturlardagi toklarning musbat yo‘nalishlarini doimo ixtiyoriy tanlash mumkin. Ushbu toklar yo‘nalishlari tanlanib bo‘lganligi uchun, konturlarning musbat toklarida, kontur bilan ilashuvchi o‘zaro induksiya oqimlari musbat bo‘lsa, ya’ni o‘zinduksiya oqimlari bilan ishoralari bir xil bo‘lsa, *M* qiymatini musbat deb qabul qilishimiz zarur. Boshqacha qilib aytganda, *musbat toklarda konturlardagi magnit maydonlari mos yo‘nalgan bo‘lsa, M*>0 *bo‘ladi, va musbat toklarda magnit oqimlari qarama-qarshi bo‘lsa, M*<0 *bo‘ladi.*

Bunday sharoitlarda yuqorida qabul qilingan o‘zaro induksiya EYuK $e_{1M} = -M_{12}\frac{di_2}{dt}$ va $e_{2M} = -M_{21}\frac{di_1}{dt}$ ifodalaridan hamda kuchlanish va *EYuK* orasidagi $u_{1M} = -e_{1M} = -M_{12}\frac{di_2}{dt}$ va $u_{2M} = -e_{2M} = -M_{21}\frac{di_1}{dt}$ (bunda $M_{12}=M_{21}=M$ ni e’tiborga olib) bog‘lanishlaridan foydalanib, ular uchun shartli musbat yo‘nalishlarini, u_{1M} va u_{2M} uchun qabul qilinganidek, ya’ni i_1 va i_2 musbat yo‘nalishlari bilan mos qilib, 2.7-rasmda keltirilganidek qabul qilish zarur.

Buning o‘rniga, aksariyat, har bir g‘altakning klemmalaridan birini qalin nuqta (•) bilan belgilanadi (2.7-rasm). Bu quyidagini anglatadi: agar g‘altaklardan birida tokning shartli musbat yo‘nalishi (•) nuqtadan boshlansa, u holda boshqa g‘altaklarning kuchlanishlari va o‘zinduksiya *EYuK* lari musbat yo‘nalishlari ham (•) nuqtadan qabul qilinadi.

Toklar i_1 va i_2 musbat yo‘nalishlariga mos ravishda yoki tanlangan nuqtaga mos ravishda o‘zaro induksiyaning ishorasi 2.7-rasmdagidek berilishi zarur, masalan, *M*=+0,5 *Hn* yoki *M*=-0,5 *Hn*.

2.5. EYuK va tok manbalari

Elektr zanjirlarida energiya manbalarini *EYuK manbala*ri va *tok manbalari* sifatida o‘rganish qabul qilingan. *EYuK* manbalari tarkibiga, aksariyat shunday elektromagnit energiya manbalari kiradiki, ularda *ye EYuK* ning qiymati manbadan yuklamaga ketayotgan tokka (yuklama toki) bog‘liq bo‘lmagan, yoki manbaning ichki qarshiligi r_{ich} shunchalar kichikki, unda yuklanish i_{yuk} tokining noldan nominal i_{nom} qiymatigacha o‘zgarganida, manbadagi kuchlanish

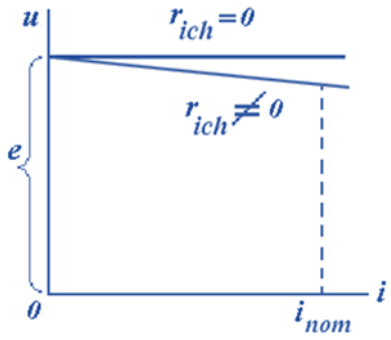
$$u=e-ir_{ich} \qquad (2.8)$$

nisbatan kam o‘zgaradi, shu sababli bu o‘zgarishni e’tiborga olmasdan, amalda o‘zgarmaydi, deb qabul qilinadi. 2.8-rasmda bunday manbaning e=const va r_{ich}=const bo‘lgandagi ***tashqi xarakteristikai*** deb nomlangan bog‘lanishi, ya’ni $u=f(i)$ diagrammasi keltirilgan. U to‘g‘ri chiziqdan iborat. Chiziqli elektr zanjirlari tarkibida faqat shunday chiziqli tashqi xarakteristikaga ega bo‘lgan *EYuK* manbalari bo‘lishi shart.

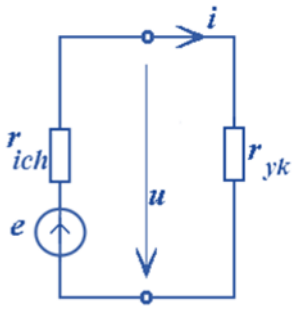
Agar r_{ich}=0 va e=const bo‘lsa, unda $u=e$=const bo‘ladi, bunday manbani ***ideal EYuK manbai*** deyiladi. Agar $r_{ich} \neq 0$ bo‘lgan real manbaning tarkibidan, shartli ravishda, uning ichki qarshiligini manbadan chiqarib olinsa, u holda 2.9-rasmda keltirilgan *EYuK* manbaining shartli tasvirini hosil qilamiz. *EYuK* ning musbat yo‘nalishini strelka bilan ko‘rsatish zarur. Umumiy holda, mana shu *EYuK*ning shartli musbat yo‘nalishidir, chunki *EYuK* o‘zgaruvchan, masalan davriy o‘zgaruvchan bo‘lishi mumkin. Agar aktiv ikkiqutblikdagi kuchlanish yoki EYuK ning qiymati undan o‘tayotgan tok qiymatiga bog‘liq bo‘lmaydigan bo‘lsa, u xolda unga EYuK yoki kuchlanish manbai deyiladi.

Agar $u=f(i)$ xarakteristikai egri chiziqli bo‘lsa, bunday holat *ye EYuK*ning i tokka nisbatan, yoki ichki r_{ich} qarshilikning i tokka nisbatan nochiziqli bog‘lanishda bo‘lganda vujudga keladi. Bunday manbaga ega bo‘lgan zanjir *nochiziqli elektr zanjiri* deyiladi. Ushbu darslikning chiziqli elektr zanjirlariga bag‘ishlangan qismlarida *EYuK* manbalari chiziqli xarakteristikalarga ega, deb faraz qilamiz. Bunday hususiyatga ega bo‘lgan *EYuK* manbalari qatoriga,

masalan akkumulyatorlar, galvanik elementlar, o‘zgarmas tokli aylanuvchi elektr generatorlari kiradi.



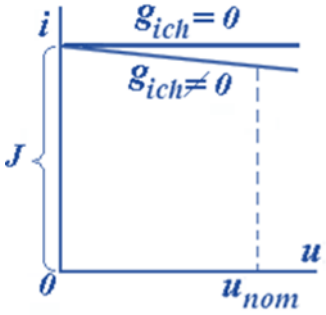
2.8-rasm. **Tashqi xarakteristika**



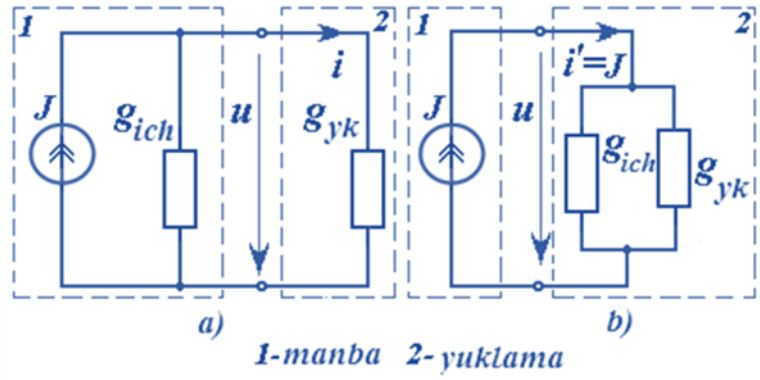
2.9-rasm. **Ideal EYuK manbai**

Tok manbalari qatoriga shunday elektromagnit energiya manbalari kiradiki, ularda tokning miqdori yuklama klemmalaridagi shu tok hosil qilayotgan kuchlanish u ga bog‘liq bo‘lmaydi yoki taxminan bog‘liq emas. Kelgusida ushbu manba tokini J harfi bilan belgilashga shartlashamiz. Tok manbai juda kichik bo‘lgan shunday ichki o‘tkazuvchanlikka g_{ich} ega bo‘ladiki, unda yuklamaga kelayotgan $i=J-ug_{ich}$ tok, yuklamaning kuchlanishi u noldan u_{nom} nominalgacha o‘zgarganda, deyarli o‘zgarmaydi, deb faraz qilinadi. 2.10-rasmda J=const va g_{ich}=const bo‘lgandagi tok manbaining chiziqli tashqi xarakteristikai $i=f(u)$ keltirilgan. Shu yerda J=const, $g_{ich}=0$ va $i=J$=const bo‘lgandagi ideal tok manbaining xarakteristikai ham keltirilgan.

Agar $g_{ich}\neq 0$ bo‘lgan real manbaning tarkibidan (2.11,*a*-rasm), shartli ravishda, uning g_{ich} ichki o‘tkazuvchanligini manbadan chiqarib olinsa va yuklama g_{yuk} o‘tkazuvchanligiga qo‘shilsa (2.11,*b*-rasm), u holda ideal tok mansiga ega bo‘lgan zanjir hosil bo‘ladi. Chiziqli elektr zanjirlarini o‘rganganimizda tok manbalari chiziqli xarakteristikaga ega, deb hisoblaymiz. Bunday manbalar qatoriga, masalan moddaning radioaktiv yemirilishida ajralib chiquvchi zaryadlangan zarrachalarning nurlanishiga asoslangan (bunda manbaning toki yemirilish tezligiga bilan aniqlanadi) energiya manbalari kiradi.



2.10-rasm. **Tok manbaining chiziqli tashqi xarakteristikai**



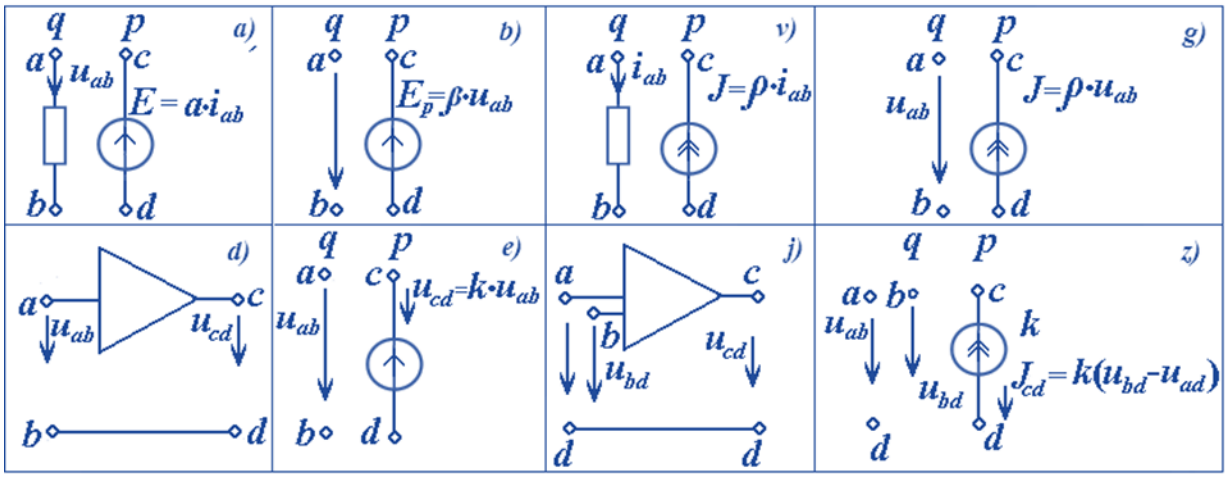
2.11-rasm. **Ideal tok manbai**

EYuK va tok manbalarining muhim turlariga bog‘langan *EYuK* manbalari va bog‘langan tok manbalari kiradi. *Bog‘langan elektr yurituvchi kuch manbalari* deb shunday manbalarga aytiladiki, ularda *EYuK* zanjirning biror qismi tokiga yoki kuchlanishiga bog‘liq bo‘ladi. Aksariyat, bunday *EYuK* manbalari *boshqariluvchi manbalar* deyiladi. Agar manba *EYuK* qiymati tok (yoki kuchlanish)ga bog‘liq bo‘lsa, u holda bunday manba *tok (kuchlanish) bilan boshqariluchi* deyiladi.

Shunga o‘xshash, tok zanjirning biror qismidagi tok yoki kuchlanishga bog‘liq bo‘lsa, bunda u *bog‘langan tok manbai* deyiladi. Agar manba tokining miqdori kuchlanishga (yoki tokka) bog‘liq bo‘lsa, u holda bunday manba *kuchlanish (yoki tok) bilan boshqariluvchi tok manbai* deyiladi. Boshqariluvchi manbaning *EYuK* yoki tokining qiymatlari berilganda, ular bilan birga boshqariluvchi va boshqaruvchi qiymatlar orasidagi proporsionallik koeffisiyentlari hamda shartli musbat yo‘nalishlari va boshqaruvchi qiymatning joylashgan nuqtasi berilishi shart. 2.12-rasmda har xil bog‘langan manbalarning belgilash sxemalari keltirilgan: tok bilan boshqariluvchi bog‘langan *EYuK* manbai (2.12,*a*-rasm); kuchlanish bilan boshqariluvchi bog‘langan *EYuK* manbai (2.12,*b*-rasm); tok bilan boshqariluvchi bog‘langan tok manbai (2.12,*v*-rasm); kuchlanish bilan boshqariluvchi bog‘langan tok manbai (2.12,*g*-rasm).

Quyidagi 2.12-rasmda α koeffisiyent qarshilikning o‘lchamiga ega, β, ρ -

koeffisiyentlar o‘lchamsiz qiymatlar, η – koeffisiyenti o‘tkazuvchanlik o‘lchamiga ega. Manbaning *EYuK* yoki toki yo‘nalishi o‘zgarmasdan, boshqaruvchi tok yoki boshqaruvchi kuchlanishning shartli-musbat yo‘nalishlari o‘zgarsa α, β, ρ, η koeffisiyentlar oldidagi ishoralar o‘zgaradi yoki barcha bog‘lanishlarni minus ishora bilan yoziladi. Masalan, bog‘langan manbaning *EYuK* 2.12,*a*-rasm keltirilgan yo‘nalishda bo‘lsin. Agar *q* shoxobcha toki *b* dan *a* ga tomon yo‘nalgan bo‘lsa, unda *r* shoxobcha *EYuK* quyidagi ifoda bilan aniqlanadi $E_p=-\alpha\cdot i_{ba}$ yoki $E_p=(-\alpha)\cdot i_{ba}$.



2.12-rasm. **Har xil bog‘langan manbalarning belgilash sxemalari**

Bog‘langan manbaning misolida operasion kuchaytirgichni olsak bo‘ladi. Uning kirish va chiqish qiymatlari u_{ab} va u_{cd} bo‘lsin (2.12,*d*-rasm). Cheksiz katta kirish va cheksiz kichik chiqish qarshiliklariga ega bo‘lgan operasion kuchaytirgichning ekvivalent sxemasi 2.12,*e*-rasmda keltirilgan. Kuchaytirgich kirish va chiqish kuchlanishlarining ishoralari qarama-qarshi bo‘lganda, kuchaytirish koeffisiyenti $-k$ deb qabul qilinadi va uni *invertorlovchi kuchaytirgich* deb ataladi.

Operasion kuchaytirgichning kirishida birnecha kuchlanishlar ta’sir ko‘rsa-tayotgan bo‘lishi mumkin, ulardan ba’zilari invertorlovchi deb nomlangan kirishga ulanishi mumkin (2.12,*j*-rasm). Kirishlaridan biri invertorlovchi bo‘lgan ikki kirishli operasion kuchaytirgichning ekvivalent sxemasi 2.12,*z*-rasmda keltirilgan.

Bunday vaziyatlarda chiqish tokining kirish kuchlanishlarga bog‘liqligi quyidagicha aniqlanadi:

$$J_{cd} = k\,(u_{bd} - u_{ad}).$$

2.6. Elektr zanjirlarining sxemalari

Elektr zanjirlari chizmalarda sxemalar shaklida tasvirlanadilar. *Elektr sxema - zanjir elementlarining asosiy belgilanishini qabul qilib chizilgan, shu elementlarning o‘zaro ulanishlarini ko‘rsatadigan, elektr zanjirlarining grafik tasvirini ifodalaydigan shakldir*.

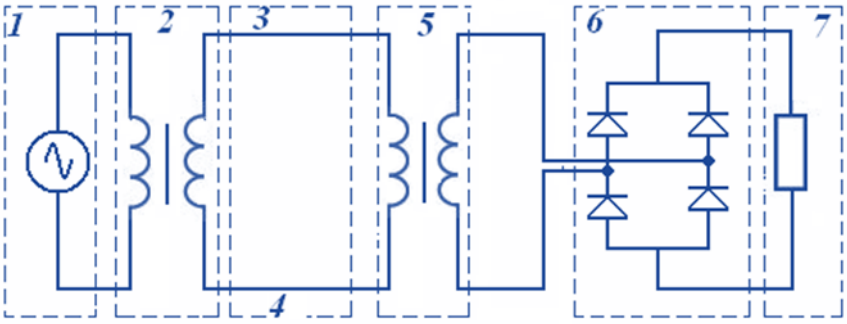
Masalan, 2.13-rasmda tarkibiga quyidagi elementlar kirgan aloqa tizimi elektr ta’minotining elektr sxemasi keltirilgan: 1 – o‘zgaruvchan tok manbai (generator), 2 va 5 – transformatorlar, 3 va 4 – elektr uzatish liniyalari, 6 - o‘zgaruvchan tokni o‘zgarmas tokka aylantiruvchi to‘g‘rilagich, 7 – telekommunikasion tizim elektr qurilmasi yoki yuklama.

Elektr zanjirlaridagi jarayonlarni o‘rganish uchun zanjir elementlaridagi tok va kuchlanishlar orasidagi bog‘lanishlarni bilish zarur. Bu bog‘lanishlar matematik ifodalar shaklida (masalan $u=ir$, $u_L=+Ldi/dt$) bo‘lishi mumkin. Bundan tashqari, ushbu bog‘lanishlar elementlarning Volt-Amper xarakteristikalari (VAX), yoki boshqa xarakteristikalari sifatida berilgan bo‘lishi mumkin.

Aksariyat, elementlarning bog‘lanishlarini VAX, yoki boshqa xarakteristika-lari yordamida berilishiga sabab – ushbu qurilmadagi fizik jarayonlarni yoki matematik ifodalar yordamida berishning imkoniyatlari bo‘lmaganligi, yoki tuzilgan tenglamalarni hisoblashning murakkabligi, yoki qurilmaning ichki tuzilishini bilmaslikdir. Bunday sharoitda qurilmaning xarakteristikaini hosil qilish va uni ifodalashning yagona usuli – o‘tkaziladigan eksperimentdir. Uning yordamida bizni qiziqtirgan nuqtalardagi tok kuchlanish, zaryad, magnit ilashuvlarini o‘lchash va zarur xarakteristikalarni qurish imkoniyatlari vujudga keladi. Bunday xarakteristikalarning mavjudligi bog‘lanishlarni u yoki bu aniqlikda matematik ifodalar yordamida yozish va

elektr zanjiri jarayonlari tadqiqotlarini o‘tkazish imkonini beradi.

Elektr zanjirining elementlaridagi tok, kuchlanish, zaryad, magnit ilashuvi kabi qiymatlari orasidagi bog‘lanishlarni analitik ifodalar yordamida yozilishi – shu *elektr zanjirining matematik modeli*dir. Masalan, $u=ir$– rezistorning matematik modeli; $u_L=d\Psi/dt$ – ideal induktiv g‘altakning matematik modeli; $u=ri+d(dL)/dt$ – real g‘altakning o‘ramlari orasidagi siljish tokini e’tiborga olmagandagi, yoki ketma-ket ulangan rezistor va ideal induktivlik g‘altagidan iborat bo‘lgan shoxobchaning tahminiy matematik modeli. Aksincha, yuqorida keltirilgan matematik ifodalarga, ideal induktivlik g‘altagi va rezistordan iborat elektr zanjiri mos bo‘lishi mumkin.



2.13-rasm. **Aloqa tizimi elektr ta’minotining elektr sxemasi.**

Elektr zanjirining bunday ideallashtirilgan elementlari bo‘lmish rezistor, kondensator, induktivlik g‘altagi, induktiv bog‘langan g‘altak, *EYuK* va tok manbalarining shartli belgilanishlari 2.6, 2.7, 2.9 va 2.11-rasmlarda keltirilgan.

Toklar, kuchlanishlar, magnit ilashuvlari, zaryadlar va boshqa qiymatlar orasidagi matematik ifodalarga mos bo‘ladigan, ideallashtirilgan *r*, *L*, *C*, *M*, *E*, *J* va boshqa elementlardan iborat elektr zanjirlarini keltirish mumkin. Shubhasiz, bunday ideallashtirilgan zanjirlarning sxemalari va real zanjir sxemalari o‘zaro aynan bir xildir, chunki sxemaning har bir elementiga ideallashtirilgan zanjirning yagona elementi mos keladi.

Misol sifatida sxemasi 2.13-rasmda keltirilgan zanjirni ko‘raylik. Agar yuqorida keltirilgan mulohazalarni e’tiborga olsak, bu zanjirning biror almashtirish sxemasini (2.14-rasm) tuzish mumkin. Energiya manbai sifatida generator ishlatilayotgan bo‘lsin. Bunday generator davriy *EYuK* manbai

hisoblanadi. Agar *EYuK*ning va demak, tokning chastotasi past bo‘lsa, generator chulg‘amlarining o‘ramlari orasidagi siljish tokini e’tiborga olmasa bo‘ladi va bu chulg‘amni induktivlik g‘altagi va chulg‘amning aktiv qarshiligi - rezistor sifatida ko‘rish mumkin.

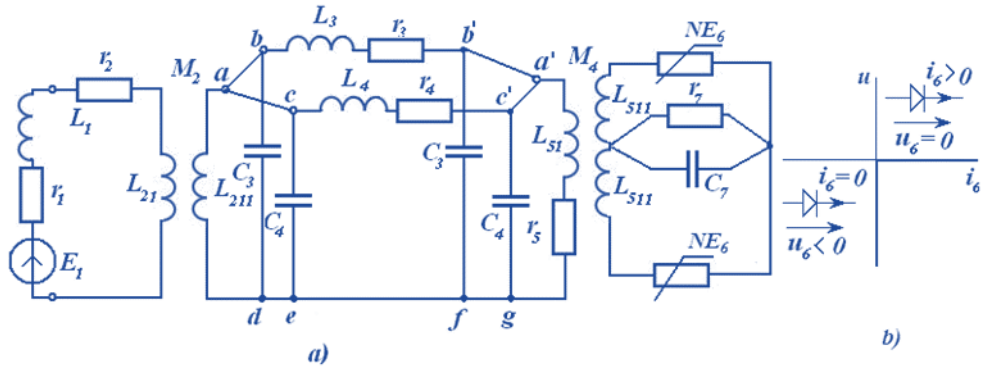
Ma’lum sharoitlarda real sxemaning xususiyatlarini aks ettiruvchi shunday boshqa zanjir sxemasi – *elektr zanjirining almashtirish sxemasi* yoki qisqacha – *almashtirish sxemasi* deyiladi.

Stator chulg‘amida rotorning aylanayotgan magnit maydonidan induktiv-lanayotgan *EYuK* ni ideal *EYuK* manbai deb qabul qilamiz. Shunday qilib generatorning almashtirish sxemasi uch ideal elementlardan iborat bo‘ladi: E_1, L_1, r_1 (2.14,*a*-rasm). Bu uch element ketma-ket ulangan bo‘lishi zarur, chunki magnit maydon energiyasi $Li^2/2$ ham, chulg‘am o‘tkazgichlarida ajralayotgan energiya $r \cdot i^2$ isrofi ham, kuchlanish ri ham chulg‘am toki orqali ifodalanadi. Agar transformatorlardagi (2.13-rasmda 2, 5) ferromagnit elementlar energiya isrofini va nochiziqli xususiyatlarini e’tiborga olmasak, ikki induktiv bog‘langan g‘altaklar (L_{21}, L_{211} va M_2 2-transformator uchun va, mos ravishda, L_{51}, L_{511} va M_5 5 - transformator uchun) sifatida ko‘rilishi mumkin. Rezistor r_2 transformator chulg‘amining aktiv qarshiligi. Uzatish liniyalari 3 va 4 mazkur chastota uchun quyidagi mulohazalar bo‘yicha sxemaga kiritilgan r, L, va S elementlar majmuasi shaklida almashtirish sxemasiga kiritilgan. Liniyadagi tok yo‘li va u bilan bog‘liq bo‘lgan magnit maydoni va energiya isrofi, ketma-ket ulangan L_3, r_3 va L_4, r_4 elementlar shaklida ko‘rsatilgan. Elektr maydoni energiyasi mavjudligi liniya kuchlanishi bilan aniqlanadi va liniya boshida va liniya ketida ulangan ikki kondensator bilan (3-liniya uchun S_3 va 4-liniya uchun S_4) hisobga olinadi. Yoki boshiga, yoki ketiga – bitta kondensator ulasa ham bo‘lar edi. Bu holda liniyadagi energiya isrofi va liniyaning boshi va ketidagi kuchlanishlar farqini o‘zgarmasdan qoldirish uchun, liniyaning r va L parametrlari korreksiyalangan bo‘lishi zarur bo‘ladi.

O‘zgaruvchan tokni o‘zgarmas tokka aylantirishda volt-amper xarakteris-tikalari (*VAX*) 2.14,*b*-rasmda keltirilgan nochiziqli elementlar NE_6 ning alohida

xususiyatlaridan foydalanilgan. Ushbu *VAX* yordamida o‘zgaruvchan tokning to‘g‘rilanishi amalga oshiriladi. Yuklama r_7 qarshilik va S_7 kondensator mavjudligi bilan hisobga olinadi. S_7 kondensatorning mavjudligi rezistordagi tokning shaklini tekislaydi va pulsasiyani kamaytiradi.

Sxemasi 2.13-rasmda berilgan elektr zanjiridan almashtirish sxemasiga (2.14,*a*-rasm) o‘tishda sxemaning tashkil etuvchilari bo‘lmish, alohida elementlarining almashtirish sxemalari asos bo‘ldi.



2.14-rasm. **O‘zgaruvchan tokni o‘zgarmas tokka aylantirish**

2.14, *a*-rasmdagi sxemaning har bir alohida elementi uchun tok, kuchlanish, zaryad va magnit ilashuvlari orasidagi bog‘lanishlarni analitik ifodalar yoki grafik shaklda aniqlash mumkin. Sxema elementlarining matematik ifodalarini va, demak almashtirish sxemalarini tuzish – muhandis uchun shunday nozik masaladirki, uning to‘g‘ri va aniq yechimi elektromagnit jarayonlarining xususiyatlarini chuqur tushunishni, umumiy holda magnit maydoni taqsimlaganligi masalalarini yechish yo‘llarini bilishni talab qiladi.

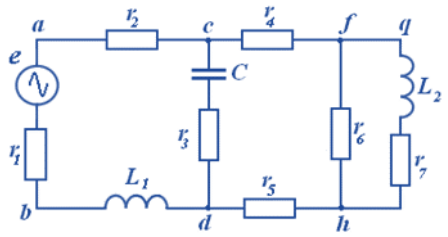
Kelgusida, agar maxsus talablar qo‘yilmagan bo‘lsa, elektr sxemasi va keltirilgan sxemasi bir hil bo‘lgan, ideallashtirilgan elementli sxemalarga tatbiq etish uchun «elektr zanjiri» atamasini ishlatamiz.

Elektr zanjirlari va, demak, ular sxemalari umumiy xolda shoxobchalar va tugunlardan iborat.

Elektr zanjiri sxemasining shoxobchasi deb zanjirning shunday qismiga aytiladiki, uning ixtiyoriy bo‘lagida tokning miqdori doimo bir xil bo‘ladi.

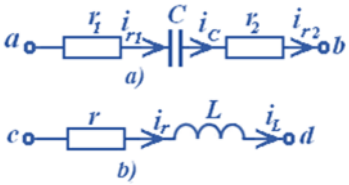
Shoxobcha tarkibida ixtiyoriy miqdordagi ketma-ket ulangan qarshilik,

kondensator, induktivlik elementlari, *EYuK* manbalari bo‘lishi mumkin. Bunga misol sifatida 2.15-rasmdagi sxemani keltirish mumkin. Unda sxemaning *d* nuqtasidan *c* nuqtasi tomon L_1, r_1, *e* va r_2 elementlari bo‘ylab yursak, shu elementlarning har biridan bir xil tok oqishini ko‘ramiz. Demak, sxemaning *d*-L_1-r_1-*e*-r_2-*s* bo‘lagi shoxobcha ekan. Shu *ds* oraliqni *d*-r_3-*C*-*s* bo‘ylab yursak, yana bir shoxobchani ko‘ramiz. Ushbu sxemada yana *c*–r_4–*f*, *f*-r_6-*h*, *q*-L_2-r_7–*h* va *d*-r_5–*h* shoxobchalar ham mavjud. Demak, har bir shoxobchadagi elementlar o‘zaro ketma-ket ulangan ekan.

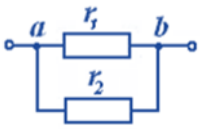


2.15-rasm. **Murakkab ulanishli elektr zanjiri**

Bunda elektr zanjiri elementlarining ketma-ket ulangani deb shunday ulanishiga aytiladiki, unda bir elementning keti ikkinchi elementning boshiga ulanadi, demak zanjir shu ulangan bo‘lagining har bir elementidan oqayotgan tok birxil bo‘ladi.



2.16-rasm. **Ketma-ket ulangan elementlar**



2.17-rasm. **Parallel ulangan zanjir**

Ketma-ket ulangan elementlarga misol sifatida 2.16-rasmda keltirilgan sxemalarni ko‘rib chiqaylik. Unda *a*–*b* oraliqda r_1, *C* va r_2 elementlari ketma-ket ulangan (2.16,*a*-rasm); bunda uchchala elementning toklari $i_{r1}=i_C=i_{r2}$ o‘zaro teng. Ikkinchi shoxobchada esa *c* va *d* nuqtalari orasida *r* va *L* elementlari ketma-ket ulangan va $i_r = i_L$ (2.16,*b*-rasm).

Elektr zanjirining tugunlari deb shoxobchalarning ulangan nuqtalariga aytiladi. Tugun elektr sxemasida nuqta bilan belgilanadi. Misol sifatida 2.15-rasmdagi sxema ko‘rilsa, unda *c*, *d*, *f*, va *h* nuqtalar tugun deyiladi.

Elektr zanjiri shoxodchalarining parallel ulanishi deb shunday ulanishga aytiladiki, unda barcha shoxobchalar boshlari zanjirning bir tuguniga, shoxobcha-lar ketlari esa boshqa tuguniga ulanadi va bunda barcha shoxobchalarda kuchlanishlar bir xil bo‘ladi.

Shoxobchalari parallel ulangan zanjir sxemasi 2.17-rasmda keltirilgan.

Shoxobchalari aralash ulangan elektr zanjirida ketma-ket va parallel ulanishlar birgalikda bajariladi, ya’ni sxemaning bir qismi parallel, boshqa qismi ketma-ket ulanadi.

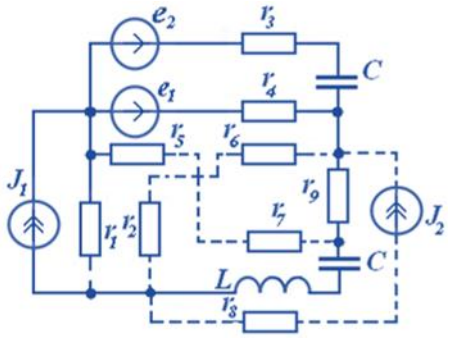
Aralash ulangan zanjir uchun 2.15-rasmdagi sxema misol bo‘la oladi. Unda ketma-ket ulangan r_7 qarshilik va L_2 induktivlik *f* va *h* nuqtalarda r_6 qarshilikka parallel ulanadi. Ular, o‘z navbatida, qo‘shilib, natijaviy qarshilik hosil qiladi va r_4 va r_5 qarshiliklarga ketma-ket ulanadi. O‘z navbatida r_7, L_2, r_6 elementlar r_4 va r_5 qarshiliklarga qo‘shilib, ketma-ket ulangan *S* va r_3 shoxobchaga *s* va *d* nuqtalarda parallel ulanadi.

Elektr zanjirini tekislikda sxema shaklida kesishmaydigan shoxobchalar yordamida tasvirlash mumkin bo‘lsa, unga *yassi* (*planar*) elektr zanjiri deyiladi. Bunga misol sifatida 2.18-rasmda tasvirlangan elektr zanjiri sxemasini keltirish mumkin. Bu sxemaning shtrixli qismini rasmdan olib tashlasak, planar zanjiri hosil bo‘ladi. Sxema kesishgan shoxobchalar yordamida tasvirlansa, unda *yassi bo‘lma-gan (noplanar)* elektr zanjiri hosil bo‘ladi. Unga misol bo‘lib shu rasmdagi sxema shtrixli elementlari bilan xizmat qila oladi.

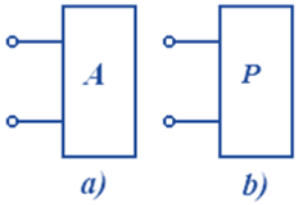
Elektr zanjiri kontu-ri deb, birnecha shoxobchalar-dan o‘tgan ixtiyoriy berk yo‘lga aytiladi. Bunga misol qilib 2.15-rasmdagi *abdca*, *cdhfs* va *fqhf* konturlarni olishimiz mumkin.

Ikki qutbga ega bo‘lgan elektr zanjiri ikkiqutblik deb ataladi. 2.19-rasmda ikkiqutblik shartli ravishda to‘g‘ri to‘rtburchak shaklida tasvirlangan. Zanjirning butun qismini bitta ikkiqutblik deb qarash natijasida zanjir shu qismining umumiy xususiyatlarini aniqlash mumkin. Ikkiqutblik aktiv (2.19,*a*-rasm) va passiv (2.19,*b*-rasm) turlarga bo‘linadi. Ikkiqutblik tarkibida elektr energiya manbai mavjud bo‘lsa, *aktiv ikki qutblik* deyiladi. Chiziqli aktiv ikkiqutblik

uchun yana uning uzil-gan klemmalarida ikkiqutblik ichidagi manba sababli kuchlanishning mavjudligi - qo‘shimcha sharti qo‘yiladi, ya’ni ushbu manbalarning ta’sirlari ikkiqutblik ichida kompensasiyalanmasligi zarur. *Passiv ikki qutblik* deb tarkibida elektr energiya manbalari bo‘lmagan ikki qutblikka aytiladi. Manbalari o‘zaro kompensasiyalanib, ikkiqutb-likning ikki uzilgan klemmalarida kuchlanish bo‘lmasa, chiziqli ikki qutblik tarkibida elektr energiya manbalari mavjudligi joiz bo‘ladi.



2.18-rasm. **Yassi (planar)**



2.19-rasm. **Ikkiqutblik elementlar**

Passiv ikki qutblik bo‘la turib, uning tarkibida o‘zaro kompensasiyalanuvchi manbalar mavjud bo‘lishining mumkinligi haqidagi shart – bu zaruratdir. Chunki zanjirning bir butun qismini ikkiqutblik bilan almashtirish g‘oyasi, shu qismning umumiy hususiyatlarini uning faqat tashqi klemmalariga nisbatan o‘rganilishini nazarda tutadi. Ushbu shart faqat chiziqli zanjirlargagina taalluqlidir, chunki nochiziqli zanjirlarda bunday kompensasiya faqat bitta yoki faqat birnecha rejim uchun olinishi mumkin va boshqa rejimlar uchun olinishi mumkin bo‘lmaydi.

2.7. Elektr zanjiri sxemasining topologiyasi, sxema grafigi

Tugunlar zanjirning elektr sxemalarida yoki almashtirish sxemalarida nuqtalar yordamida tasvirlanadi. Murakkab sxemalarda, elementlar orasida ulanish o‘tkazgichlarining o‘zaro kesishishlari mavjud bo‘lganda, ular orasida elektr bog‘lanish mavjudligini belgilashda ham nuqtalar ishlatiladi (masalan, 2.14,*a*-rasmdagi sxemada *a, b, c, d, e, f, g, a′, b′* va *c′* nuqtalar). Rasman, shu barcha nuqtalarni tugunlar deb hisoblash mumkin. Bunday mavhum

tugunlarning xususiyatlari shundan iborat bo‘ladiki, ulardan tok oqib o‘tib, qarshiliklari nolga teng bo‘lganligi uchun ulardagi kuchlanishlari nolga teng bo‘lgan bo‘laklar bilan ulangan. Shu sababli bunday tugunlar potensiallari teng; sxema shaklini biroz o‘zgartirib, ularni bitta tugun bilan belgilash mumkin. 2.14,*a*-rasmdagi sxemada *a, b, c* tugunlarni bitta tugunga (2.20-rasmda 3-tugun), *a', b'* va *c'* tugunlarni – boshqa bir (4-tugun), *d, e, f, g* – yana boshqa (5) tugunga birlashtiramiz.

Sxema shoxobchalarining o‘zaro ulanishlarini tasvirlashda yanada yaqqollik hosil qilish uchun, elektr zanjirining shunday tasvirini kiritish maqsadga muvofiq bo‘ladiki, unda sxemaning shoxobchalari kesmalar bilan – graf shoxobchasi, tugunlari – nuqta bilan – graf tuguni tasvirlanadilar. Elektr zanjiri sxemasining bunday topologik tasviri *elektr sxemasining grafi* yoki *sxema grafi* deb nomlanadi.

E’tibor beraylik, topologik sxemada *EYuK* va tok manbalari tasvirlanmaydi. Ideal tok manbai bo‘lgan shoxobchalar topologik sxemaga umuman kirmaydilar, chunki bunday manbalarning ichki o‘tkazuvchanligi nolga teng demak, bunday shoxobchalarning qarshiligi cheksizlikka teng.

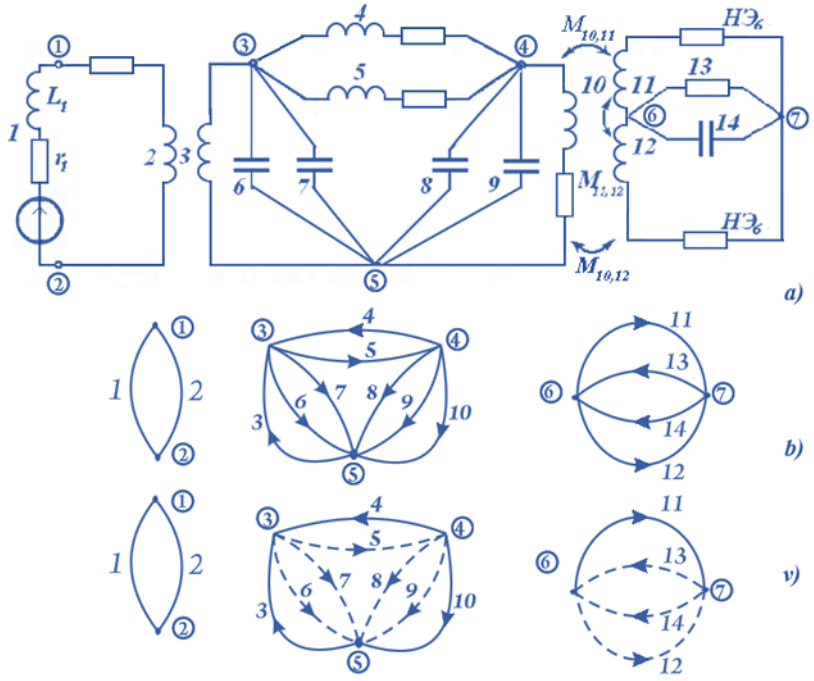
Juft tugunlari orasida shoxobcha yoki shoxobchalar majmuasi bo‘lgan *graf bog‘langan* deyiladi. Agar grafda toklarning yoki kuchlanishlarning shartli-musbat yo‘nalishlari strelkalar bilan belgilangan bo‘lsa, u holda bunday graf *sxemaning yo‘naltirilgan grafi* deyiladi.

2.20,*a*-rasmdagi sxemaning yo‘naltirilgan grafi 2.20,*b*-rasmda keltirilgan. O‘zaro induktivlik *EYuK*ni e’tiborga olish o‘zgacha bo‘lishi sababli, sxemaning (2.20,*a*-rasm) grafi uchta alohida, ya’ni bog‘lanmagan qismlarga ajraladi.

Bundan buyon sxema grafidagi tugunlarni shu tugun yonida joylashgan doira ichidagi raqamlar bilan belgilashga, shoxobchalarni – doirasiz raqamlar bilan belgilashga shartlashamiz. Sxema grafida (2.20,*b*-rasm) 7 tugun va 14 shoxobcha mavjud.

Sxema grafining muxim topologik tushunchasi – *sxema grafining daraxti*dir. Sxema grafining daraxti – grafning barcha tugunlarini kontur hosil

qilmasdan birlashtiruvchi ixtiyoriy shoxobchalar majmuasini tasvirlaydi. Birgina sxema grafi har xil daraxtlarga ega bo‘lishi mumkin. Daraxtni tashkil etuvchi sxema graflarini qalin chiziqlar bilan tasvirlaymiz. Daraxt grafini to‘la grafgacha to‘ldiradigan, demak, graf daraxtiga kirmaydigan shoxobchalar *sxema grafi bog‘lamlari* deyiladi. Bunday shoxobchalarni yoki punktir chiziq bilan, yoki ingichka chiziq bilan tasvirlaymiz. Shu fikr aniqki, sxema grafining har bir daraxtiga *sxema ko-grafi*, yoki *to‘ldiruvchi sxema grafi* deb nomlangan, *o‘zining sxema grafi bog‘lamlari majmuasi* mos keladi. Masalan, 2.21,*b*-rasmdagi graf uchun uning to‘ldiruvchi graflariga - *ab, bf, fd, da* va *bd* tugunlarni tutashtiruvchi shoxobchalar (graf bog‘lamlari) kiradi. 2.20,*v*-rasmda sxema grafi daraxti majmualaridan biri ajratib ko‘rsatilgan.

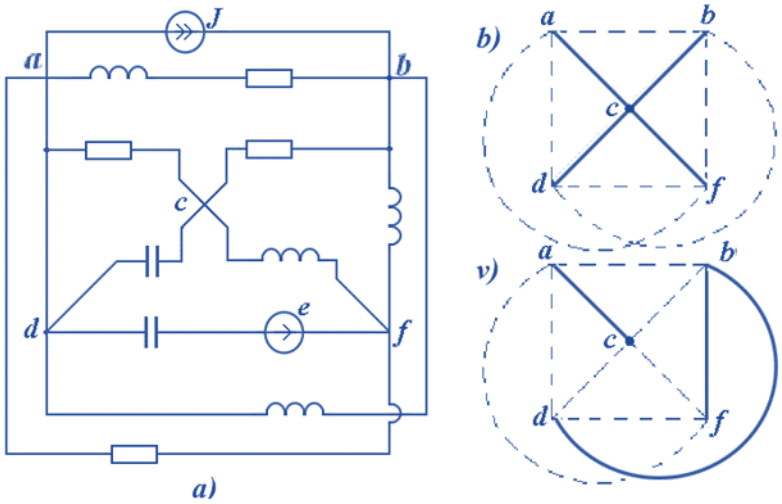


2.20-rasm. **Sxema va uning yo‘naltirilgan graflari**

2.21-rasmda zanjirning elektr sxemasi (*a*) va shu sxema grafi ikki har xil daraxtlari bilan keltirilgan (*b* va *v*).

Agar bog‘langan graf *p* shoxobcha va *q* tugunga ega bo‘lsa, u holda uning daraxti *q*-1 shoxobchaga ega bo‘ladi, bog‘lamlar soni esa $n=p-(q-1)$ bo‘ladi. Ushbu ta’kidlashlar daraxt va sxema grafi bog‘lamlarining ta’riflari asosida kelib chiqadi, chunki sxemaning *q* shoxobchalari daraxtning kamida *q*-1 shoxobchasi bilan ulanishi mumkin, bog‘lamlarga esa sxema grafining qolgan

barcha p-(q-1) shoxobchasi kiradi.



2.21-rasm. **Elektr zanjir sxemasi va uning sxema yo‘naltirilgan graflari sxemalari**

Masalan, 2.20,*v*-rasmda keltirilgan bog‘lanmagan sxema grafining ayrim qismlarida quyidagilar mavjud: grafning chap qismida r=2, q=2, n=2–(2-1); o‘rta qismida p=8, q=3, n=8-(3-1)=6; o‘ng qismida p=4, q=4-(2-1)=3.

E’tiborni shunga qaratish kerakki, ushbu qiymatlar to‘lik sxema grafi uchun berilmagan. Darhaqiqat, to‘lik sxema grafi uchun quyidagilarga ega bo‘lamiz: r=14, q=7, n=14–(7-1)=8, ammo bog‘lanishlar soni 1+3+6=10. Topologik nuqtai nazardan bog‘lanmagan (ammo elektromagnit yoki boshqa jarayonda bog‘langan) sxema graflari uchun bog‘lamlar soni $n=r-(q-1)+N-1=r-q+N$ ga teng, bunda N – sxema grafining topologik bog‘lanmagan alohida qismlari soni. Ushbu holat uchun N=3, shuning uchun n=14-(7-1)+3=10. 2.21-rasmdagi sxema uchun p=10, q=5, n=6.

2.8. Elektr zanjirlarining tahlili va sintezi

Elektr zanjirlari nazariyasining vazifalarini berilgan boshlang‘ich materiallar va ko‘zlanayotgan natijaviy maqsadlar bo‘yicha o‘zaro zid *ikki guruhga bo‘lish mumkin* – ***elektr zanjirlarining tahlili*** *masalalari va* ***elektr zanjirlarini sintez qilish*** *masalalari*.

Tahlil qilishning asosiy maqsadi – berilgan elektr zanjirida elektr jarayonlarni hisoblashdir, ya’ni zanjirning tuzilishi, barcha elementlari

xarakteristikalari, mavjud EYuK va tok manbalarining o‘zgarish qonuniyatlari berilgan bo‘lib, zanjir alohida elementlarining toklari va kuchlanishlari o‘zgarishini aniqlash hamda hisoblangan qiymatlar joiz (ruxsat etilgan) qiymatlarga mos ekanligini bilishdir.

Sintez qilishning asosiy maqsadi (tahlilga teskari masala) – elektr jarayonlarining berilgan o‘zgarish qonuniyatiga javob beruvchi elektr zanjiri zaruriy tuzilmasini - sxemasini, elementlari parametrlarini va kerakli xarakteristikalarini hosil qilishdir. Masalan, ikki kirish va ikki chiqish klemmalari berilgan shunday zanjirni tuzish zarur bo‘lsinki, bunda shu zanjir kirishidagi kuchlanishning vaqt bo‘yicha oldindan ma’lum bo‘lgan qonuniyat bilan o‘zgarishida, zanjirning chiqish qismida vaqt bo‘yicha oldindan ma’lum bo‘lgan qonuniyat bilan o‘zgaruvchi muayyan kuchlanishni hosil qiluvchi zanjir sxemasi taklif etilishi zarur bo‘lsin. Boshqacha qilib aytganda, shunday zanjirni sintez qilish (tuzish) zarurki, bu zanjirning kirish kuchlanishi berilgan shaklini, zanjir chiqishidagi kuchlanish shakli sifatida bizning hoxishimiz yo‘nalishida o‘zgartirish qobiliyatiga ega bo‘l-sin. Bunday vazifalar, masalan telekommunikasiya, televideniye va avtomatikada muhim bo‘lgan ma’lum ko‘rinishdagi impulslarni o‘zining chiqish klemmalarida shakllantiruvchi elektr zanjirlarini barpo etishda, yoki hisoblash va boshqarish elektron mashinalarini qurishda zarur bo‘lgan ba’zi arifmetik yoki mantiqiy operasiyalarni bajarish jarayonida muhim ahamiyatga ega.

Sintez vazifasini yechish birnecha usullarda bajarilishi mumkin. Bu vazifa bir qator zanjirlarni tahlil qilib, ulardan mosroq bo‘lganini tanlab, optimal variant zanjirini aniqlash bilan yechilishi mumkin. Vazifa bunday qo‘yilishining o‘zida-yoq, optimal zanjirning javob berishi lozim bo‘lgan talablarini ishlab chiqish masalasi paydo bo‘ladi. Sintez vazifalari, aksariyat, har xil qurilmalarni loyihalash-da vujudga kelishini e’tiborga olsak, u holda zanjirning optimallik talablari oldindan berilishi yoki oldindan ishlab chiqilishi shart. Bu talablar ham iqtisodiy, ham texnologik xarakterga ega bo‘lishi mumkin, ya’ni ular hosil qilinishi zarur bo‘lgan zanjirning massasi, tashqi o‘lchamlari, narxi, qanday

elementlardan tashkil etilishini tartibga solinishi mumkin. Bundan tashqari, texnik va texnologik talab-larni ishlab chiqishda, sintez qilinayotgan zanjir xarakteristikalarining oldindan berilayotgan xarakteristikalarga nisbatan joriy bo‘lgan og‘ishlarining sifat va miqdoriy talablari berilishi shart. Ushbu keltirilgan barcha talablar qoniqtirilganda-gina izlanayotgan zanjirni ishlab chiqishning optimal variantini aniqlash mumkin.

Yuqorida ko‘rsatilganidek, elektr zanjirlarini sintez qilish zanjirlarning umumiy xususiyatlariga asoslanadi, bu xususiyatlar esa zanjirlarni tahlil qilish yo‘li bilan tekshiriladi. Shuning uchun zanjir sintezidan avval uning tahlili bo‘lishi zarur. Bu chiziqli va nochiziqli zanjirlar uchun bir xil darajada taalluqlidir. Darhaqiqat, parametrlari na tokka va na kuchlanishga bog‘liq bo‘lmagan elementlardan tuzilgan chiziqli elektr zanjirlarini tahlil va sintez qilish masalalari nazariy ishlanmalarga osonroq bo‘ysunadi. Aynan shu masalalarga darslikning to‘rtinchi – sakkizinchi boblari bag‘ishlangan. U yoki bu shakldagi xarakteristika-larga ega bo‘lgan nochiziqli elementlar qo‘llanganda zanjirlar sintezining imkoniyatlari tubdan ortadi. Nochiziqli elektr zanjirlarining tahliliga darslikning o‘n oltinchi bobi bag‘ishlangan, unda nochiziqli zanjirlarning xususiyatlari va ularni hisoblashning ba’zi usullari keltiriladi. Har xil nochiziqli zanjirlarni tahlil qilish jarayonida olingan natijalar asosida, elektr zanjirlarini sintez qilishda u yoki bu nochiziqli elementlarni qo‘llash imkoniyatlari haqida bilvosita xulosalar qabul qilish mumkin.

Yuqorida zarur bo‘lgan zanjirlarni tanlash va tahlil qilish yo‘li bilan sintez masalasini hal qilish mumkin deyilgan edi. Biroq, bu fikr eng sodda zanjirlar uchun yaroqli bo‘lsa, murakkabroq zanjirlar sintezida maqsadga muvofiq emas. Sintez qilinishi mo‘ljallanadigan umumiy holdagi aksariyat murakkab zanjirlar xususiyatlarini tahlil qilish masalasi, bir qator variantlarning tadqiqotini bajarish zarurligi uchun, anchagina ko‘p mexnat sarflanadigan murakkab masala hisob-lanadi. Sintez usullarini qo‘llash natijasida, zanjirlarning umumiy xususiyatlaridan kelib chiqib, oldindan berilgan xarakteristikalarga ega bo‘lgan zanjirlarning tarkibini ham, zanjirlar parametrlarini ham analitik usulda

hisoblash imkoniyat-larini beruvchi tavsiyalar olish mumkin.

Analitik yechimlar natijasida hosil qilingan zanjirlar u yoki bu iqtisodiy yoki texnologik talablarga javob bermasligi mumkin. Shuning uchun, sintez qilish natijasida hosil bo‘lgan zanjirlarni ekvivalent o‘zgartirish muammosi kelib chiqadi, ular natijasida zanjir xarakteristikalari o‘zgartirilmasdan, zanjir strukturasi va elementlar tarkibi o‘zgartiriladi. Ba’zi hollarda, sintez usullarini qo‘llashning boshlanishida, berilgan xarakteristikalardan joiz chegaralarda og‘ish sharti bilan, bu shartlarni bajarish mumkin. Bu izlanayotgan zanjir xususiyatlarini ifodalovchi funksiyalarni tanlash bilan amalga oshiriladi. Shu ta’riqa tanlab olingan funksiyalar, tarkibidagi elementlarini u yoki bu kombinasiyada o‘z ichiga olgan zanjirlarni sintez qilish imkoniyatini tug‘diradi. Shu nuqtai nazardan, sintez - zanjirning oldindan berilgan xususiyatlari matematik ifodalarining ko‘proq to‘g‘ri keladiganini tanlash muammosini o‘z ichiga oladi.

Nazorat savollari

1. Elektr va magnit zanjirlari sharhlab bering.
2. Elektr zanjirining asosiy va yordamchi elementlarini aytib bering.
3. Ketma-ket ulangan rezistor, kondensator va induktiv elementli elektr zanjir sxemasi tushuntiring.
4. EYuK manbalari va tok manbalarini tushuntiring.
5. Sintez va tahlil qilishning maqsadlarini tushuntirib bering.
6. Elektr zanjir sxemasi va uning sxema yo‘naltirilgan graflari sxemalarini tushuntirib bering.
7. Elementlar ulanishlarining ekvivalent parametrlarini hisoblashni izohlang.

3-BOB. O‘ZGARMAS TOK ELEKTR ZANJIRLARINI TAHLIL QILISHDA ASOSIY QONUNLAR VA USULLAR

3.1. Elektr zanjirlar uchun Kirxgof va Om qonunlari

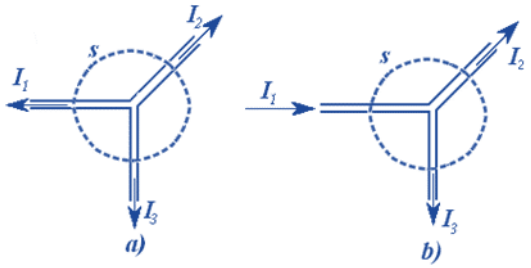
O‘rganish jarayonini qulay va ko‘rgazmali bo‘lishi maqsadida ushbu bobda tarkibida reaktiv elementlari (C sig‘im, *L* induktivlik va *M* o‘zaro induktivlik) bo‘lmagan, faqat *R* omik qarshiligi mavjud bo‘lgan o‘zgarmas tok zanjirlarining barqarorlik jarayonlarini ko‘ramiz. Darhaqiqat, ushbu shartlar bajarilganda $d/dt=0$ bo‘ladi va, demak shoxobchaga kondensatorning ulanishi – shu shoxobchaning uzilishini ($i=Cdu_C/dt=0$ bo‘lganligi uchun) anglatadi, induktivlikning mavjudligi esa ($u_L=Ldi/dt=0$ bo‘lganligi uchun) sezilarsiz deb hisoblanadi. Undagi tok, e.yu.k., kuchlanishlarni belgilaganda bosh harflardan foydalanamiz (*I, E, U*). Biroq, bu bobdagi ayrim xulosalarni keyingi boblarda ko‘riladigan o‘zgaruvchan tok zanjirilariga ham tatbiq etish mumkin bo‘lganligi uchun, bunda o‘zgaruvchilarning oniy qiymatlarini belgilashda kichik (*i, e, u* va h.k.) harflardan foydalanamiz.

Elektr zanjirlarini hisoblaganda Kirxgof, Om qonunlari, almashtirish teoremasi qo‘llaniladi. Ularni mujassamlangan parametrli zanjirlarni hisoblashda ko‘rib chiqamiz.

Kirxgofning birinchi qonuni - elektr (zaryad) miqdori saqlanish qonunidan kelib chiquvchi natijadir; undanda ko‘ra ahamiyatliroq qilib aytganda - bu qonun *energiya saqlanish qonuni*ning elektr zanjirlari «tilidagi» ifodasidir: zanjirning *bir tuguniga shoxobchalardan keluvchi barcha toklar yig‘indisi, ushbu tugundan chiqib ketayotgan barcha toklar yig‘indisiga teng*. Albatta, bu fikrlar faqat o‘tkazuvchanlik tokiga taalluqli bo‘lib, siljish va ko‘chish toklari yo‘q yoki juda kichik bo‘lganligi sababli, e’tiborga olinmaydi, deb hisoblanganda haqlidir. Shu-ning uchun zanjirning tugunini berk yuza *s* bilan o‘rab olamiz (3.1,*a*-rasm).

Qabul qilingan farazlarga muvofiq, mujassamlangan parametrli zanjirlardagi barcha sig‘imlar zanjirdagi mavjud kondensatorlarda mujassam

bo‘lgan. Bu - zanjir elementlariga ulangan o‘tkazgichlardan zanjirning boshqa qismlariga elektr siljish toklarining o‘tishini e’tiborga olmaslikka mos keladi. Demak, berk yuza *s* orqali shu yuzani kesib o‘tayotgan o‘tkazgichlardagi faqat o‘tkazuvchanlik toklari oqib o‘tadi, deb qabul qilamiz.



3.1-rasm. **Kirxgofning birinchi qonuni**

Tokning uzluksizligi prinsipi asosida, bu holat uchun quyidagi ifodaga ega bo‘lamiz

$$\oint_S Jds = I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

Zanjirning tuguniga ulangan ixtiyoriy *p* ta shoxobcha uchun

$$\sum_{k=1}^{n} I_k = 0, \qquad (3.1)$$

ya’ni, *elektr zanjirining tugunidagi toklar algebraik yig‘indisi nolga teng,* mana shu Kirxgof birinchi qonunining ta’rifidir.

Kirxgofning birinchi qonuni chet tillardagi adabiyotlarda har xil nomlarda uchraydi, shulardan biri ***Kirxgofning toklar qonuni***, yana biri ***Kirxgofning tugunlar uchun qonuni*** – elektr zanjirining tugunlaridagi toklar uchun qo‘llaniladi va elektr tokining uzluksizligi prinsipiga asoslanadi . Kirxgof birinchi qonunining har xil nomlari ichida, uning mohiyatini aniqroq ifodalaydigani - Kirxgofning toklar qonuni (***KTQ***) nomidir. Kelgusida bu qonunni mana shu nomda ishlatamiz.

KTQ asosida tenglamalar tuzishni barcha shoxobchalarda toklarning shartli-musbat yo‘nalishini aniqlash va ularni sxemada strelkalar bilan belgilashdan boshlash zarur. Toklarning musbat yo‘nalishi tugundan boshlansa, (3.1) tenglama-ning chap tomonidagi toklarning harfli belgilariga «plyus»

ishorasini, musbat yo‘nalishi tugun tomon yo‘nalgan bo‘lsa, toklarning harfli belgilariga «minus» ishorasini qo‘yiladi. 3.1,*a*-rasmdagi holatda tenglamaning barcha toklari uchun «plyus» ishora, 3.1,*b*-rasmdagi holat uchun esa quyidagicha yozish kerak:

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0.$$

Agar hisoblash natijasida biror tok vaqtning biror oni uchun musbat ishorali ($I_k > 0$) bo‘lsa, demak shu onda tokning yo‘nalishi strelka ko‘rsatishiga mos bo‘ladi. Agar hisoblash natijasida $I_k < 0$ bo‘lsa, demak bu tokning yo‘nalishi aslida strelkaga teskari yo‘nalishda bo‘ladi.

Kirxgofning ikkinchi qonuni elektr zanjirlari berk konturlari uchun qo‘llaniladi. Bu qonun §1.3da qabul qilingan «zanjirning ixtiyoriy *m* va *n* juft tugunlari orasidagi kuchlanish shu nuqtalar potensiallari ayirmasiga teng $u_{mn}=\varphi_m-\varphi_n$» degan ta’rifdan kelib chiqadi

$$\oint Edl=\oint E_{ind}dl+\oint E_{tashqi}dl \qquad (3.2)$$

Unga ko‘ra *berk konturni aylanib o‘tishdagi har bir elementlar kuchlanishlarining algebraik yig‘indisi nolga teng* bo‘ladi

$$\sum u_{mn} = 0 .$$

(3.2)dagi $\oint E_{tashqi}dl$ qiymat konturga ta’sir etayotgan tashqi manbalar *EYuK*-larining ΣE_{tashq} yig‘indisidir. Tenglamaning $\oint E_{induk}dl$ tashkil etuvchisi tarkibiga esa konturdagi barcha induktivlanayotgan *EYuK* lar – ham elektromagnit induksiyasi, ham o‘zinduksiya, ham o‘zaro induksiya asosidagi *EYuK* lar kiradi. Masalan g‘altakdagi $e_L=Ldi/dt$ ni olaylik. Agar (3.2) ning birinchi tashkil etuvchisiga energiya manbai sifatida faqat generatorlardagi *EYK*larning yig‘indisi Σe_{ind} ni kiritsak, u holda g‘altaklardagi induktivlanayotgan o‘zinduksiya va o‘zaro induksiya EYKlarini tenglamaning chap tomoniga o‘tkazilishi va $\oint E\,dl$ ning tarkibiga kiritilib, g‘altak klemmalaridagi kuchlanishlar pasayuvi sifatida e’tiborga olinishi shart. Masalan g‘altak uchun tenglamaning chap tomonida $i_L=+Ldi/dt$ paydo bo‘ladi. Chap tomondagi $\oint E\,dl$

tarkibiga konturga kiruvchi reostatdagi kuchlanishlar pasayuvi *RI* ham, kondensatordagi $u_C=q/C$ kuchlanishlar pasayuvi ham kiradi.

Konturning barcha *p* shoxobchalaridagi energiya manbalari *EYuK*larining yig‘indisini quyidagicha belgilaymiz

$$\sum_{k=1}^{k=n} e_k = \sum_{k=1}^{k=n} e_{k.tash} + \sum_{k=1}^{k=n} e_{k.ind}$$

undan

$$\sum_{k=1}^{k=n} u_k = \sum_{k=1}^{k=n} e_k \,. \qquad (3.3)$$

Shunday qilib, Kirxgofning ikkinchi qonuni quyidagicha talqin etiladi: *elektr zanjirining ixtiyoriy berk konturidagi barcha shoxobchalar kuchlanishlari pasayuvining yig‘indisi, shu konturga ta’sir etayotgan energiya manbalari EYuK larining algebraik yig‘indsiga teng*.

Agar, umumiy holda, zanjirdagi biror *m* va *n* tugunlar orasidagi *k* – shoxobcha tarkibida aktiv qarshiligi R_k bo‘lgan rezistor, induktivligi L_k bo‘lgan g‘altak va sig‘imi C_k bo‘lgan kondensator mavjud (3.2-rasm) bo‘lsa, u holda ushbu shoxobcha bo‘ylab kuchlanishlar pasayuvi shu elementlarning kuchlanishlar pasayuvlari yig‘indisiga teng bo‘ladi

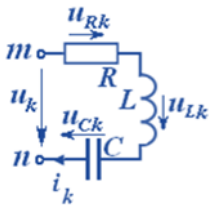
$$u_k = u_{Rk} + u_{Lk} + u_{Ck} \qquad (3.4)$$

unda

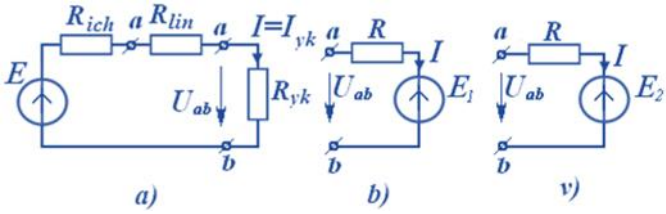
$$u_k = R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + \frac{q}{C_k} = R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + \frac{1}{C}\int_0^t i_k dt + u_{Ck}. \qquad (3.5)$$

Kirxgofning ikkinchi qonuni asosida tenglamalar tuzish uchun barcha shoxobchalarning i_k toklari va energiya manbalarining *EYuK*lari ye_k musbat yo‘nalishlari berilgan bo‘lishi shart. Kuchlanishlar u_k va i_k tokning musbat yo‘nalishlariga mos deb hisoblaymiz. Shundan so‘ng konturni aylanib chiqishning biror yo‘nalishini tanlab, kuchlanishlar $\sum_{k=1}^{k=n} u_k$ yig‘indisi va *EYuK*lar $\sum_{k=1}^{k=n} e_k$ yig‘indisini tuzishda u_k va ye_k ning harfli belgilari oldiga «plyus» yoki «minus» ishoralarini qo‘yish lozim. Agar u_k va ye_k qiymatlar musbat yo‘nalishlari aylanish yo‘nalishi bilan mos kelsa «plyus», aksi bo‘lsa «minus»

ishorasi qo‘yiladi.



3.2-rasm. ***r,L,C* elementlarni ketma-ket ulanishi**



3.3-rasm. **Qarshiliklarni ketma-ket ulanishi**

Kirxgof ikkinchi qonunining har xil nomlari ichida, uning mohiyatini aniqroq ifodalaydigani - Kirxgofning kuchlanishlar qonuni (KKQ) nomidir. Kelgusida bu qonunni mana shu nomda ishlatamiz.

Om qonuni. Rezistiv qarshiliklari bo‘lgan zanjirlar uchun siljish va ko‘chish toklari nolga teng deb faraz qilamiz. Natijada, faqat o‘tkazuvchanlik toklari e’tiborga olinayotgan 2.9,*a*-rasmdagi zanjir uchun keltirilgan (2.8) matematik ifoda manbaning *EYuK* bilan undagi yuklama toki *I* orasidagi bog‘lanishni belgilagan bo‘lsa, 3.3,*a*-rasmdagi ixtiyoriy ketma-ket ulangan qarshiliklar $\Sigma R=R_{ich}+R_{lin}$ uchun yuklama-dagi kuchlanish quyidagi ifoda bilan aniqlanadi $U_{ab}=R_{yuk}\cdot I$, bunda R_{lin} - manbadan yuklamagacha bo‘lgan ixtiyoriy uzunlikdagi liniya o‘tkazgichining qarshiligi. Bu ifodalarni (2.8)ga qo‘ysak, yuklama kuchlanishining boshqacha ko‘rinishini hosil qilamiz

$$U_{ab}=E-\Sigma R\cdot I, \qquad (3.6)$$

bundan tokni

$$I=(E-U_{ab})/\Sigma R \qquad (3.7)$$

ifoda bilan aniqlaymiz. (3.7) tenglama *Omning umumlashtirilgan qonuni* deb ataladi.

Tanlangan musbat yo‘nalishlar o‘zgartirilganda, (3.7)dagi barcha hadlarning yoki ba’zi hadlarning ishoralari o‘zgarishi mumkin; masalan, 3.3,*b*- va 3.3,*v*-rasmlarda tasvirlangan zanjirlarda, mazkur tenglamalar quyidagicha yoziladi

$$U_{ab}=E_1+IR \quad \text{yoki} \quad I=(U_{ab}-E_1)/R; \qquad (3.8)$$

$$U_{ab}=-E_2+IR \quad \text{yoki} \quad I=(U_{ab}+E_2)/R; \tag{3.9}$$

Ushbu o‘zgaruvchilar musbat yoki manfiy qiymatlarni ifodalashi ham mumkinligini eslatib o‘tamiz.

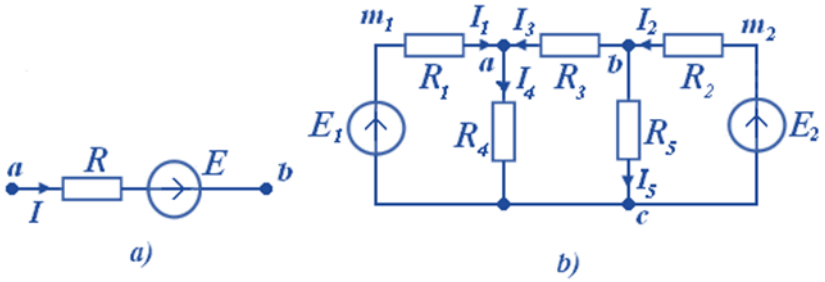
Kuchlanish U_{ab} ni *a* va *b* nuqtalari (3.4,*a*-rasm) orasidagi potensiallar farqi ekanligini e’tiborga olinsa, ya’ni uni φ_a va φ_b orqali ifodalansa, unda *umumlashtirilgan Om qonuni* boshqa ko‘rinishni, masalan (3.9) uchun quyidagi ko‘rinishni oladi

$$I=(\varphi_a-\varphi_b+E_2)/R.$$

Elektr zanjiri elementidagi tok va kuchlanish orasidagi bog‘lanish

$$U_{ab}=R\,I$$

zanjirning bir qismi uchun Om qonuni deyiladi.



3.4-rasm. **Om qonunini ko‘rib chiqish uchun zanjir**

Bir konturli zanjir uchun Om qonuni quyidagi ko‘rinishda bo‘ladi

$$I=\Sigma E\,/\,\Sigma R \quad \text{yoki} \quad \Sigma R\cdot I=\Sigma E \tag{3.9,\textit{a}}$$

bunda ΣE – konturdagi EYuKlar yig‘indisi; ΣR – konturdagi qarshiliklar yig‘indisi.

Masalan, 3.4,*b*-rasmdagi tashqi kontur uchun uni soat mili yo‘nalishi bo‘ylab o‘tilganda (3.9) tenglama quyidagicha yoziladi

$$R_1 I_1 - R_3 I_3 - R_2 I_2 = E_1 - E_2\,.$$

Harflar bilan belgilanayotgan qiymatlar, o‘z o‘rnida musbat yoki manfiy bo‘lishi ham mumkin.

KKQ ifodasidagi $\Sigma R\cdot I$ va ΣE yig‘indilar konturning bir qismi uchun ham, ya’ni *a* va *b* nuqtalar orasida uzilish paydo bo‘lganda ham qo‘llanilishi mumkin. Bunday holda tenglamaning chap tomoniga uzilgan nuqtalar orasidagi

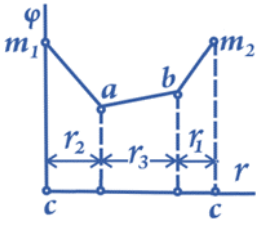
potensiallar farqi kiritiladi

$$\Sigma R \cdot I + U_{ab} = \Sigma E, \qquad (3.10)$$

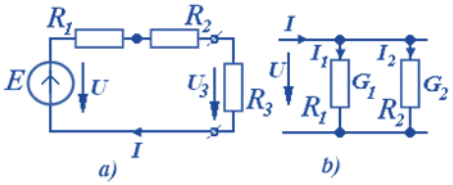
bunda yuqorida ko‘rilgan ishoralash qoidasidaga amal qilinadi.

Keyingi ifodani tashqi kontur (3.4-rasm) uchun qo‘llab, soat mili yo‘nalishi bilan o‘tilganda, *a* nuqtasida o‘tishni uzib *b* nuqtasida o‘tishni davom ettirib, quyidagini aniqlaymiz

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 + U_{AB} = E_1 - E_2.$$



3.5-rasm. **Potensial diagrammasi**



3.6-rasm. **Ketma-ket va parallel ulangan zanjir**

Potensial diagrammasi. Elektr zanjiri shoxobchalari bo‘ylab potensialning o‘zgarishini to‘g‘ri tushunish uchun potensiallar diagrammasidan foydalanish zarur. Potensiallar diagrammasi – shunday grafikki, uning bir (vertikal yoki ordinata) o‘qida potensialning qiymatlari, ikkinchi (gorizontal yoki abssissa) o‘qida – zanjirning tanlangan konturi bo‘ylab o‘tishdagi ketma-ket qarshiliklar qiymatlari qo‘yiladi. 3.4-rasmdagi zanjirning tashqi *c-a-b-c* konturi bo‘ylab o‘tishdagi potensial diagrammasi 3.5-rasmda keltirilgan. U *s* nuqtadan boshlanib, *s* nuqtada tugaydi. Shu nuqta potensiali nol (yoki biror $\varphi \neq 0$ qiymat)ga teng deb ixtiyoriy qabul qilingan. Grafikning boshida va ketida uchrashi mumkin bo‘lgan potensiallar sakrashi ye_1 va ye_2 kuchlanish manbalari ulangan holatiga mos keladi.

3.2. Oddiy elektr zanjirlari uchun om va kirxgof qonunlarini qo‘llash

Kirxgof, Om va Joul-Lens qonunlarini oddiy elektr zanjirlariga qo‘llash hech qanday qiyinchilik uyg‘otmaydi. Ammo ketma-ket va parallel ulanishlardagi, hamda oddiy parallel-ketma-ket ulanishlardagi tok va

potensiallarning taqsim-lanishini to‘g‘ri idrok etishni *alifbe va ko‘paytirish jadvalini bilgandek puxta o‘zlashtirish lozim*.

Ketma-ket ulash. Kuchlanish manbai va ikki qarshilik ketma-ket ulanganda (3.6,*a*-rasm) ularning har biridan bir xil tok oqib o‘tadi

$$I=I=E/(R_1+R_2+R_3). \quad (3.11)$$

Agar birnecha rezistorlar ketma-ket ulangan bo‘lsa ularni bitta ekvivalent qarshilik bilan almashtirish mumkin va, demak, ularning qarshiliklari qo‘shiladi

$$R_E=R_1+R_2+R_3+... \quad (3.12)$$

Ularning har biri orqali oqayotgan tok $I=U/R_E$ bo‘ladi, bunda

$$U=E=R_1I_1+R_2I_2+R_3I_3+...$$

kuchlanishlar yig‘indisi.

Parallel ulash. Xar biri o‘zaro parallel bo‘lgan shoxobchalarda kuchlanish U teng, ya’ni umumiydir (3.6,*b*-rasm). Agar U berilgan bo‘lsa, u xolda xar bir shoxobcha uchun tok qiymatini Om qonuni asosida aniqlanadi

$$I_1=G_1U; \quad I_2=G_2U; \ ... \quad (3.13)$$

bunda $G_k=1/R_k$ - qiymat k - chi shoxobchaning o‘tkazuvchanligi.

KTQga asosan, tarmoqdan kelayotgan umumiy tok I barcha shoxobchalar toklarining yig‘indisiga teng

$$I=I_1+I_2+...=(G_1+G_2+...)U \ .$$

Parallel ulanganda barcha shoxobchalarni ekvivalent o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgan bir shoxobcha bilan almashtirish mumkin

$$G_E=G_1+G_2+.... \quad (3.14)$$

Bunda tok I va kuchlanish U orasidagi bog‘lanish berilgan zanjirdagidek qiymatga ega bo‘ladi

$$I=G_EU \ .$$

Zanjirda ikki parallel shoxobchalar mavjudligi sababli (3.6,*b*-rasm) $U_2=U_3$ bo‘lgani uchun tok quyidagicha aniqlanadi

$$I=I_1+I_2=(G_1+G_2)U=G_E\cdot U=U/R_E, \quad (3.15)$$

bunda

$$R_E = \frac{1}{G_E} = \frac{1}{G_1 + G_2} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \tag{3.16}$$

Demak, parallel ulangan qarshiliklarga ekvivalent R_E bo‘lgan qarshilik (3.16) ifoda yordamida aniqlanadi.

Maksimal quvvatni uzatish sharti. Texnik qurilmalarni loyihalash jarayoni-da, aksariyat, elektr zanjirlardan qabul qiluvchi (yuklama) tomon oqayotgan maksimal quvvatni uzatish shartini hisoblash vazifasi qo‘yiladi. Ushbu quvvatning qiymati qabul qiluvchining qarshiligi hamda ulangan zanjir parametrlariga bog‘liq.

3.6,*a*-rasmda tasvirlangan zanjir uchun ikkinchi rezistor R_2 tomonidan qabul qilinib sarflanayotgan quvvat ushbu rezistorning qarshiligi va undagi tokka bog‘liq, hamda quyidagicha ifodalanadi

$$P_2 = I^2 R_2 = \frac{E^2}{(R_1 + R_2)^2} \cdot R_2. \tag{3.17}$$

Agar R_2=0 (qisqa tutashuv, U_2=0) va $R_2 \to \infty$ bo‘lganda (yuksiz ishlash rejimi, I=0) quvvatning qiymati $P_2 = 0$ bo‘ladi. Agar R_2=R_1, bo‘lsa quvvat maksimal bo‘ladi, ya’ni $P_2 = P_{2\max}$.

Buni oddiy usul bilan keltirib chiqarish mumkin: R_2 ni R_2 bo‘yicha differensialab, uni nolga tenglashtiramiz. Natijada, shu ma’lum bo‘ladiki, qabul qiluvchi qarshilik R_2 ning (istemolchi yoki yuklamaning) maksimal quvvati

$$P_{2\max} = \frac{E^2}{4R_2} \tag{3.18}$$

miqdori *Ye* kuchlanish manbai berayotgan quvvatining

$$P_{manba} = E \cdot I = \frac{E^2}{2R_2} \tag{3.19}$$

yarmiga teng bo‘ladi.

Ushbu shartni bajarish juda ahamiyatlidir. Masalan, radio antennalarida manba (e.y.k. E va R_1 ichki qarshiligi) dan kelayotgan signal juda sust va qabul qiluvchi qarshiligi maksimal quvvatni tortishi zarur degan shart quyilganda, undan foydalaniladi.

Aksincha, ushbu shart katta energiyani uzatish (masalan, shu radiotexnik

qurilmaning elektr ta’minoti) uchun mo‘ljallangan qurilmalarning muntazam ishlagandagi holatiga mutlaqo mos kelmaydi, chunki energiyaning yarmi iste’mol-chiga yetib borsayu, qolgan yarmi yo‘lda energiya isrofiga sarflansa, bu hyech yo‘l qo‘yib bo‘lmaydigan vaziyatdir, chunki uning f.i.k. 50%dan kichik bo‘ladi. Energetik uskunalarda ushbu aniqlangan qarshilik qiymatidan mutlaqo boshqa maqsadda foydalaniladi. Agar liniyada qisqa tutashuv sodir bo‘lsa, liniya o‘chirilishi shart, chunki o‘chirgich kontaktlari orasidagi qarshilik R_2 ning qiymati R_1 ga teng bo‘lsa, shu kontaktlar orasidagi quvvat maksimal bo‘ladi. Bu quvvat o‘ta yuqori qiymatli bo‘ladi, shuning uchun o‘chirish (zanjirni uzish) jarayoni imkon qadar tezkorlik bilan bajarilishi shart.

Aralash (ketma-ket-parallel) ulangan zanjir. Bir manbali zanjirlardagi passiv elementlar ketma-ket va parallel ulanganda yuqorida ko‘rilgandek, element-larni ekvivalent almashtirish qoidalariga binoan hisoblanadi. Misol uchun 3.7,*a*-rasmda keltirilgan zanjirni ko‘raylik. Avval ikki R_2 va R_3 parallel qarshiliklarni ekvivalent R_E qarshilik bilan almashtirib (3.7,*b*-rasm)

$$R_E = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}, \tag{3.20}$$

umumiy tokni

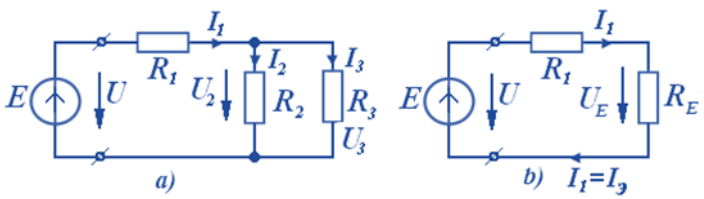
$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_E}, \tag{3.21}$$

va parallel shoxobchalar kuchlanishini aniqlaymiz; $I_E = I_1$ bo‘lgani uchun

$$U_E = U_2 = U_3 = R_E I_1, \tag{3.22}$$

undan so‘ng R_2 va R_3 elementlardagi toklarni aniqlaymiz

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2}; \qquad I_3 = \frac{U_3}{R_3}. \tag{3.23}$$



3.7-rasm. **Aralash (ketma-ket-parallel) ulangan zanjir**

Keyingi ifodalarga (3.22)dan $U_2=U_3$ ni qo‘yib, so‘ngra I_1 va R_E ni (3.21) va (3.20)dan aniqlab, barcha toklar uchun ifodalarni qulay holatga keltirish mumkin

$$I_2=\frac{ER_3}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1};\quad I_3=\frac{ER_2}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1};\quad I_1=\frac{E(R_2+R_3)}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1};\quad (3.24)$$

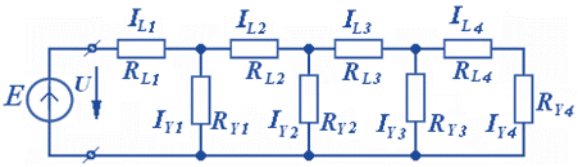
Ushbu umumlashtirilgan ta’rif I_2, I_3 toklarni va ular yig‘indisiga teng bo‘lgan I_1 tokni aniqlash uchun zarurdir. Bu (3.24) ifodalardan toklar orasidagi bog‘lanishlar ham yaqqol ko‘zga tashlanadi

$$I_2=I_1\frac{R_3}{R_2+R_3};\qquad (3.25)$$

$$I_3=I_1\frac{R_2}{R_2+R_3}.\qquad (3.26)$$

(3.24)-(3.26) bog‘lanishlar zanjirlarni hisoblashda ko‘p uchrab turadi.

Murakkab (parallel ketma-ket shoxobchali) zanjir. Murakkab elektr zanjirini ko‘pincha bir qator ketma-ket va parallel ulangan qarshiliklar sifatida tasavvur qilish mumkin. Masalan, qarshiliklari R_{yu1}; R_{yu2}; ... bo‘lgan bir necha yuklamalar, alohida bo‘laklarining qarshiliklari $R_{l,1}$; $R_{l,2}$; ...ga teng bo‘lgan bitta liniyaga ulangan bo‘lsin (3.8-rasm).



3.8-rasm. **Murakkab zanjir**

Ikki o‘tkazgichli liniya ko‘rilayotgan holat uchun bir o‘tkazgichdan oqayotgan barcha tok, ikkinchisidan qaytib keladi, ular har bir ixtiyoriy bo‘lagining qarshiligi (masalan, $R_{l,1}$) to‘g‘ri va teskari o‘tkazgichlar qarshiliklari (aytaylik, $R_{l1}/2$ va $R_{l1}/2$) qo‘shiladi va bir liniyaga ulangan deb hisoblash mumkin. Qarshiliklarning bunday o‘rin almashinuvi natijasida liniyaning bo‘lagidagi kuchlanishlar pasayishi o‘zgarmaydi.

3.8-rasmda keltirilgan sxemani o‘rganish natijasida $R_{Y4}+R_{L4}$ qarshilikli shoxobcha (oxirgi yuklanish R_{Y4} oxirgi liniya R_{L4} bo‘lagi bilan ketma-ket) R_{Y3}

(oxiridan oldingi bo‘lak yuklanishi shoxobchasi) bilan parallel ekanligini ko‘rish mumkin. Ushbu ikki shoxobchalarni bitta ekvivalent qarshilik bilan almashtirish mumkin. Bu qarshilik esa, o‘z navbatida R_{L3} (oxiridan oldingi liniya) qarshiligiga ketma-ket ulangan bo‘ladi. Shu ta’riqa, barcha zanjir qarshiliklarini «yig‘ish» va, natijada murakkab zanjirni soddalashtirilgan (3.6,*a*-rasm) xolatiga keltirish mumkin. Soddalashtirilgan zanjir uchun manba toki I_{L1}ni aniqlash qiyin emas. Bundan so‘ng *birinchi* yuklanishdagi kuchlanishni

$$U_{Y1}=E-R_{L1}\cdot I_{L1} \qquad (3.27)$$

va uning tokini aniqlash mumkin

$$I_{Y1}=U_{Y1}/R_{Y1},$$

so‘ngra *ikkinchi* bo‘lakdagi liniya toki $I_{L2}=I_{L1}-I_{Y1}$ ni aniqlanadi va h.k.

Proporsional qiymatlar usuli. Yuqorida keltirilgan hisoblashni zanjirning (3.8-rasm) oxiridan boshlab, oxirgi yuklanish tokining qiymatini ixtiyoriy (masalan $I'_{y4}=1A$) qabul qilinsa, yechimni keskin yengillashtirish mumkin.

Oxiridan avvalgi yuklanish ulangan qisqichdagi kuchlanishni

$$U'_{Y3}=(R_{Y4}+R_{L4})I'_{Y4}$$

deb hisoblab, uning tokini aniqlaymiz

$$I'_{Y3}=U'_{Y3}/R_{Y3}$$

So‘ngra, undan avvalgi bo‘limdagi tokni

$$I'_{L3}=I'_{Y3}+I'_{Y4}$$

va R_{y2} shoxobchadagi kuchlanishni hisoblaymiz

$$U'_{Y2}=U'_{Y3}+R_{L3}I'_{L3}$$

Shu tariqa hisoblashni davom ettirib, ixtiyoriy tanlangan oxirgi yuklanish toki I'_{Y4} ga mos kelgan zanjir boshlanishidagi $U'=E'$ kuchlanishni aniqlaymiz.

Agar zanjir boshlanishidagi kuchlanish $U=E$ aniqlangan kuchlanishdan η marta katta, ya’ni

$$U/U'=\eta, \qquad (3.28)$$

bo‘lsa, u xolda barcha elementlardagi haqiqiy toklar hisoblangan oraliq toklardan η marta katta bo‘ladi, ya’ni

$$I_{Y4} = \eta I'_{Y4}; \quad I_{Y3} = \eta I'_{Y3} \ldots\ldots \tag{3.29}$$

Kuchlanishlar xam shunga o‘xshash aniqlanadi

$$U_{Y4} = \eta U'_{Y4}; \quad U_{Y3} = \eta U'_{Y3} \ldots\ldots \tag{3.30}$$

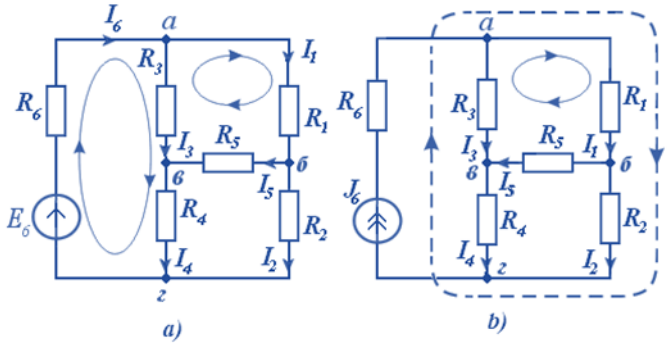
Ushbu hisoblar tok va kuchlanishlar proporsionalligidan kelib chiqadi.

Keltirilgan hisoblash usuli *proporsional qiymatlar usuli yoki o‘xshashlik usuli* deyiladi. Barcha murakkab zanjirlarni parallel yoki ketma-ket shoxobchalar singari tasavvur qilib bo‘lmaydi. Bunday zanjirlarga, masalan, Uiston ko‘prigi (3.9,*a*-rasm) uchun yuqorida keltirilgan usullarni tatbiq etib bo‘lmaydi. Ushbu ko‘prikdagi mavjud oltita shoxobchalarning birortasini ham qolganlariga nisbatan na parallel va na ketma-ket ulangan deb bo‘lmaydi.

3.3. Kirxgof qonunlarini tatbiq etish

Kirxgof qonunlaridan foydalanib, murakkab chiziqli zanjirda, berilgan qiymatlar mavjudligida, shoxobchalar toklari va tugunlar potensiallarini aniqlash imkoniyatini beruvchi tenglamalar tizimini hosil qilish mumkin. Masalan, barcha kuchlanish manbalarining e.yu.k.lari, barcha tok manbalarining toklari va barcha qarshiliklar qiymatlari mavjud bo‘lsa, barcha shoxobchalar (elementlar) toklari va kuchlanishlarini hisoblash mumkin.

Zanjirda tok va potensiallarning qiymatlarini (ularni qanday usulda - hisoblash yoki o‘lchash usullari yordamida aniqlanishidan qatiy nazar) tekshirishda ham Kirxgof qonunlarini qo‘llash muhim ahamiyatlidir; chunki berilgan tenglama-lar tizimining taxmin qilingan yechimini tekshirish, tenglamalar tizimini qayta yechishdan ko‘ra yengilroqdir.



3.9-rasm. **Ko‘p konturli elektr zanjir**

Darhaqiqat, Kirxgof qonunlarining tatbiq etilishi orasida eng muhim o‘rin tutganlari - tenglamalar tizimini yechmasdan turib, chiziqli elektr zanjirining ba’zi umumiy xususiyatlarini aniqlash imkonini beruvchi, «prinsiplar» deb ataluvchi (masalan, superpozisiya prinsipi, o‘zarolik prinsipi) usullardir.

Kirxgof tenglamalari tizimi. Berilgan zanjir shoxobchalari soni “*Sh*” ga teng bo‘lsin; bu songa tok manbai *J* ga ega bo‘lgan shoxobchalar kirmaydi; ushbu *J* tok va kuchlanish *Ye* qiymatlari berilgan bo‘lsin. Shoxobchalarning chegarasi bo‘lgan tugunlar soni *T* ga teng bo‘lsin.

U xolda KTQ (3.1) ga asosan mustaqil tenglamalar soni

$$K_1=T-1 \qquad (3.31)$$

tugunlar sonidan 1 ga kichik bo‘ladi.

KKQ (3.3)ga asosan, yana K_2 ta mustaqil tenglamalar qurish mumkin

$$K_2=SH-K_1=SH+1-T \qquad (3.32)$$

Bu tenglamalar berk konturlar uchun tuziladi. Kontur tenglamalarining o‘zaro mustaqilligi ayondir, chunki xar bir kontur tarkibida xech bo‘lmaganda bitta shoxobcha boshqa konturlar tarkibiga kirmaydi (bu zaruriy bo‘lmagan, biroq yetarli bo‘lgan shartdir).

Mustaqil tenglamalar to‘la soni shoxobchalar soniga teng

$$Sh=K_1+K_2 \qquad (3.33)$$

Oxirgi tenglik (3.31) va (3.32) dan kelib chiqadi, chunki ixtiyoriy K_1 tugun tenglamalari ixtiyoriy K_2 kontur tenglamalari soniga bog‘liq emas; darhaqiqat, kontur tenglamalari tarkibiga kiritish shart bo‘lgan shoxobchalar qarshiliklari tugun tenglamalari tarkibiga kirmaydi.

Shunday qilib, agar barcha shoxobchalar qarshiliklari, hamda manbalarning toklari va kuchlanishlari berilgan bo‘lsa, u xolda tenglamalar tizimidan barcha *SH* ta shoxobchalarning *SH* dona noma’lum toklarini aniqlash mumkin. *SH* songa tok manbai bo‘lgan shoxobchalar kirmasligi alohida takidlanadi.

Agar u yoki bu e.y.k. (yoki qarshiliklar) noma’lum bo‘lganda ham tenglama-lar tizimining yechimini aniqlash mumkin. Ammo, bunday holatda

tenglamadagi boshqa qiymatlar (masalan, ayrim shoxobchalar toki) ma’lum bo‘lishi shart, chunki noma’lumlar umumiy soni shoxobchalar (tenglamalar) soni *Sh* dan ortmasligi shart.

Misol. 3.9,*a*-rasmda to‘rtta tugunli (T=4) va oltita shoxobchali (SH=6) barqarorlashgan rejimdagi zanjir keltirilgan. Kirxgofning tenglamalari tizimini yozing.

Yechish. Ushbu zanjir uchun KTQga asosan $K_1=T-1=3$ ta tugun tenglamalarini tuzish mumkin: $-I_6+I_1+I_3=0$ (*a*- tugun uchun), $-I_1+I_5+I_2=0$ (*b*-tugun uchun), $-I_3-I_5+I_4=0$ (*v*-tugun uchun). Zanjir barqarorlashgan rejimda bo‘lgani uchun toklarni katta harf bilan belgilaymiz $i=I$.

To‘rtinchi (*g*) tugun uchun tenglama avvalgi uchchala tenglamalar natijasi ekanligiga ishonch hosil qilish mumkin.

KKQ asosida $K_2=SH+1-T=3$ mustaqil kontur tenglamalarini tuzish lozim. Masalan, 3.9,*a*-rasmdagi konturlar uchun

$$R_6I_6 + R_1I_1 + R_2I_2 = E_6\,,$$

$$R_6I_6 + R_3I_3 + R_4I_4 = E_6\,,$$

$$R_1I_1 + R_5I_5 - R_3I_3 = 0\,.$$

Misol. J_6 tok qiymati ma’lum bo‘lgan (3.9,*b*-rasm) tok manbali zanjir uchun tenglamalar tizimini yozing.

Yechish. Zanjirda beshta noma’lum toklar va beshta shoxobchalar (tok manbaining shoxobchasi hisobga olinmaydi) mavjud.

Demak, uchta *tugun tenglamalari* (tugunlar soni to‘rtga teng) va ikkita *kontur tenglamalari*ni tuzish mumkin

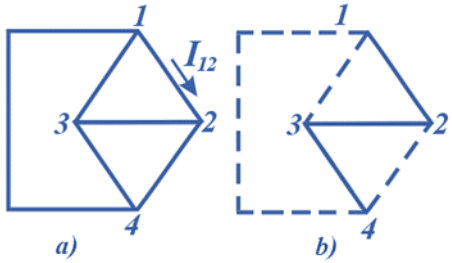
$$I_1 + I_3 = J \quad (a\text{- tugun uchun});$$

$$-I_1 + I_5 + I_2 = 0 \quad (b\text{- tugun uchun});$$

$$-I_3 - I_5 + I_4 = 0 \quad (v\text{- tugun uchun});$$

$$R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_4 I_4 - R_3 I_3 = 0;$$

$$R_1 I_1 + R_5 I_5 - R_3 I_3 = 0.$$



3.10-rasm. **Tok manbai bo‘lmagan zanjir**

3.4. Kirxgof qonunlari asosida tuzilgan tenglamalar to‘liqligi

Mustaqil tugun tenglamalari soni. Avval tok manbai bo‘lmagan zanjirni ko‘raylik. Zanjirda (3.10, *a*-rasm) to‘rt tugun bo‘lib, ularning xar biri qolgan tugunlar bilan birgina shoxobcha orqali ulangan bo‘lsin.

Ushbu tugunlar uchun tenglamalar quyidagicha bo‘ladi

$$I_{12} + I_{13} + I_{14} = 0;\ I_{21} + I_{23} + I_{24} = 0;$$

$$I_{31} + I_{32} + I_{34} = 0;\ \ I_{41} + I_{42} + I_{43} = 0,$$

bunda I_{mn} - *m* va *n* tugunlarni bog‘lovchi shoxobchaning *m* tugundan *n* tugunga yo‘nalgan toki (masalan, shu sxemada I_{12} tok yo‘nalishi keltirilgan).

Birinchi uch tenglamalar yig‘indisini hisoblasak (bunda $I_{21}+I_{12}=0$; $I_{13}+I_{31}=0$) shu ma’lum bo‘ladiki, hosil bo‘lgan yig‘indi $I_{14}+I_{24}+I_{34}=0$ tarkibida faqat to‘rtinchi tugunga kelayotgan toklar bo‘lar ekan. Bu yig‘indi to‘rtinchi tugun tenglamasidan faqatgina barcha hadlarning ishorasi bilan farq-lanadi, demak, *oxirgi tugun uchun yozilgan tenglama undan oldingilarning natijasi ekan*.

Birinchi uchta tenglamalarning mustaqil ekanligi aniq, chunki ularning xar birida, hech bo‘lmaganda, bitta yangi tok mavjud: *m* tugun uchun - bu *m* tugunni keyingi tugun (masalan 4-tugun) bilan bog‘lovchi I_{m4} tokidir.

Agar, ikki tugun, masalan 1 va 2 tugunlar orasida birnecha I'_{12}, I''_{12}, ... tokli parallel shoxobchalar mavjud bo‘lsa, u holda birinchi tenglama tarkibida $I'_{12}+I''_{12}+\ldots$, ikkinchisida $I'_{21}+I''_{21}+\ldots$, toklar qatnashgan bo‘lar edi; yuqoridagi isbotlashning tartibida hech o‘zgarish bo‘lmas edi, chunki $I'_{12}+I'_{21}=0$; $I'_{12}+I''_{21}=0$; … .

Ushbu mulohazani ixtiyoriy sonli tugunga ega bo‘lgan zanjirlar uchun

tatbiq etish ham mumkin. Bunda, doimo mustaqil tenglamalar soni tugunlarning *T* sonidan bittaga kichik bo‘ladi. Shunday qilib (3.12) ifodaning to‘g‘ri ekanligi isbotlangan bo‘ladi.

Mustaqil kontur tenglamalari soni. *T* tugunlari mavjud bo‘lgan xar qanday zanjirda shunday shoxobchalarni ajratib ko‘rsatish mumkin bo‘lsinki, bu shoxob-chalar birorta berk kontur hosil qilmasdan barcha tugunlarni o‘zaro birlashtirsin. Buni quyidagicha bajaramiz: ikki tugunni bir shoxobcha bilan birlashtiraylik va tugunlarni 1 va 2 bilan belgilaylik; so‘ngra, 2-tugunni yangi tugun bilan bog‘laylik, uni 3 bilan belgilaylik, va h.k. Shu tariqa oxirgi tugun $n=T$ gacha olib boraylik. Bunday bog‘lanish 3.10,*b*-rasmdagi sxemada ilgari keltirilgan to‘rt tugunli zanjir uchun keltirilgan. Oxirgi tugunni 1-tugun bilan birlashtirib bo‘lmaydi, chunki unda berk kontur hosil bo‘ladi.

Agar har bir tugun boshqa barcha tugunlar bilan shoxobchalar orqali ulansa, tugunlar oldindan ixtiyoriy ravishda raqamlanib, so‘ngra tugunlar ketma-ket ulanishi mumkin (1 va 2, 2 va 3, ...,T-1 va T).

Aniqki, bunday ulanishda shoxobchalar soni tugunlar sonidan albatta bittaga kam bo‘ladi, ya’ni barcha shoxobchalar ketma-ket ulangan, zanjir berk bo‘lmaydi. Biroq, ixtiyoriy bir juft tugunlarga yangi shoxobchalar ulansa, kontur hosil bo‘ladi, chunki shartga ko‘ra barcha tugunlar qandaydir shoxobcha bilan ulangandir.

Kontur hosil qilmasdan shu yo‘sinda kiritish mumkin bo‘lgan shoxobchalar-*daraxt shoxobchalari* deyiladi, ular hosil qilgan struktura *daraxt* deb ataladi.

Ta’rifga ko‘ra, daraxtga kiritilgan xar qanday shoxobcha konturni hosil qiladi (aks xolda, bunday shoxobcha daraxt shoxobchalari qatoriga kirar edi). Ana shunday berk kontur hosil qiluvchi shoxobchalar *vatarlar* (yoki *ko‘priklar*) deb ataladi. Vatarlar 3.10,*b*-rasmda punktir chiziqlar bilan ko‘rsatilgan.

Daraxtga bitta vatarni qo‘shib, ilgari qurilgan boshqa bir shoxobchani tashlab yuborib, hosil bo‘lgan berk konturni uzish mumkin. Bunda yangi daraxt, ya’ni berk kontursiz zanjir paydo bo‘ladi. Biroq, ixtiyoriy yangi daraxtning

shoxobchalari soni o‘zgarishsiz qoladi, chunki xar gal yangi bir vatar qo‘shilganda, aynan bitta boshqa shoxobchani tashlab yuborish lozim.

Shoxobcha-vatarlar soni *X*, shoxobchalar soni *Sh* bilan daraxtga kiruvchi shoxobchalar (*T*-1) ayirmasiga teng:

$$X=SH-(T-1).$$

Har qanday shoxobcha-vatar kiritilishidan hosil bo‘lgan kontur uchun, KKQga asosan tenglama tuzish mumkin. Bunda, xar bir shunga o‘xshash tenglama boshqalaridan mustaqildir, chunki ularning xar biriga yangi noma’lum berk kontur xosil qiluvchi yangi shoxobcha toki kiradi.

Demak, mustaqil kontur tenglamalari soni vatarlar soniga, ya’ni (3.3)ga binoan *Sh*-(*T-1*)ga teng. Shuni isbot qilish zarur edi.

Kirxgof tenglamalari tuzilgan kontur, boshqa oddiy konturlardan farqlanishi mumkin, chunki ularning xar birida faqat bittadan vatarlar mavjud. Bu fikrning ayonligi quyidagi mulohazadan ko‘rinadi: ikki mustaqil tenglamalarni o‘zaro qo‘shib, yangi tenglama hosil qilamiz. Bu, o‘z navbatida, qolgan ikki asosiy tenglamalardan birinchisi yoki ikkinchisi bilan xamkorlikda ikki mustaqil tenglamalarni hosil qiladi. Mustaqil tenglamalarning umumiy soni o‘zgarmasdan qoladi.

Eslatma. Tarqoq bo‘lmagan zanjirni chegaralovchi ikki tugunlari bitta tugunga qo‘shiluvchi (*T*=1) bir shoxobchali (*SH*=1) zanjir deb qarash mumkin. Bunday zanjirlar uchun ham $K_1=T-1=0$ va $K_2=SH-(T-1)=1$ ifodalashni qo‘llash mumkin. Darhaqiqat, bunday zanjir uchun faqat bitta kontur tenglamasini tuzish mumkin. Ushbu fikrlar tugunning shoxobcha chegarasi ekanligi haqidagi ta’rifga to‘la mos keladi.

Barcha tugun tenglamalarining xar bir kontur tenglamalariga bog‘lik bo‘lmasligi (ulardan mustaqilligi) ayondir, chunki kontur tenglamalari tarkibida shoxobchalar qarshiliklari va e.yu.k.lari mavjud bo‘lib, tugun tenglamalarida ular qatnashmaydi. Demak, tugun tenglamalarining har qanday chiziqli kombinasiyasi-dan kontur tenglamalarini hosil qilib bo‘lmaydi. Bu esa, *zanjirning to‘la mustaqil tenglamalari soni shoxobchalar soniga teng* ekanligini

isbotlaydi. Demak agar qolgan barcha parametrlar berilgan bo‘lsa, aniqlangan tenglamalar tizimi barcha toklarni aniqlash uchun yetarlidir; ushbu holat tenglamalar tizimining to‘liqligini ta’kidlaydi.

Yuqorida keltirilgan mustaqil tenglamalar soni haqidagi barcha mulohazalar, tok manbai bor bo‘lganda ham o‘z kuchiga ega, chunki tok manbai ekvivalent kuchlanish manbai bilan almashtirilishi mumkin. Biroq, tugun tenglamalarining o‘ng tomonida KTQi ta’rifidagidek tok manbalarining toklari qatnashayapti deb hisoblab, yuqoridagi mulohazalarni davom ettirish mumkin.

3.5. Superpozisiya (ustlash yoki jamlash) prinsipi

Ushbu prinsip chiziqli zanjirlar uchun qo‘llanganda shunday ta’riflanadi: zanjirning ixtiyoriy elementidagi tokning miqdori, har bir manbaning alohida ta’siri natijasida (bir manba ta’siri ko‘rilayotganda qolgalarini yo‘q deb hisoblab) ushbu shoxobchada hosil qilgan toklarining algebraik yig‘indisiga teng. Keltirilgan ta’rifdan shuni ko‘rish mumkinki, ko‘rilayotgan prinsipni mustaqil amal qiluvchi prinsip deb atash mumkin.

EYuK manbalaridan faqat bittasining ta’sirini etayotganda, barcha boshqa manbalarning e.yu.k.lari va tok manbalarining toklari nolga teng deb faraz qilinadi. Kuchlanish manbalarining qisqichlarida kuchlanishning yo‘qligi ular klemmalari qisqa tutashganligiga mos keladi; tok manbalari bo‘lgan shoxobchalarda tokning yo‘qligi (taxmini) ushbu shoxobcha uzilgan deb fraz qilingandan darak beradi.

Agar manba ichki qarshilik va e.yu.k. ega bo‘lsa, u holda e.yu.k. nolga teng deb faraz qilib, uning shoxobchasida ichki qarshilikni qoldirish zarur. Shunga o‘xshash, tok manbai va unga ulangan parallel ichki manba qarshiligi bo‘lgan shoxobcha sifatida berilgan bo‘lsa, tok manbai shoxobchasini uzib (ya’ni, J=0 deb hisoblab), ichki qarshilikli parallel shoxobchani qoldirish zarur.

Superpozisiya prinsipiga asosan ikki (yoki bir necha) rejim uchun hisobni olib borish mumkin; bunda bir marta parametrlari $E_1'; E_2'; J_1'$,.. bo‘lgan;

manbalar ta’sir etadi; ikkinchi marta esa $E_1'';E_2'';...;J_1'';J_2''...$ parametrli manbalar ta’sir etadi.

Agar I_1' va I_1''; I_2' va I_2''; …. - toklar shu ikki rejimning toklari bo‘lsa, u holda haqiqiy rejimning toklarini aniqlash uchun ushbu ikki rejim toklarini

$$I_1'+I_1''=I_1;\ I_2'+I_2''=I_2;\ldots \tag{3.34}$$

ustlash yordamida aniqlash mumkin (agar quyidagilarni qabul qilish mumkin bo‘lsa):

$$E_1'+E_1''=E_1;\quad J_1'+J_1''=J_1. \tag{3.35}$$

Bunda shtrixsiz qiymatlar manbalarning xaqiqiy parametrlariga mos keladi.

Hisoblash va tahlil qilishning qulayligiga erishish uchun har xil rejimlarda zanjirning ixtiyoriy qismiga, aslida mavjud bo‘lmagan, shartli (soxta) manbalarni kiritish mumkin, bunda, faqat ustlash natijasida shartli manbalarning *EYuK* yig‘indisi va toklar yig‘indisi nolga teng bo‘lishi zarur.

Umumiy holda superpozisiya usulini quvvatlar uchun tatbiq etib bo‘lmaydi

$$P_1 \neq P_1'+P_1'',... \tag{3.36}$$

chunki quvvatlar toklarning kvadratik (nochiziqli) funksiyalaridir.

Avval proporsional qiymatlar usuli ko‘rilgan edi. Superpozisiya usuli bilan birgalikda ushbu usul murakkab zanjirlar uchun qo‘llanilishi mumkin. Zanjirda yagona manba bo‘lsa, hech bo‘lmaganda bitta tugunga uchtadan ko‘p bo‘lmagan shoxobcha ulangan, hamda ikkitagina shoxobcha berilib, ular yordamida barcha tugunlar potensiallarini va barcha shoxobchalar tokini aniqlash mumkin bo‘lgan holatlarda ushbu usulni qo‘llash qulaylikka olib keladi. Bu talablarni, masalan, 3.11-rasmdagi zanjir J=0 bo‘lganda qoniqtiradi. Avval, *ikki* shoxobcha toklarini *ixtiyoriy tanlab* (masalan, 3.11-rasm da R_2 va R_6 shohobchalar toklarini), 2-tugunning uchinchi tokini oson aniqlash, so‘ngra Om qonuniga binoan boshqa ixtiyoriy shoxobcha (masalan 3.11-rasmdagi R_4 va h.k.) uchun potensiallar farqini hisoblash mumkin.

Barcha hisoblashlarni bajarish juda oson, biroq ular tezda bir-biriga zid natijalarga olib kelishi ham mumkin. Kirxgofning qonunlariga zidlikni (shartli) kuchlanish manbai E'_{sh} (yoki shartli J'_{sh} tok manbai)ni kiritib bartaraf etish mumkin. Bunda, hisoblash natijasida barcha izlanayotgan toklar va EYuK lar aniqlanadi.

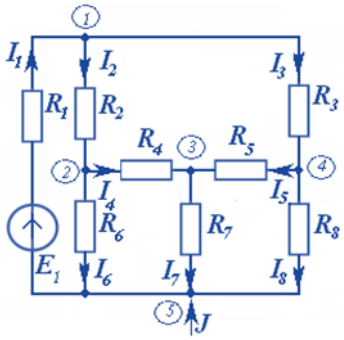
Natijada *m*-shoxobchadagi tokni aniqlash mumkin

$$I'_m = y_{m1}E'_1 + y_{msh}E'_{sh}, \qquad (3.37)$$

bunda «1» indeks bilan haqiqatdan ham manbai bo‘lgan shoxobcha qiymatlari va «Sh» bilan Kirxgof qonunlariga zidlikni bartaraf etish uchun kiritilgan «shartli» manba qiymatlari belgilangan.

So‘ngra, qayta hisoblash bajariladi, bunda mazkur shoxobchalarning ixtiyoriy tanlangan toklariga yangi qiymatlar beriladi. Natijada manbalarning yangi qiymatlari bilan yangi rejim toklari aniqlanadi:

$$I''_m = y_{m1}E''_1 + y_{msh}\cdot E''_{sh}. \qquad (3.38)$$



3.11-rasm. **Besh tugunli elektr zanjir**

Tokning ikki qiymatlaridan birini, aytaylik ikkinchisini, *b* koeffisiyentiga ko‘paytirib va ularni qo‘shib, qyyidagini hosil qilamiz

$$I'_m + bI''_m = I_m = y_{m1}(E'_1 + bE''_1) + y_{msh}(E'_{sh} + E''_{sh}) \qquad (3.39)$$

Shunga e’tiborni qaratish zarurki, barcha tengliklarda y_{m1} va y_{mSh} koeffisiyentlar qiymatlari noma’lum bo‘lsa xam ular bir xildir.

Agar ko‘paytuvchi *b* ning qiymati shunday tanlangan bo‘lsaki, unda

$$E'_{sh} + bE''_{sh} = 0, \qquad (3.40)$$

ya’ni $b = -E_1' / E_{sh}''$ bo‘lsa, undan avvalgi tenglama

$$I_m = y_{m1}(E_1' + bE_1'') \qquad (3.41)$$

shaklga keladi.

Keyingi tenglikdan y_{m1}ni aniqlaymiz, so‘ngra m shoxobchaning berilgan E_1 EYuK li yagonona kuchlanish manbai bo‘lgandagi izlanayotgan tokini aniqlaymiz

$$I_m = y_{m1} \cdot E_1 . \qquad (3.42)$$

Ushbu hisoblash usulini o‘rganish, yuzaki qaraganda, biroz mushkul bo‘lib ko‘rinsa ham, u aslida juda ham oson va raqamli natijalarni tezkorlik bilan olish imkonini berishiga etibor qaratishni zarur deb hisoblaymiz.

3.6. Kompensasiya usuli

Elektr zanjirlarida I_v *tokli va* R_v *qarshilikli shoxobcha* (yoki shoxobchaning bir qismi)ni (3.12,*a*-rasm) elektr yurituvchi kuchi E_v ga teng bo‘lgan va qarama-qarshi yo‘nalgan kuchlanish manbai bilan almashtirish mumkin

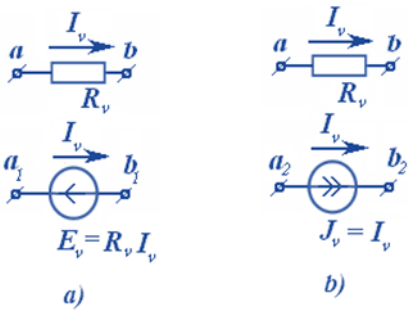
$$E_v = R_v \cdot I_v . \qquad (3.43)$$

Bunday almashtirish natijasida zanjirdagi toklarning taqsimlanishi avvalgi-dek qoladi, chunki ajratilgan R_v shoxobcha zanjirning boshqa qismlariga ta’siri, faqat uning uchlaridagi potensiallar farqi bilan aniqlanadi

$$U_{ab} = R_v \cdot I_v = E_v . \qquad (3.44)$$

Keltirilgan almashtirish KKQ (3.9,*a*) tenglamadagi R_vI_v hadni o‘ng tomonga o‘tkazishga mos keladi

$$\Sigma RI = \Sigma E - E_v . \qquad (3.45)$$



3.12-rasm. **Manbani almashtirish usuli**

Bu tenglamaning chap tomonida, ya’ni *RI* ko‘paytmalar yig‘indisida endi R_v qarshiligi qatnashmaydi. Bunday almashtirishda zanjirning qolgan qismining barcha parametrlari o‘zgarmaydi, shuningdek, tugun tenglamalarining yozilishi ham o‘zgarmaydi.

Aksincha, toklarga nisbatan yechilgan tenglamalar (3.5) tizimida bajarilgan almashtirish sababli barcha y_{ml} va h_{mk} koeffisiyentlar ham o‘zgarishi mumkin, chunki endi ular R_v qarshilik nolga teng bo‘lgan xolat uchun aniqlanadilar: by qarshilik (3.45) tenglamalarning chap tomonida qatnashmaydi, balki *EYuK* ning qiymatida yashirin xolatda ishtirok etadi.

Har qanday elektr zanjirida I_v *tokli shoxobchani tok manbai bilan almash-tirish mumkin* (3.12,*b*-rasm)

$$J_v = I_v \tag{3.46}$$

Kirxgof tenglamalar tizimidan ko‘rinadiki, bunday almashtirishda toklar zanjirning barcha qismida taqsimlanishi ilgarigidek qoladi.

Darhaqiqat, tugun tenglamalari o‘zlarining avvalgi ko‘rinishlarini saqlab qoladilar, faqatgina *v* - shoxobcha bilan bog‘langan tugunlar uchun I_v qo‘shiluvchiga (hadga) berilgan tok manbai J_v sifatida qaraladi. Kontur tenglamalari endi boshqacha tuziladi. Ular tarkibiga endi *v* - shoxobcha (va demak R_v qarshilik ham) kirmaydi. Ularni tuzishda *v* - shoxobcha uzilgan deb faraz qilinadi. Biroq kontur tenglamalari soni tugun tenglamalari bilan birgalikda tenglamalar tizimini hosil qilib, barcha boshqa shoxobchalardagi toklar qiymat-larini aniq yechish uchun yetarli bo‘ladi.

Elektr zanjirining ixtiyoriy shoxobchasini kuchlanish manbai yoki tok manbai bilan almashtirishni *kompensasiya prinsipi* deyiladi. Shuni e’tiborga olish zarurki, zanjirning bir qismini tok yoki kuchlanish manbalari bilan almashtiril-ganda, bunday manbaning toki yoki *EYuK* qiymatlari zanjirning rejimiga bog‘liq bo‘ladi.

3.7. Chiziqlilik prinsipi

Agar elektr zanjirida faqat yagona *v*-shoxobchasidagi *EYuK* dan tashqari barcha manbalar kuchlanishlari, toklari va shoxobchalar qarshiliklari o‘zgarmas bo‘lsa, u holda superpozisiya prinsipi asosida (barcha o‘zgarmas manbalar ta’sirida) tokning qiymati o‘zgarmas qiymatlar va o‘zgaruvchi E_v ga proporsional bo‘lgan xadning yig‘indisi sifatida ifodalanadi

$$\left.\begin{aligned} I_1 &= a_1 + y_{1v} E_v; \\ I_2 &= a_2 + y_{2v} E_v; \\ &\cdots\cdots \\ I_v &= a_v + y_{v\,v} E_v\ , \end{aligned}\right\} \qquad (3.47)$$

bunda a_m, y_{mv} o‘zgarmas qiymatlardir.

Tenglama (3.47)da o‘zgaruvchi E_v dan ozod bo‘lib, quyidagini hosil qilamiz

$$\left.\begin{aligned} I_1 &= a_{1v} + b_{1v} I_v; \\ I_2 &= a_{2v} + b_{2v} I_v, \end{aligned}\right\} \qquad (3.48)$$

hamda

$$I_1 = a_{12} + b_{12} I_2, \qquad (3.49)$$

bunda I_2 - barcha parametrlari o‘zgarmas bo‘lgan ixtiyoriy shoxobchadagi tok.

Qarshilik R_v ning xar qanday o‘zgarishlarini ekvivalent E_v *EYuK* bilan almashtirish mumkinligidan foydalanuvchi kompensasiya prinsipini nazarda tutib, keyingi tenglamalarning yanada umumiyroq ta’rifini berish mumkin; ular (tenglamalar) shuni ko‘rsatadilarki, agar toklar o‘zgarishi faqat bitta shoxobcha *v* -parametrlarning (qarshilik yoki *EYuK*) o‘zgarishiga (yoki faqat bitta manba toki J_v ning o‘zgarishiga) bog‘liq bo‘lsa, u holda barcha toklarning o‘zgarishi o‘zaro oddiy chiziqli tenglamalar bilan ifodalanishini ko‘rsatadi. Buni aksariyat, *chizililik prinsipi* deyiladi.

(3.48) tenglamalar har qanday kuchlanishlar uchun

$$U_p = l + mI_v \qquad (3.50)$$

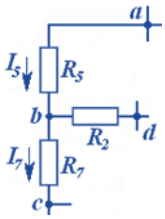
ham chiziqlilik prinsipini ta’riflashga imkon beradi.

Darhaqiqat, ixtiyoriy tugunlarni, masalan 3.13-rasmdagi *a* va *c* tugunlarini

birlashtiruvchi shoxobchalarni tahlil qilganimizda, kuchlanishning

$$U_p=\varphi_a-\varphi_c=R_5I_5+R_7I_7 \qquad (3.51)$$

ga teng ekanligini ko‘ramiz. Biroq, zanjirdagi har bir toklarni (shu jumladan I_5 va I_7 larni ham) (3.48) tenglama bilan ifodalash mumkin; unda R_5 va R_7 lar o‘zgarmas bo‘lganda (3.51) tenglama hosil bo‘ladi.



3.13-rasm. **Elektr zanjirini bir qismi**

Ikki kuchlanishni (masalan U_1 va U_m larni) shunga o‘xshash tenglamalar bilan ifodalab, ikkalasida ham I_v dan halos bo‘lib, shu ikki kuchlanish orasidagi bog‘lanishni aniqlash mumkin

$$U_1=s+t\,U_m, \qquad (3.52)$$

va u ham chiziqli bog‘lanishda bo‘lishini ko‘ramiz.

Shunga o‘xshash tarzda, bir shoxobcha toki I_n bilan ixtiyoriy tanlangan U_m kuchlanish orasidagi chiziqli bog‘lanishni ham aniqlash mumkin

$$I_n=f+k\,U_m\,. \qquad (3.53)$$

Chiziqlilik prinsipi elektr zanjirlarini tahlil qilish va hisoblashda katta ahamiyatga ega.

Chiziqli bog‘lanishli tenglamalarning barcha koeffisiyentlari hisoblash yoki tajriba usullari yordamida aniqlanishi mumkin. Buning uchun zanjirning ikki rejimi uchun mazkur (I yoki U) qiymatlarni mavjud bo‘lishi kifoyadir. Aksariyat, yuksiz ishlash ($I_0=0$) va qisqa tutashuv ($U_{Qt}=0$) rejimlari ancha qulay bo‘ladi. Bu ikki rejim uchun $I_n=I_0$ toki va $U=U_{Qt}$ kuchlanishini «*Yuksiz*» yoki «0» va «*Qt*» indekslari bilan belgilashni qabul qilamiz.

Ikki *v* va *w* shoxobchalarning parametrlari variasiyalanganda (o‘zgartirilib turilganda) murakkabroq tenglamalarni hosil qilish mumkin, ammo bunday holat uchun ham masalani quyidagicha yozish bilan chiziqlilik prinsipini tatbiq etish mumkin:

$$I_n = a + bI_v + cI_w \ . \qquad (3.54)$$

Oldingi mavzularda uzatish koeffisiyentlari va xususan, uzatish o‘tkazuvchanliklari haqida fikr yuritilgan edi. (3.52)-(3.55) ifodalardagi barcha tok va kuchlanish koeffisiyentlari ham xar turdagi uzatish koeffisiyentlaridir, masalan

$$b_{12} = \partial I_1 / \partial I_2; \qquad m = \partial U_p / \partial I_v \ . \qquad (3.55)$$

Yuqorida keltirilgan barcha tenglamalardan foydalanishda musbat yo‘nalish tanlashga qat’iy e’tiborni kuchaytirish zarur, (3.57) tenglamada esa $\partial Z / \partial X$ hosila va ta’rifga ko‘ra, Z qiymati ortishining X ortishiga nisbati, ekanligini ko‘zda tutish zarur. Chiziqli bog‘lanishli ifodalar yordamida tok va kuchlanishlarni chekli ortishlarini ham aniqlash mumkin, masalan (3.53) va (3.54) bo‘yicha

$$\delta U_p = \frac{\partial U_p}{\partial I_v} \delta I_v; \qquad \delta U_m = \frac{\partial U_m}{\partial I_\ell} \cdot \delta U_\ell \qquad (3.56)$$

yoki (3.14) kabi belgilashda

$$\delta U_p = R_{pv} \delta I_v; \ \delta U_m = d_{ml} \cdot \delta U_\ell \qquad (3.57)$$

(3.55) va (3.52) bo‘yicha esa

$$\delta I_n = k \delta U_m; \quad \delta I_n = b_{ak} \delta I_k; \qquad (3.58)$$

yoki (3.10) va (3.11) kabi belgilashda

$$\delta I_n = y_{nl} \delta U_l; \qquad \delta I_n = h_{nk} \delta I_k; \qquad (3.59)$$

(3.56) ifodada keltirilganidek, murakkabroq vaziyatda:

$$\delta I_n = \frac{\partial I_n}{\partial I_v} \cdot \delta I_v + \frac{\partial I_n}{\partial I_w} \delta I_w . \qquad (3.60)$$

3.8. Ekvivalent generator usuli

Yuqorida ko‘rilgan (3.52) va (3.54) chiziqli bog‘lanishdagi tenglamalar, aynan qarshiligi o‘zgarayotgan shoxobchaning toki I va kuchlanishi U ko‘rilayot-ganda ham qo‘llanilishi mumkin

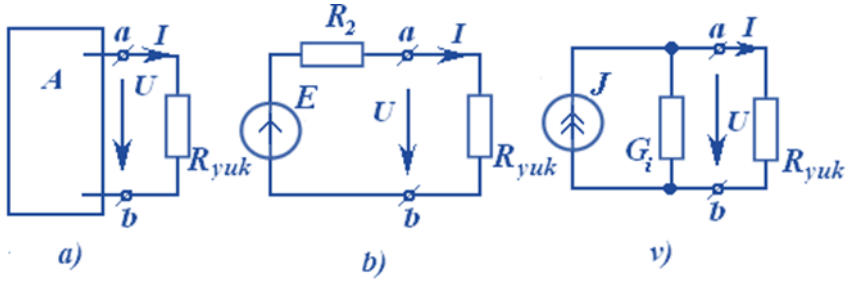
$$U = C + BI \qquad \text{yoki} \qquad I = K + NU \qquad (3.61)$$

Shunday $R_v = R_n$ qarshiligi bo‘lgan shoxobcha 3.14,*a*-rasmda keltirilgan; sxemaning barcha o‘zgarmas parametrlari va manbalari bo‘lgan boshqa shoxob-

chalari *A* to‘g‘ri to‘rtburchak ichida joylashtirilgan.

Ayonki, (3.61) tenglamalar chiziqli aktiv *A* ikkiqutblikning tashqi tavsifini ifodalaydi. Ular oldin batafsil o‘rganilgan va 3.10,*b* va *v*-rasmlarda keltirilgan oddiy chiziqli manbaning tavsifidan (generator) farq qilmaydi (bunda $R_i=1/G_i$ ichki qarshilik).

Agar chiziqli tavsiflar (3.40)ning *S* va *V* (yoki *K* va *N*) parametrlari berilgan bo‘lsa, ularga aynan o‘xshash bo‘lgan tavsifga ega bo‘lgan soddalashtirilgan manba (generator) parametrlari ($R_i=1/G_i$ va *Ye* yoki *I*)ni aniqlash og‘ir ish emas



3.14-rasm. **Aktiv ikki qutblikka keltirish**

$$R_i=-B=-1/N; \quad E=U_{yk}=C; \quad J=I_{qt}=K. \tag{3.62}$$

Bunday manba (generator) ko‘rilayotgan zanjirning aktiv ikki qutblik deb qaralayotgan bo‘lagi uchun ekvivalentdir va demak, yuklama toki I_{yk} ning tashqi shoxobcha qarshiligi R_{yk} ga bog‘liqligi oddiy ifodalanadi (3.14,*b*-rasm)

$$I=U_0/(R_{yk}+R_i) \tag{3.63}$$

2.14,*v*-rasmda keltirilgan zanjirning chiqish klemmalaridagi kuchlanish tashqi shoxobcha o‘tkazuvchanligiga bog‘liqligi ham shunga o‘xshash ifodalanadi

$$U=I_{qt}/(G_{yk}+G_i) \tag{3.64}$$

Tenglik (3.63)da $R_{yk}=0$ (qisqa tutashuv) deb faraz qilib, qisqa tutashuv tokining qiymatini aniqlaymiz

$$I_{qt}= U_{qt}/R_{yk} \tag{3.65}$$

Shuningdek, (3.64)da $G_{yu}=0$ deb hisoblab, yuksiz ishlash kuchlanishini aniqlaymiz

$$U_0=I_{qt}/G_i\ . \tag{3.66}$$

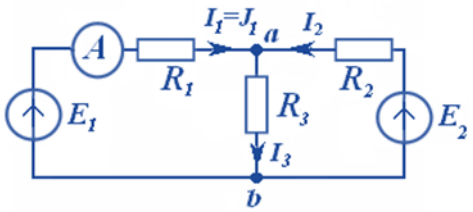
Ushbu tenglamalarning xar biri quyidagiga olib keladi

$$R_i = 1/G_i = U_0/I_{qt}. \qquad (3.67)$$

O‘zgarmas parametrli murakkab zanjirlarni aktiv ikkiqutblik shakliga keltirish, aksariyat, zanjirning analitik hisoblashlarini soddalashtiradi (ekvivalent generator usuli). Bundan tashqari, chiziqli ikkiqutbliklarning tashqi tavsiflarini to‘laligicha aniqlaydigan parametrlar tajriba yordamida aniqlanishlari mumkin (bu esa juda muhim xususiyat); yukning qandaydir ikki rejimlari uchun U', I' va U'', I'' qiymatlari berilgan bo‘lsa, har doim tenglama (3.62)ning har bir ikki parametri (ikki o‘zgarmaslari) qiymatlarini aniqlash mumkin.

Misol. 3.15-rasmda keltirilgan zanjirda ikki parallel ulangan manba umumiy yuk $r_3$ni ta’minlaydilar. Birinchi generator shunday rostlanganki, uning uzatayot-gan toki 40 *A* ga teng; ikkinchi generatorning *EYuK*i 660 *V*.ga, uning ichki qarshiligi R_2=1 Ω ga teng. Agar R_3 yuk qar-shiligi 2 Ω dan 20Ω gacha o‘zgaradigan bo‘lsa, undagi kuchlanishning ushbu qarshilik o‘zgarishiga bog‘lanishini aniqlang.

Ushbu hisoblashni bajarish uchun ikkala manbani bitta manba bilan almashtirish tavsiya etiladi.



3.15-rasm. **Ikki parallel ulangan manba**

Yechish. 3-shoxobchani uzib ($R_3 \to \infty$), uning *a* va *b* klemmalari orasidagi kuchlanishni aniqlaymiz

$$U_0 = J_1 \cdot R_2 + E_2 = 700\ V.$$

3-shoxobchani qisqa tutashtirib ($R_3 \to 0$) quyidagi qisqa tutashuv tokini aniqlaymiz

$$I_{qt} = J_1 + E_2 / R_2 = 700\ A\ .$$

Demak, almashtirilishi lozim bo‘lgan yagona manbani tasavvur qilish mumkin, uning *EYuK*i 700 *V*.ga teng bo‘lib, ichki qarshiligi R_i=1 Ω.

Oddiy hisoblashlardan (3.15,*b*-rasm) quyidagini hosil qilamiz

$$U=700\cdot R_3/(R_3+1).$$

Zanjir chiziqli bo‘lgani uchun qarshilik R_3 ning qiymati 2Ω dan 20Ω gacha o‘zgarganda U_{ab} kuchlanish, R_3 ning nochiziqli funksiyasi sifatida, 467*V*.dan 665*V*.gacha o‘zgarar ekan.

Ichki qarshilikni aniqlash. Hisoblashlarda, aksariyat, ichki qarshilik r_i ning qiymatini U_0/I_{qt} sifatida emas, balki barcha manbalar *E EYuK*lari va *J* toklari nolga teng bo‘lgandagi ikki qutblikning kirish qarshiligi

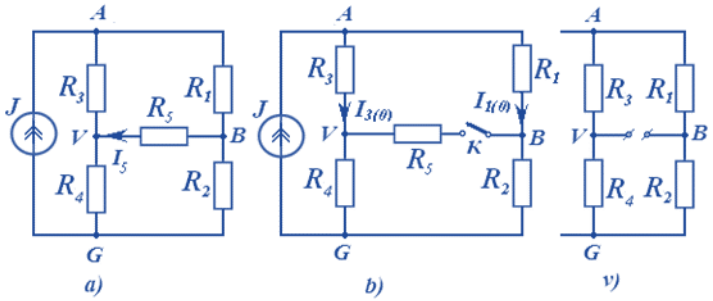
$$R_i=R_{kir} \qquad (3.68)$$

sifatida aniqlash kulayroq.

Misol. *J* tok manbaidan ta’minlanadigan Uiston ko‘prigining (3.16,*a*-rasm) diagonalidagi I_5 tok qiymatini aniqlang.

Yechim. Izlanayotgan tokni (3.63) dan aniqlash mumkin

$$I_5=U_0/(R_5+R_i),$$



3.16-rasm. **Parallel shoxobchalarni taqsimlanishi**

bunda U_0 - ko‘prikning *B* va *V* nuqtalari orasidagi yuksiz ishlash kuchlanishi (diagonal uzilgan) (3.16,*b*-rasm); R_i-uning *B* va *V* tugunlari orasidagi kirish qarshiligi (manba toki $J = 0$ bo‘lganda).

Diagonal uzilgan bo‘lsa (3.16,*b*-rasm)

$$U_0=U_{BV(0)}=R_3I_{3(0)}-R_1I_{1(0)}\ .$$

Bu tenglikka kiruvchi toklar (2.39) ifoda orqali berilgan *J* tokning parallel shoxobchalarda taqsimlanishi sifatida aniqlash mumkin

$$I_{3(0)}=J\frac{R_1+R_2}{R_1+R_2+R_3+R_4};\qquad I_{1(0)}=J\frac{R_3+R_4}{R_1+R_2+R_3+R_4}\ .$$

Oddiy soddalashtirishdan so‘ng quyidagi ifoda hosil qilinadi

$$U_0 = J\,(R_2 R_3 - R_1 R_4) / R.$$

Shunga e’tiborni qaratish zarurki, $R_2R_3=R_1R_4$ bo‘lganda $U_0=0$ bo‘ladi (ko‘prik muvozanatining sharti). Bunda diagonaldagi tok nolga teng.

Manba shoxobchasi uzilgan bo‘lsa ($J=0$) B va V tugunlari orasidagi kirish qarshiligini ikki parallel shoxobchalar (3.12,*b*-rasm) qarshiliklari sifatida aniqlash oson. Bir shoxobchaning qarshiligi $R_1=R_3$, ikkinchisining qarshiligi R_2+R_4 bo‘ladi.

Bunda

$$R_{кир} = R_i \frac{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \ .$$

Aktiv ikki qutblikni (3.15,*a*-rasm) kuchlanish manbai va ketma-ket ulangan qarshilik (3.15,*b*-rasm) sifatida almashtirish imkoniyatini *Tevenen teoremasi* deyiladi, tok manbai va parallel ulangan o‘tkazuvchanlik bilan almashtirishni (3.15,*v*-rasm) *Norton teoremasi* deyiladi. Ushbu olimlar birinchi marta sxemalarni shunday ekvivalent almashtirish imkoni borligini isbotlaganlar.

3.9. Kontur toklar va tugun potensiallari usullari

Agar elektr zanjirlarida tok va kuchlanishning taqsimlanishini hisoblashda Kirxgof qonunlarining faqat bittasidan foydalanilsa, ya’ni tenglamalar faqat tugunlar uchun (KTQ) yoki faqat konturlar uchun (KKQ) tuzilsa, u xolda umumiy tenglamalar soni kamayishi mumkin.

Tenglamalar shunday tuzilishi lozimki, unda boshqa qonunlar bajarilishi ta’minlansin. Bunday tenglamalarni tuzishning ikki usuli Maksvell tomonidan taklif etildi, ulardan biri *kontur toklar usuli* bo‘lsa, ikkinchisi – *tugun potensiallari usuli* deb nomlangan.

Kontur toklar usuli. Elektr zanjirining ixtiyoriy shoxobchasidagi tokni, har biri o‘zining berk konturida oquvchi, shu shoxobcha bo‘ylab o‘zgarmaydigan bir necha toklar yig‘indisi deb qarash mumkin. Haqiqiy toklarning bunday tashkil etuvchilari *kontur toklari* deb ataladi. Faqat bir

konturga taalluqli ixtiyoriy shoxobchaning toki kontur toki bilan mos bo‘ladi. Ikki yoki bir necha konturlarga taalluqli shoxobchalardagi toklar, mazkur kontur toklarining algebraik yig‘indisiga teng. Kontur toklari tugunlardan o‘tganda uzluksiz bo‘ladilar: demak, toklarni shunday ta’riflaganda, KTQ so‘zsiz bajariladi.

Shoxobcha toklarini kontur toklariga ajratish zanjirning tahlilidan kelib chiqadi. Kontur toklarini shoxobcha-vatar toklariga o‘xshatish mumkin, bunday vaziyatda mustaqil kontur toklari tenglamalarining soni

$$K_2=SH+1-T \qquad (3.69)$$

noma’lumlar soni bilan teng bo‘ladi; barcha boshqa shoxobchalarning toklari kontur toklari orqali ifodalangan bo‘ladi.

3.17,*a*-rasmda ikki kontur toklari I_1 va I_2 bo‘lgan oddiy elektr zanjiri keltirilgan. Zanjirning *a* va *b* shoxobchalaridagi toklar kontur toklariga teng

$$I_a= I_1; \quad I_b= I_2 .$$

Zanjirning *s* shohobchasidagi tok ikki boshqa shoxobchalar toklarining yig‘indisiga teng: u ikkala kontur uchun umumiy bo‘lgan shu shoxobchadan oqib o‘tayotgan kontur toklarning xam yig‘indisiga teng

$$I_s =I_1+I_2 .$$

KKQga binoan zanjirning birinchi konturi uchun

$$R_aI_a + R_cI_c = Ye_a - Ye_c$$

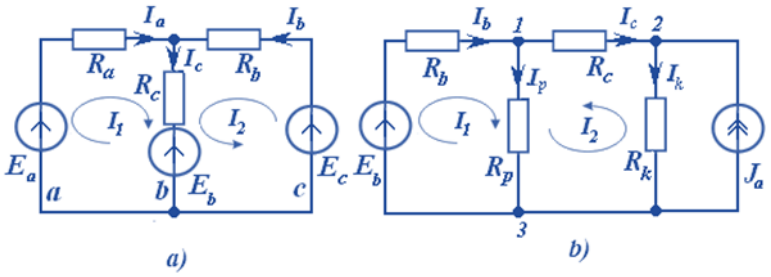
yoki

$$(R_a + R_c)\, I_1 + R_cI_2 = E_a - E_c .$$

yangi belgilashlar qabul qilinsak

$$R_{11}\cdot I_1 + R_{12}I_2 = E_1,$$

bunda $R_{11}=R_a+R_c$ - birinchi kontur tarkibiga kirgan barcha shoxobchalar qarshiliklarining yig‘indisi: $R_{12}=R_c$ - birinchi va ikkinchi konturlar uchun umumiy bo‘lgan shoxobcha qarshiligi: $E_1=E_a-E_c$ - birinchi kontur tarkibiga kirgan barcha *EYuK* lar algebraik yig‘indisi; musbat ishora bilan yo‘nalishi kontur toki yo‘nalishiga mos bo‘lgan *EYuK* belgilangan.



3.17-rasm. **Ikki kontur toklari bo‘lgan oddiy zanjir**

Shunga o‘xshash, ikkinchi konturda

$$R_{21}\cdot I_1 + R_{22}I_2 = E_2$$

bunda

$$R_{21} = R_c;\ R_{22} = R_b + R_c;\ E_2 = E_b - E_c\ .$$

Ta’riflanishiga ko‘ra ikki kontur uchun umumiy shoxobchaning qarshiligi $R_{12}=R_{21}$.

Yuqorida ko‘rilganlarni ixtiyoriy konturlar soni uchun umumlashtirsak, tarkibida tok manbai bo‘lmagan zanjir uchun kontur toklari tenglamalari tizimi quyidagi andozada yoziladi

$$\left.\begin{aligned} R_{11}\cdot I_1 + R_{12}\cdot I_2 + R_{13}\cdot I_3 + \ldots &= E_1\ ;\\ R_{21}\cdot I_1 + R_{22}\cdot I_2 + R_{23}\cdot I_3 + \ldots &= E_2\ ;\\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & \end{aligned}\right\} \qquad (3.70)$$

Ushbu tenglamalar tizimini matrisa shaklida qisqartirib yozish mumkin

$$R_{ln}\, I_n = \mathrm{E}_l\ . \qquad (3.71)$$

Kontur toklar tenglamalar tizimidagi bir xil indeksli qarshiliklar $R_{ln,}$ L-konturdagi barcha shoxobchalar qarshiliklari yig‘indisiga teng: har qanday har xil indeksli ($l\neq n$) R_{ln} qarshilik ikkala qo‘shni l va n konturlar uchun umumiy bo‘lgan shoxobcha qarshiligiga teng: agar l va n konturlarning umumiy shoxobchasidagi toklar musbat ishoralari har xil yo‘nalgan bo‘lsa, u holda R_{ln} qarshiligi oldida minus ishorasi quyiladi.

Ta’rif bo‘yicha

$$R_{ln} = R_{nl}\ . \qquad (3.72)$$

Tenglamalar tizimi (3.71)ning kontur toklariga nisbatan yechimini ham

matrisa shaklida yozish qulayliklarga olib keladi

$$I_n = G_{nl}\, E_l\ . \qquad (3.73)$$

O‘tkazuvchanlik G_{nl} ning matrisasi barcha elementlari bu ifodada Kramer-ning D-determinanti va mazkur qarshilik matrisasi R_{ln} ning algebraik qo‘shimchasi A_{ln} orqali keltirilgan

$$G_{nl} = A_{nl} / D \qquad (3.74)$$

Keyingi tenglik berilgan $R_{ln}=R_{nl}$ qarshilik tizimi matrisasi simmetrik bo‘lganidagina xaqiqiydir.

Qarshilik matrisasi $R_{ln}=R_{nl}$ simmetriyali ekanligidan algebraik qo‘shimcha-larning $A_{nl}=A_{ln}$ simmetriyaligi kelib chiqadi va, demak, o‘tkazuvchanlik element-lari matrisasi ham simmetrik bo‘lishi zarur

$$G_{nl}=G_{ln} \qquad (3.75)$$

G_{nl} koeffisiyentlar, umumiy xolda, kontur o‘tkazuvchanliklari deb ataladi.

Ixtiyoriy ikki tugunga ulangan tok J_a manbaining zanjirda mavjudligi, kontur toklari usulini qo‘llashga to‘sqin bo‘la olmaydi. Darxaqiqat, J_a tokli shoxobchani yangi, ma’lum bo‘lgan kontur tokli shoxobcha deb ko‘rish mumkin. Ammo, konturlarni tanlash ixtiyoriydir, shuning uchun J_a kontur toki tok manbai ulangan tugunni bog‘lovchi ixtiyoriy shoxobchadan oqib o‘tadi deb hisoblash mumkin. Bunda J_a kontur toki bilan umumiy shoxobchalari bo‘lgan barcha konturlarning tenglamalarida $R_{\ell a} J_a$ hadi qo‘shilishi zarur, bunda $R_{\ell a}$ barcha l va a konturlar uchun umumiy bo‘lgan shoxobchalar qarshiligi yoki I_l va J_a toklar yo‘nalishlari qarama-qarshi bo‘lgan mazkur shoxobchalarning manfiy ishorada olingan qarshiliklaridir.

Shunday qilib (3.71) tenglamalar tizimining chap tomonida

$$R_{ln}\, I_n + R_{la}\, J_a = E_l \qquad (3.76)$$

hadi qo‘shiladi.

Bunda, tenglamalar soni l ga tengligicha qoladi, chunki *no‘malum kontur toklar soni ortgani yo‘q*.

Qo‘shimcha hadni tenglamalarning o‘ng tomoniga o‘tkazib, tenglamalar (3.76) tizimini quyidagi shaklga keltiramiz

$$R_{ln}\, I_n = E_l - R_{la}\, J_a = \bar{E}_l. \qquad (3.77)$$

$\bar{E}_l$ qiymatni konturning keltirilgan EYuKi deb nomlash mumkin.

Misol ta’riqasida 3.17,*b*-rasmdagi zanjirni ko‘ramiz; uning o‘ng shoxobcha-sida tok manbai mavjud. Zanjir sxemasida ko‘rsatilgan ikki konturning tenglama-larini tuzish yetarlidir. Ularni tuzishda J_a tokning hosil qilgan kuchlanishlar pasayuvini kiritish zarur

$$\left.\begin{aligned} R_{11}I_1 + R_{12}I_2 &= E_1 = E_b \\ R_{21}I_1 + R_{22}I_2 + R_k J_a &= E_2 = 0 \end{aligned}\right\} \qquad (3.78)$$

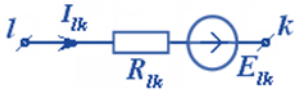
Bunda $R_{11}=R_b+R_p$, $R_{12}=R_r$, $R_{22}=R_k+R_c+R_p$ va $R_{21}=R_r$. Agar J_a toki *k*-shoxobcha orqali oqib o‘tadi, deb faraz qilsak, u holda J_a toki birinchi konturning birorta shoxobchasi orqali o‘tmaydi, J_aR_k kuchlanishlar pasayuvi esa faqat ikkinchi konturda ishtirok etadi va J_a yo‘nalishi ikkinchi kontur toki yo‘nalishi bilan mos bo‘ladi. Shunga e’tiborni qaratish muhimki, J_a toki uchun boshqa yo‘l, masalan *s* va *r* shoxobchalari orqali oqib o‘tishini ham tahmin qilish mumkin edi. Bu holatda (3.78)ning birinchi ifodasiga $R_p\, J_a$, ikkinchi ifodasiga esa $R_k\, J_a$ o‘rniga $(R_s+R_p)\, J_a$ qo‘shimchalar kiritiladi. Ularning ishoralari, mos ravishda, I_1 va I_2 toklarning yo‘nalishlari bilan muvofiqlashtiriladi. Natijada, (3.78) o‘rniga quyidagi tenglama hosil bo‘ladi

$$\left.\begin{aligned} R_{11}I_1 + R_{12}I_2 + R_k J_a &= E_b \\ R_{21}I_1 + R_{22}I_2 + (R_s+R_p)J_a &= 0 \end{aligned}\right\} \qquad (3.79)$$

Tugun potensiallari usuli. Ushbu usulning nomidan kelib chiqilsa, toklar tenglamalarini tugunlar uchun tuzish kifoyadir.

Faraz qilaylik, *l* va *k* tugunlari (3.18-rasm) birorta shoxobcha bilan bog‘langan bo‘lsin: $I_{\ell k}$ - tugun *l* dan *k* tugunga yo‘nalgan shu shoxobcha toki; $E_{\ell k}$ - tugun *l* dan *k* tugun tomon yo‘nalgan shu shoxobcha *EYuK*i; $R_{\ell k}$ - ushbu shoxob-chaning qarshiligi. Unda (3.7)ga ko‘ra *l* va *k* tugunlar orasidagi potensiallar farqi quyidagicha yoziladi

$$\varphi_l - \varphi_k = u_{lk} = -E_{lk} + R_{lk} I_{lk} \qquad (3.80)$$



3.18-rasm. **Elektr zanjir tarmog‘i**

Kirxgof kuchlanishlar qonunini berk konturning barcha shoxobchalari uchun shu kabi tenglamalarni qo‘llash va so‘ngra ularning algebrik yig‘indisini hosil qilish natijasi deb qarash mumkin. Shuning uchun shoxobchalardagi toklar aynan (3.80) tenglama bo‘yicha yozilsa

$$I_{\ell k} = (\varphi_\ell - \varphi_k + E_{\ell k}) g_{\ell k} \qquad (3.81)$$

KKQ o‘z-o‘zidan bajariladi; bunda $G_{\ell k} = 1/R_{\ell k}$; ushbu (3.80) tenglikni Omning umumlashtirilgan qonuni ifodasi deb qarash mumkin.

Ushbu belgilashlarda $I_{\ell k} = -I_{k\ell}$, $E_{lk} = -E_{kl}$, biroq

$$G_{\ell k} = G_{k\ell} \qquad (3.82)$$

Zanjirning $T=N+1$ tuguni bo‘lgan barcha shoxobchalarining qarshiliklari (yoki o‘tkazuvchanliklari), kuchlanish manbalarining *EYuK* $E_{\ell m}$lari va tok manbalarining tok $J_{\ell k}$ lari berilgan deb faraz qilib, tugun tenglamalarini tuzishga o‘tamiz. Agar 1-tugunga tashqaridan (tok manbaidan) J_1 toki oqib kelayotgan bo‘lsa, u xolda KTQga muvofiq 1-tugun uchun toklar tenglamasi quyidagicha bo‘ladi

$$I_{12} + I_{13} + \ldots + I_{1,\,n+1} = J_1;$$

ikkinchi tugun uchun

$$I_{21} + I_{23} + \ldots + I_{2,\,n+1} = I_2$$

ixtiyoriy *k* tugun uchun

$$I_{k1} + I_{k2} + \ldots + I_{k,\,n+1} = J_k.$$

Har bir tok ifodalarini (3.81)ga ko‘ra yoyib chiqsak, *k*-tugun uchun quyidagini hosil qilamiz

$$\begin{aligned}&(\varphi_k - \varphi_1 + E_{k1})G_{k1} + (\varphi_k - \varphi_n + E_{kn})g_{kn} + \ldots \\ &\ldots\ldots + (\varphi_k - \varphi_{n+1} + E_{k,n+1})G_{k,n+1} = J_k\end{aligned} \qquad (3.83)$$

No‘malum potensiallar oldidagi ko‘paytuvchilarni guruhlab, oxirgi

tugunning potensialini nolga teng deb $(\varphi_{n+1} = 0)$ faraz qilib, barcha ma'lum qiymatlarni tenglik alomatining o'ng tomoniga o'tkazib, *k*-tugun uchun tenglamani quyidagi ko'rinishga keltiramiz

$$-G_{k1}\varphi_1 - G_{k2}\varphi_2 - ... + G_{kk}\varphi_k - ... - G_{kn}\varphi_n = J_{k\,kel} \qquad (3.84)$$

Ushbu bog'lanishdagi yozuvlarni qisqartirish uchun quyidagi belgilashlarni kiritildi

$$G_{kk} = G_{k1} + G_{k2} + \ldots + G_{kn} + G_{k,n+1}; \qquad (3.85)$$

bu *k* tugunga ulanuvchi barcha shoxobchalarning o'tkazuvchanliklari yig'indisidir

$$\bar{J}_{k\text{Кел}} = J_k + G_{1k}E_{1k} + G_{2k}E_{2k} + ... + G_{nk}E_{nk} + G_{n+1,k}E_{n+1,k} \qquad (3.86)$$

Bu belgilashlardagi ikki indekslilar tartibi o'zgarishi bilan *EYuK*lar oldidagi ishoralar o'zgartirildi. E'tibor bersak, qo'shiluvchi hadlar orasida $G_{kk}E_{kk}$ keltirilma-gan. (3.86) yig'indining mazmunini oddiy talqin qilish mumkin: J_k - bu barcha haqiqiy va ekvivalent manbalardan *k* tugunga keluvchi to'la tokdir. Uning qiymatini tugun *tokining* $\bar{J}_{k\text{Кел}}$ *keltirilgan qiymati* deb atash mumkin.

(3.84) ga o'xshash tenglamalarni oxirgisidan tashqari barcha tugunlar uchun tuzish mumkin - oxirgi tugun uchun esa tugun tenglamasi barcha qolgan tenglamalardan kelib chiqadi. "Oxirgi" tugun sifatida, albatta, tugunlarning hammasidan bittasini ixtiyoriy tanlab olinishi mumkin; uni ba'zan tayanch tugun deb ham qabul qilish mumkin, chunki uning potensiali $\varphi_{n+1} = 0$.

O'ng tomonlarida keltirilgan tugun toklari bo'lgan tenglamalar tizimi. Tarkibida *n* mustaqil tenglamasi (*n*=1 tugunlarning to'la soni) va shuncha no'malum potensiallari bo'lgan tenglamalar tizimini tuzish mumkin

$$\left.\begin{aligned} &G_{11}\varphi_1 - ... - G_{1k}\varphi_k - ... - G_{1n}\varphi_n = \bar{J}_{1\text{kel}};\\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\ &-G_{k1}\varphi_1 - ... + G_{kk}\varphi_k - ... - G_{kn}\varphi_n = \bar{J}_{k\,\text{kel}};\\ &-G_{n1}\varphi_1 - ... + G_{nk}\varphi_k - ... + G_{nn}\varphi_n = \bar{J}_{n\,kel}. \end{aligned}\right\} \qquad (3.87)$$

Tugun potensiallari tenglamalar tizimi, kontur toklari tenglamalari tizimi singari, zanjirning berilgan turiga bog'liq bo'lmagan holda yoziladi; zanjirning

turi esa faqat $G_{\ell k}$ koeffisiyentlarining va erkin toklar $\bar{J}_{k\,\text{kel}}$ qiymatlariga ta’sir etadi.

Tugun potensiallari tenglamalari tizimini quyidagi tenglik bilan matrisa shaklida, ya’ni barcha *k* tugunga kelayotgan shoxobchalar o‘tkazuvchanliklari yig‘indisi orqali ifodalash mumkin

$$b_{kl} \cdot \varphi_l = \bar{J}_{k\ \text{kel}}, \tag{3.88}$$

bunda $b_{k\ell} = G_{k\ell}$; $b \neq k$ va $b_{kk} = G_{kk}$. Tenglikning o‘ng tomonida keltirilgan tok yozilgan; uni *l* tugundan *k* tugunga ketayotgan barcha shoxobchalardagi toklar yig‘indisini aniqlab (3.89)ga muvofiq quyidagicha yozish mumkin

$$\bar{J}_{k\ \text{kel}} = J_{\text{k}} + G_{kl} E_l \tag{3.89}$$

Bunda shuni yodda tutish zarurki, J_k toki *k*-tugun tomon yo‘nalganda musbat ishorali bo‘lgani kabi, shoxobchadagi E_{l} *EYuK* ham *k*-tugun tomon yo‘nalgan bo‘lsa, musbat ishorali bo‘ladi.

Yuqoridagi barcha isbotlarda har qanday ikki tugun masalan, *k* va *r* tugunlari, birgina shoxobcha bilan bog‘langan deb faraz qilingan. Agar bu tugunlar orasida G'_{kp} ; G''_{kp} ;... o‘tkazuvchanliklari bo‘lgan bir necha parallel shoxobchalar mavjud bo‘lsa, ekvivalent shoxobchaning o‘tkazuvchanligi $G_{kp} = G'_{kp} + G''_{kp} + \ldots$ ga teng bo‘lar edi.

Agar har bir shoxobchaning tarkibida o‘zining $E', E'', \ldots$ *EYuK*lari bo‘lsa, u holda parallel shoxobchalar uchun ekvivalent tok manbaining toki (tashqaridan tugunga kiruvchi tok) qiymati

$$J_k = G_{kp} E' + G_{kp} E'' + \ldots . \tag{3.90}$$

ga teng bo‘ladi. Bunda, *ilgari keltirilgan ta’riflar o‘zgarmaydi*. Masalan: 3.17,*b*-rasmdagi *T*=*n*+1=3 tugunli zanjir uchun, $\varphi_3 = 0$ni tanlab (3.90) tenglamani 1 va 2 tugunlar uchun yozamiz; (3.89) va (3.90)larni e’tiborga olib quyidagini hosil qilamiz

$$\left.\begin{aligned} G_{11}\varphi_1 - G_{12}\varphi_2 &= E_b/R_b \\ -G_{21}\varphi_2 + G_{22}\varphi_2 &= J_a. \end{aligned}\right\}$$

Bunda

$$G_{11}=1/R_b+1/R_p+1/R_c; G_{12}=G_{21}=1/R_c; G_{22}=1/R_c+1/R_k.$$

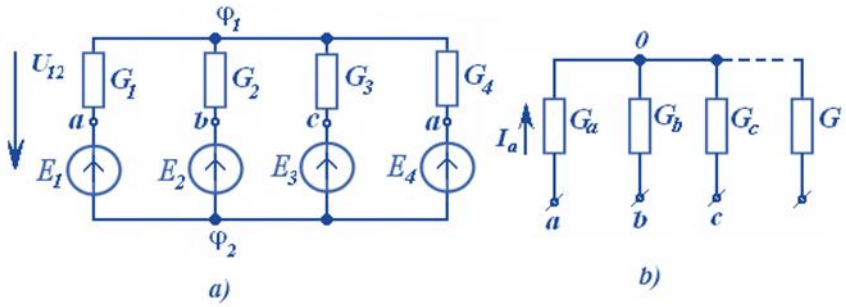
Tenglamalar tizimi (3.91) ning potensiallarga nisbatan yechimini matrisa shaklida keltirish mumkin:

$$\varphi_1 = a_{lk} \cdot \bar{J}_{k\ \text{kel}} \qquad (3.91)$$

[(3.71) va (3.72) ifodalar ta'rifiga qarang]. Berilgan (3.87) tizimda shartga ko‘ra $b_{k\ell}=b_{\ell l}$ bo‘lganligi uchun, elementlar $a_{\ell k}$ tizimi matrisasi simmetrikdir

$$a_{k\ell}=a_{\ell l}\,.$$

Qilingan farazga ko‘ra oxirgi (n+1) tugun uchun (n+1) indeks o‘rniga bu tugunni «*b*»-bazis tugun deb belgilasak, uning potensialini nolga teng deb qabul qilamiz. Ayonki, qolgan barcha tugunlarning potensiallari bazis tugunga nisbatan kuchlanishlar $\varphi_1=U_{1b}$; $\varphi_2=U_{2b}$; ... deb qabul qilinadi. Shuning uchun tugun potensiali deyish o‘rniga tugun kuchlanishlari deyiladi va bu usulning nomi *tugun kuchlanishlari usuli* deb qabul qilingan.



3.19-rasm. **Ikki tugunli zanjir**

Tugun potensiallari tenglamalar tizimini qo‘llash, parallel ulangan shoxobchali zanjirlarni hisoblashda ayniqsa yuqori samaralidir. Masalan, 3.19,*a*-rasmdagi *ikki tugunli zanjir*da tugunlar orasidagi kuchlanish bitta tenglama orqali aniqlanadi.

Tanlashda φ_1=0, k=1 va J_k =0 shartlari qabul qilinsa, (3.87) va (3.86)lardan quyidagini hosil qilamiz

$$G_{11}\varphi_1 = G_1E_1 + G_2E_2 + G_3E_3 + G_4E_4,$$

bunda G_{11} koeffisiyentning qiymati quyidagicha aniqlanadi

$$G_{11} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 = \Sigma G = S.$$

Bulardan

$$U_{12} = \varphi_1 = \sum GE / S \qquad (3.92)$$

bunda $\sum GE = G_1 E_1 + G_2 E_2 + ...$

Ba’zi shoxobchalarda kuchlanish manbalari bo‘lmasligi mumkin; bunday holatda (3.92)ning suratida ushbu had tushirib qoldiriladi, biroq $S = \Sigma G$ ning tarkibida ushbu shoxobchaning ham o‘tkazuvchanligi qatnashadi.

Yuqorida keltirib chiqarilgan (3.92) ifodani amaliyotda ko‘p uchraydigan quyidagi masalani yechishda qo‘llash mumkin:

- shoxobchalarning potensiallari $\varphi_a, \varphi_b, \ldots$ berilgan tugunlariga potensiallari noma’lum bo‘lgan va umumiy 0 tugunida uchrashadigan shoxobchalar ulangan bo‘lsa;

- o‘tkazuvchanliklari ma’lum bo‘lgan shoxobchalar toklarini aniqlash zarur bo‘lsa.

Bunday zanjir 3.19,*b*-rasmda tasvirlangan: u *yulduz* deb ataladi, shoxobcha-lari esa *yulduzning nurlari* deyiladi.

3.19,*a* va *b*-rasmlardagi zanjirlarni taqqoslangandan so‘ng shunga ishonch hosil qilish mumkinki, (3.92) ifodadagi E_1; E_2; … larni potensiallar $\varphi_a, \varphi_b, \ldots$ lar bilan va mos ravishda, $G_1, G_2, \ldots$larni $G_a, G_b, \ldots$lar bilan almashtirib, 0 nuqtaning potensialini aniqlash mumkin bo‘lar ekan

$$\varphi_0 = (\varphi_a G_a + \varphi_b G_b + \ldots) / S. \qquad (3.93)$$

Agar barcha tugunlar potensiallari ma’lum bo‘lsa, o‘rta nuqtaning potensialini aniqlab, ixtiyoriy shoxobchaning tokini aniqlash oson; masalan,

$$I_a = (\varphi_a - \varphi_0) G_a \text{ va h.k.}$$

Tenglamalar tizimlarini tanlash. Kirxgof tenglamalari yordamida zanjirlarni hisoblashda doimo kontur toklari yoki tugun potensiallari usuli bilan ularning tenglamalarini yozish kerak. Bu ikki tenglamalar tizimidan birini tanlashda, tabiiyki, ularni yechish osonrog‘ini, ya’ni tenglamalar soni kamroq bo‘lganini tanlash zarur bo‘ladi.

3.10. O‘zarolik prinsipi

3.20,*a*-rasmda keltirilgan zanjirda ikki tashqi (1 va 2) shohobchalar o‘zaro chiziqli elementlari bo‘lgan, manbalari bo‘lmagan ixtiyoriy tarmoqlangan elektr zanjiri bilan bog‘langan bo‘lsin: bunday passiv zanjir P harfi bilan belgilangan; passiv zanjirning to‘rtburchak ichiga olingan barcha parametrlari o‘zgarmas bo‘lib qoladi. Ikki tashqi zanjir uchun o‘zarolik prinsipi quyidagi tenglik bilan ifodalinishi mumkin

$$I_1'U_1''+I_2'U_2''=I_1''U_1'+I_2''U_2', \qquad (3.94)$$

bunda bir va ikki shtrixlar bilan belgilangan tok va kuchlanishlar ikki har xil rejimlar uchundir.

Xususiy holda, bir kuchlanish manbai bir rejimda (3.20,*b*-rasm) birinchi shoxobchaga ($U_1'=E;\ \ U_2'=0$), ikkinchi rejimda esa (3.20,*v*-rasm) ikkinchi shoxob-chaga $U_1''=0; U_2''=E$ ulangan. Bunda (3.94)dan quyidagi hosil bo‘ladi

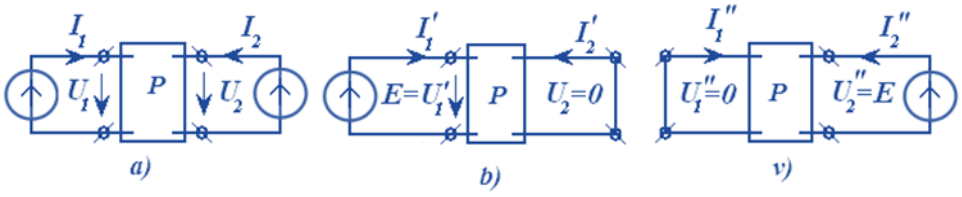
$$0+I_2'E=I_1''E=0 \quad \text{yoki} \quad I_2'=I_1''. \qquad (3.95)$$

Ko‘rilgan rejimlarda (3.94) tenglamadan I_1' va I_2'' toklari orasidagi bog‘lanish haqida biror xulosa chiqarib bo‘lmaydi.

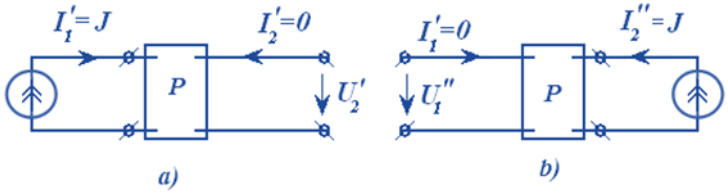
(3.95) tenglik bilan ifodalangan xususiy hol, kontur toklari tenglamalaridan bevosita kelib chiqadi. I_1'' va I_2' larni kontur toklari deb hisoblab, (3.73)dan quyidagilarni aniqlaymiz

$$I_2'=y_{21}E \quad \text{va} \quad I_1''=y_{12}E.$$

Birinchi holatda faqat birinchi kontur *EYuK* ning qiymati $E_1=E$ noldan farq qilsa, ikkinchisida $E_2=E$ noldan farq qiladi, shuning uchun o‘tkazuvchanlik koeffisiyentlari $G_{21}=G_{12}$ uzatish o‘tkazuvchanliklari $y_{21}=y_{12}$ bilan mos keladilar (kontur toklari shoxobcha toklari bilan mos bo‘ladilar).



3.20-rasm. **Passiv zanjir**



3.21-rasm. **O‘zarolik prinsipi**

Boshqa xususiy holda, tok manbai birinchi shoxobchadan ikkinchisiga (3.21,*a* va *b*-rasmlar) o‘tkazilsa va boshqa shoxobcha uzilganligicha qolsa, (3.94) tenglamadan quyidagilarni aniqlaymiz

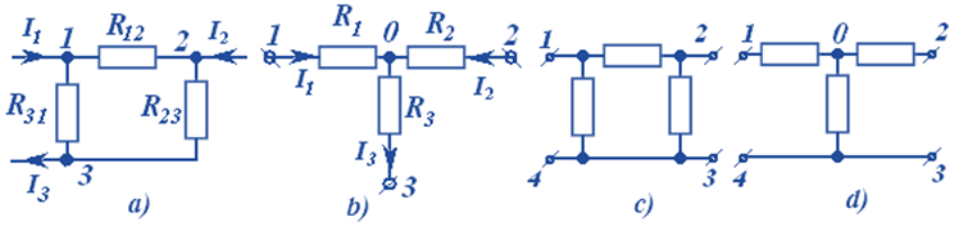
$$JU_1''+0=0+JU_2' \quad \text{yoki} \quad U_1''=U_2'.$$

Shunga e’tiborni qaratish zarurki, *o‘zarolik prinsipi* asosida U_1' va U_2'' kuchlanishlar bog‘lanishlari haqida birorta xulosaga kelib bo‘lmaydi.

Ikki rejim uchun yozilgan tenglamalar tizimini tahlil qilish natijasida va uzun algebraik o‘zgartirishlardan so‘ng umumlashtirilgan ifodani keltirib chiqarish mumkin (3.94). Biroq uning isboti maydonlar nazariyasidan juda oson keltirib chiqarilishi mumkin.

3.11. Elektr zanjir sxemalarida «Uchburchak» ulashdan ekivalent «Yulduz» ulashga va aksincha o‘tkazish tenglamalari

Yuqorida elektr zanjirlarini soddalashtirish maqsadida ularni o‘zgartirish usullari birnecha marta ko‘rilgan edi: parallel shoxobchalar o‘rniga bir ekvivalent qarshilik olindi, tarmoqlangan aktiv zanjir o‘rniga ekvivalent generator qabul qilindi; barcha holatlarda ham bitta ikki qutblik o‘rniga boshqa - ekvivalent ikki qutblik qabul kilindi.



3.22-rasm. **Uchburchak va yulduz usulida ulanish**

Elektr zanjirlarining hisoblash va tahlilini soddalashtirish maqsadida,

ba’zan zanjirning boshqa qismlari bilan uch yoki ko‘proq nuqtalar orqali bog‘langan (uch qutbliklar yoki ko‘p qutbliklar) zanjirning bir qismini o‘zgartirish zarurati tug‘iladi.

Ularning o‘zgartirilishi ushbu ko‘p qutblikning o‘rniga elektrik nuqtai nazardan unga ekvivalent bo‘lgan, biroq ichki bog‘lanishlari bilan farq qiluvchi boshqa ko‘pqutblikni qabul qilish ko‘zda tutiladi. Bunday o‘zgarishlar zanjir o‘zgartirilmagan qismlarining ishlash rejimiga ta’siri bo‘lmagandagina ekvivalent hisoblanadi.

Ikki yoki undan ko‘p qutbliklar ekvivalentligi shuni anglatadiki, ularning har qanday rejimlarida ham, ya’ni tashqaridan birinchi va ikkinchi ko‘p qutbliklarning qutblari (klemmalari)ga oqib kelayotgan toklar ($I_1 = I^1_1; I_2 = I^1_2$) teng bo‘lganda, shu klemmalar (birinchisining $\varphi_1; \varphi_2; \ldots$) va (ikkinchisining $\varphi^1_1; \varphi^1_2; \ldots$) potensial-lari teng bo‘ladi.

Elektr zanjirlarini hisoblash jarayonlarida *passiv uchburchaklar*ni *passiv uch qirrali yulduzlar*ga to‘g‘ri va teskari o‘zgartirishlar keng qo‘llaniladi.

3.22-rasmda shoxobchalarni uchburchak (*a*) va yulduz (*b*) usulida ulanishlari ko‘rsatilgan; bunday uch qutblik sxemalari P va T xarflariga o‘xshashligi tufayli (3.22,*c* va *d*- rasmlar) P-simon va T-simon deb nomlangan. Bunda, yulduz ulanishning (3.22, *b*-rasm) *umumiy “0” nuqtasi tashqi zanjir bilan ulanmagan* deb hisoblanadi, aks holda u uch qutblik emas, balki to‘rt qutblik bo‘lar edi. Uchbur-chak va yulduz ulangan uch qutbliklar ekvivalent bo‘lgandagi ular shoxobchalari qarshiliklarining qiymatlari orasidagi bog‘lanishlarni aniqlaymiz.

Uchburchak va yulduz uchun ular tugunlarining potensiallari va tugunlarga oqib kelayotgan toklar orasidagi bog‘lanish tenglamalarini keltirib chiqaramiz. Yulduz uchun

$$\varphi_1 = a_{11} I_1 + a_{12} I_2; \varphi_2 = a_{21} I_1; I_2 + a_{22} I_2,$$

uchburchak uchun

$$\varphi_2 = a^1_{11} I_1 + a^1_{12} I_2; \varphi_2 = a^1_{21} I_1; I_2 + a^1_{22} I_2.$$

Uchinchi tugunning potensiali nolga teng deb qabul qilindi; aniqki, uchinchi tok birinchi va ikkinchilarning algebraik yig‘indisiga teng.

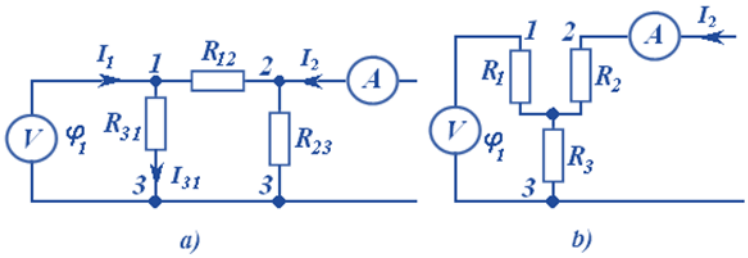
Ko‘rilayotgan uch qutbliklarning ekvivalentlik shartlari uchta tenglamalar bilan ifodalanadi

$$a_{11} = a^{1}_{11}; a_{12} = a^{1}_{12}; a_{22} = a^{1}_{22}, \tag{3.96}$$

chunki (3.75) ga ko‘ra koeffisiyentlar

$$a_{21} = a_{12}; a^{1}_{21} = a^{1}_{12}.$$

Ekvivalent uchqutblikni tanlaganda uchchala qarshiliklarning kerakli qiymatlarini tanlash imkoniga ega bo‘lamiz. Shuning uchun, masalaning yechimi bor, ya’ni uch qarshiliklarning qiymatlari shunday miqdordagi shartlarni bajaradi deb faraz qilamiz.



3.23-rasm. **Ekvivalentlik shartlari**

Koeffisiyent a_{12} va a^{1}_{12} larni aniqlash uchun I_1 tokning qiymatini nolga tenglashtiramiz va berilgan I_2 tok uchun birinchi tugun (3.23-rasm) potensialini aniqlaymiz.

Bunda yulduz (3.23,*b*-rasm) uchun

$$\varphi_1 = R_3 I_2 \tag{3.97}$$

va, demak, $a_{12} = R_3$.

Uchburchak (3.23,*a*-rasm) uchun

$$\varphi_1 = r_{31} I_{13}, \tag{3.98}$$

bunda I_{13} - tok I_2 ning bir qismidir, shuning uchun, bu tok ikki parallel shoxobchalarda taqsimlanishini e’tiborga olib, uni aniqlash mushkul ish bo‘lmaydi

$$I_{13} = I_2 R_{23} / (R_{12} + R_{23} + R_{31}). \qquad (3.99)$$

Tokning (3.81)dagi qiymatini (3.82)ga quyib, quyidagini aniqlaymiz

$$a_{12} = R_{31} R_{23} / (R_{12} + R_{23} + R_{31}). \qquad (3.100)$$

Koeffisiyentlar a_{12} va $\bar{a}_{12}$ni tenglashtirib, ekvivalentlik shartlaridan birini aniqlaymiz

$$R_3 = R_{31} R_{23} / R, \qquad (3.101)$$

bunda $R = R_{12} + R_{23} + R_{31}$.

Ushbu shart uchburchakning uchta shoxobchalari qarshiliklari berilganda yulduz qirrasidan birining qarshiligini aniqlash imkonini beradi.

Yulduzning qolgan ikki qirralari qarshiliklarining ekvivalent uchburchak tomonlari qarshiliklari orasidagi bog‘lanishni hisoblashda qolgan koeffisiyentlarni o‘zaro tenglashtirib aniqlaymiz. Biroq, simmetriya prinsipidan foydalanish ishni keskin osonlashtiradi. Yulduzda ham, uchburchakda ham barcha shoxobchalar tashqi klemmalarga nisbatan simmetrik joylashgan. Demak, yulduzning qolgan ikki qirralari uchun yoziladigan ifodalar ham (3.86)ga o‘xshash strukturaga ega bo‘ladi. Shuning uchun (3.86) dagi indekslarni aylana bo‘ylab o‘zgartirib, ularni aniqlash mumkin

$$R_1 = R_{12} R_{31} / R; \qquad R_1 = R_{23} R_{12} / R. \qquad (3.102)$$

Yulduz ulanishning bunday qarshiliklar qiymatlarida ushbu yulduz ulash uchburchak ulashga ekvivalent bo‘ladi.

Qarshiliklarning keltirilgan qiymatlarida $a_{11} = \bar{a}_{11}$ shartning ham bajarilishini mustaqil ravishda tekshirishni o‘quvchiga havola etamiz; bunda $a_{22} = a^1{}_{22}$ sharti 1 indeksini 2ga, 2 indeksini esa 1ga o‘zgartirib hosil qilinadi.

Tenglamalar tizimi (3.101-3.102)ni uchburchak tomonlari qarshilik-lariga nisbatan yechib, berilgan qirra shoxobchalari qarshiliklari R_1, R_2, R_3 bo‘lgan

$$\left.\begin{aligned} R_{12} &= R_1 + R_2 + R_1 R_2 / R_3; \\ R_{23} &= R_2 + R_3 + R_2 R_3 / R_1; \\ R_{31} &= R_3 + R_1 + R_3 R_1 / R_2. \end{aligned}\right\} \qquad (3.103)$$

yulduz ulashga ekvivalent bo‘lgan uchburchak qarshiliklarini aniqlaymiz

Ushbu natijalarni boshqa usulda, toklar tenglamalarini potensiallar orqali ifodalab aniqlash ham mumkin. Bunda yulduzchaning nol nuqtasi potensiali ifodasi (3.93)dan foydalanish qulayroq.

Barcha qarshiliklarni o‘tkazuvchanliklar bilan almashtirib, keyingi tenglamalarni simmetrik shaklga keltirish mumkin

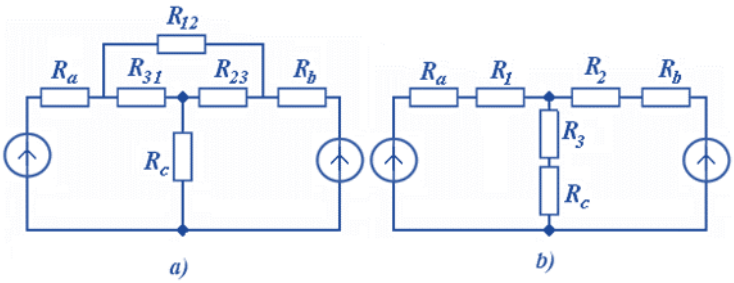
$$G_{12}=G_1G_2/S;\quad G_{23}=G_2G_3/S;\quad G_{31}=G_3G_1/S; \tag{3.104}$$

bunda $S=G_1+G_2+G_3$.

Xususiy holda, yulduzcha barcha qirralarining qarshiliklari uchburchak barcha tomonlarining qarshiliklariga teng bo‘lganda, ular orasidagi bog‘lanish

$$R_Y=3R_\Delta\,. \tag{3.105}$$

Uchburchak va yulduzlarning shoxobchalarida *EYuK* manbalari bo‘lganda ham, keltirib chiqarilgan ekvivalentlik shartlarini tatbiq etish mumkin. Biroq, bunday holatlarda manbalarni zanjirning tashqi qismiga chikarish lozim; bunda uchburchak uchun *EYuK* manbalarini ekvivalent tok manbalari bilan almashtirish zarur.



3.24-rasm. **To‘rtta tuguni bo‘lgan zanjir**

Uchburchakni yulduzchaga yoki teskari o‘zgartirish natijalari hisoblashni keskin soddalashtiradi. Masalan, to‘rtta tuguni bo‘lgan zanjir (3.24,*a*-rasm) tarkibida uchburchak ulangan R_{12}, R_{23}, R_{31} qarshiliklar mavjud. Ularni ekvivalent yulduz bilan almashtirgandan so‘ng (3.24,*b*-rasm) soddalashadi va ikkita tugunli zanjirga aylanadi.

Ko‘p qirrali yulduzni ko‘p burchakka aylantirishning umumiy xolati. Bunday almashtirish, agar umumiy tugunga tashqi tok oqib kelmasa, xar doim

amalga oshirilishi mumkin.

Yulduz qirralaridagi toklar uchun (3.25,*a*-rasm) tenglamalar tuzib $I_1 = G_1(\varphi_1 - \varphi_0);\ \ I_2 = G_2(\varphi_2 - \varphi_0);\ldots$ hamda umumiy nuqta potensialini (3.93)tenglik bilan ifodalab (bunda $S = G_1 + G_2 + \ldots$- yulduz barcha qirralarining o‘tkazuvchanliklari yig‘indisi), quyidagilarni aniqlaymiz

$$I_1 = G_1(1 - G_1 / S)\varphi_1 - (G_1 G_2 / S)\varphi_2 - (G_1 G_3 / S)\varphi_3 - \ldots;$$

$$I_2 = -(G_2 G_1 / S)\varphi_1 - G_2(1 - G_2 / S)\varphi_2 - (G_2 G_3 / S)\varphi_3 - \ldots;$$

Tashqaridan ko‘pburchak tugunlariga kelayotgan toklar (3.26,*b*-rasm) shunga o‘xshash tenglamalari (3.67) ifodalari kabi o‘xshash yozilishi mumkin

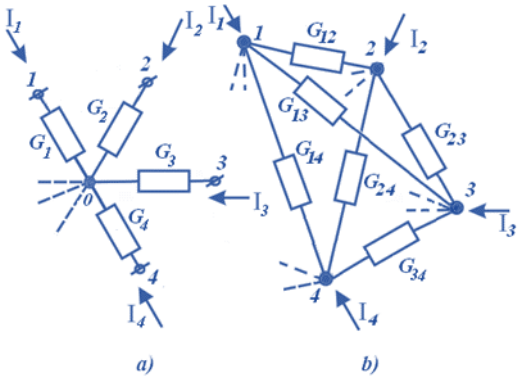
$$\left.\begin{aligned} I_1 &= G_{11}\varphi_1 - G_{12}\varphi_2 - G_3\varphi_3 - \ldots; \\ I_2 &= -G_{21}\varphi_1 - G_{22}\varphi_2 - G_{23}\varphi_3 - \ldots; \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \end{aligned}\right\}$$

Keyingi ikki tenglamalar tizimini taqqoslab, quyidagilarni aniqlaymiz

$$\left.\begin{aligned} G_{12} &= G_1 G_2 / S; \quad G_{13} = G_1 G_3 / S; \\ G_{11} &= G_1(G_2 + G_3 + \ldots) / S \ldots \end{aligned}\right\} \qquad (3.106)$$

Shunday qilib, *k* va ℓ nuqtalarni bog‘lovchi ekvivalent ko‘pburchaklikning ixtiyoriy shoxobchasi o‘tkazuvchanligi uchun quyidagi umumiy bog‘lanishni yozish mumkin

$$G_{k\ell} = G_k G_\ell / S. \qquad (3.107)$$



3.25-rasm. **Ko‘p qirrali yulduzni ko‘p burchakka aylantirishning umumiy holati**

Ko‘rib chiqilgan o‘zgartirish - berilgan tenglamalar tizimidagi noma’lum

φ_0 ning bartaraf etilishi, ya’ni sxemadagi bir tugunni qisqartirilishi bilan teng kuchga ega. Umumiy holda, ko‘pburchakni ekvivalent yulduzga qayta o‘zgartirish mumkin emas, chunki (3.107) ifodadagi ko‘pburchak shoxobchalari o‘tkazuvchan-liklari ma’lum bog‘lanishlarda bo‘lishi talab etiladi

$$G_{21} / G_{31} = G_2 / G_3 = G_{2n} / G_{3n}. \qquad (3.108)$$

Ixtiyoriy ko‘pburchakliklarda ushbu talablar bajarilmasligi ham mumkin.

Uch qirrali yulduzlar va uchburchaklar uchun ham to‘g‘ri, ham teskari o‘zgartirishlar so‘zsiz bajariladi.

Nazorat savollari

1. Kirxgoff qonunlari va potensial diagrammasini tushuntiring.
2. Elektr yurituvchi kuch manbai bo‘lgan zanjirning bir qismi uchun Om qonunini izohlang.
3. Superpozosoya (ustlash yoki jamlash) prinsipini tushuntirib bering.
4. Kompensasiya usulini tushuntirib bering.
5. Chiziqlilik prinsipini tushuntirib bering.
6. Ekvivalent generator usuli tushuntiring.
7. Kontur toklar va tugun potensiallari usullarini bir-biridan farqi.
8. O‘zarolik prinsipini tushuntiring.
9. Elektr zanjir sxemalarida «Uchburchak» ulashdan ekivalent «Yulduz» ulashga va aksincha o‘tkazish tenglamalarini izoxlab bering.

4-BOB. O‘ZGARUVCHAN TOK ZANJIRLARI

4.1. Umumiy tushunchalar

O‘garuvchan tok, ya’ni vaqtga bog‘liq ravishda o‘zgaradigan tok $i(t)$ haqida gapirganda, u bilan bog‘liq bo‘lgan va elektr zanjirini tasvirlovchi kuchlanish $u(t)$, zaryad $q(t)$, magnit oqimi $\psi(t)$ va boshqa qiymatlarning ham vaqt bo‘yicha shunday o‘zgarishi nazarda tutiladi.

Ular o‘zgaruchan bo‘lganligi ($du/dt \neq 0, di/dt \neq 0$, ya’ni *kuchlanish va tok hosilalari nolga teng bo‘lmaganligi)* sababli induktivliklarda kuchlanishlar hosil bo‘ladi, kondensatorli shoxobchalarda toklar oqadi (o‘zgarmas toklardagi bilan solishtiring).

Davriy va nodavriy o‘zgaruvchan kuchlanish va toklar. Agar 4.1,*a*-rasmdagi sxemada *r-L* zanjir, kuchlanishi *E* bo‘lgan o‘zgarmas *EYuK* manbaiga «*K*» kalit bilan ulansa, undagi tok qiymati *i=0* dan *i*=const bo‘lgunga qadar *i*(*t*) ifoda bo‘yicha o‘zgarib (4.1,*b*-rasm) aperiodik o‘suvchi nodavriy bo‘ladi. Agar zanjir (4.1,*v*-rasm) kalitini *T* davr bilan t_1 vaqt oralig‘ida ulab, t_2 vaqt oralig‘ida uzib turilsa, davriy nosinusoidal *u*(*t*) kuchlanish yoki *i*(*t*) tok (4.1,*g*-rasm) hosil bo‘ladi. Bunday misollarni ko‘plab keltirish mumkin. Bunday o‘tkinchi jarayonlar darslikning keyingi boblarida o‘rganiladi. Oldingi misoldagi kabi

$$f(t) = f(t+T), \tag{4.1}$$

T=const shartni bajaruvchi davriy o‘zgaruvchan qiymatlarni ko‘rish bilan cheklanamiz.

Bu (4.1) tenglik shuni anglatadiki, ko‘rilayotgan qiymat o‘zgarishi har *T* vaqt oralig‘ida (4.1,*g* va 4.2-rasmlar) takrorlanib turadi; bunda *T*- *davr* deb ataladi. Davrga teskari bo‘lgan qiymat, yani 1 sekund (*s*) vaqt birligidagi davrlar soni

$$f = 1/T \tag{4.2}$$

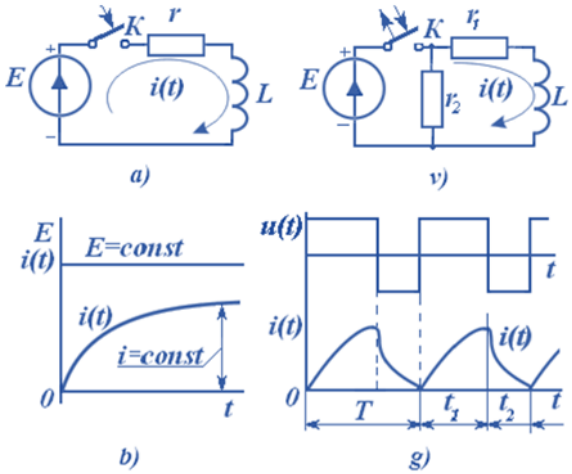
chastota deb ataladi. Uning o‘lchov birligi Gers (*Hz*). Axborot tizimlari elektr tarmog‘i kuchlanishi standart chastotasi *f*=50 *Hz* ga teng bo‘lib, kuchlanishning har *T*=0,02 *s*da bir davr o‘zgarishiga mos keladi. Davri

$T = 10^{-6} s = 1\,mks$(mikrosekund) bo‘lgan signal chastotasi $f = 1\,MHz$ (megogers) bo‘ladi.

Oddiy garmonik tebranishlar - sinusoidal (yoki kosinusoidal) o‘zgaruvchi qiymatlar (4.2-rasm) quyidagicha ifodalanadi

$$f(t) = F_m \sin(\omega t + \alpha) \equiv F_m \cos(\omega t + \alpha - \pi/2) \qquad (4.3)$$

bunda $f(t)$ - oniy qiymat; F_m - amplituda; ω - burchak (yoki aylanaviy) chastota; $\omega t + \alpha - \pi/2$ - radianda yoki gradusda ifodalangan faza; α; $\alpha - \pi/2$ - boshlang‘ich faza.



4.1-rasm. **Davriy va nodavriy o‘zgaruvchan kuchlanish va toklar**

Chastotalari teng bo‘lgan garmonik funksiyalar yig‘indisi, zarur bo‘lganda, shu chastotali garmonik funksiya shaklida ifodalanishi mumkin; uning amplituda va fazalari, hyech bo‘lmaganda, oddiy trigonometrik o‘zgarishlar yordamida ifoda-lanishi mumkin

$$F_{m1} \sin(\omega_1 + \alpha_1) + F_{m2} \sin(\omega t + \alpha_2) = F_m \sin(\omega t + t).$$

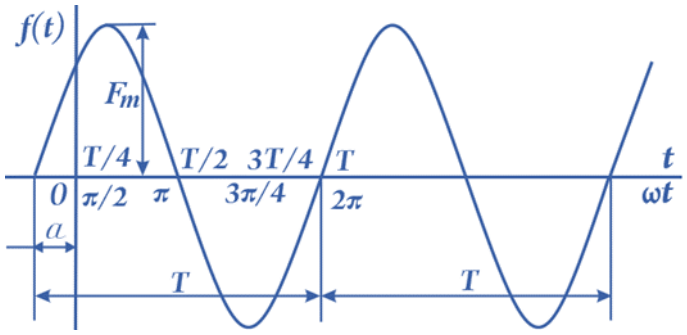
Bunda

$$F_m = \sqrt{(F_{m1} \sin\alpha_1 + F_{m2} \sin\alpha_2)^2 + (F_{m1} \cos\alpha_1 + F_{m2} \cos\alpha_2)^2};$$

$$tg\alpha = \frac{F_{m1} \sin\alpha_1 + F_{m2} \sin\alpha_2}{F_{m1} \cos\alpha_1 - F_{m2} \cos\alpha_2}. \qquad (4.4)$$

Garmonik o‘zgaruvchan tok keng qo‘llanilishi sabablari. Garmonik o‘zgaruvchan tokning qo‘llanilishi, bir tomondan, o‘tayotgan jarayonlarning murakkablashuviga olib kelgan bo‘lsa, ikkinchi tomondan, elektr zanjirlarining

samarali ishlashiga yangi imkoniyatlar yaratdi. 1831 yilda Faradeyning o‘zgarmas tok generatori va motorini ixtiro qilishi shundan keyingi 50-60 yillar davomida sanoatning keskin rivojlanishiga deyarli ta’sir ko‘rsata olmadi.



4.2-rasm. **Davriy sinusoidal o‘zgaruvchan kattalik**

Ammo, elektr zanjirlar nazariyasi fanining asosini tashkil etgan elektro-magnit induksiyasi qonunining kashf etilishi, o‘zgaruvchan toklardan hosil bo‘ladi-gan o‘zgaruvchan magnit maydonining elektr yurituvchi kuchlarini induktivlashi hodisalarini kashf qilinishi, 1889 yilda o‘zgaruvchan elektr generatorlari, motorlari va transformatorni ixtiro qilishga olib keldi. Shu sababli, aynan o‘zgaruvchan tok va kuchlanishni osonlik bilan transformasiyalash, elektr energiyasini uzoq masofalarga uzatish imkoniyatini yaratdi. Bu esa uning sanoatda keng qo‘llani-lishiga sabab bo‘ldi. Bunda transfarmatorlar tuzilishining soddaligi, ular ishlashining ishonchliligi, foydali ish koeffisiyentining yuqori darajada ekanligi hal qiluvchi ahamiyatga ega bo‘ldi. Shu tufayli aloqa korxonalarini elektr energiyasi bilan ta’minlash tizimlarida kuchlanishning qiymatini bir necha marta o‘zgar-tirilishini ko‘rishimiz mumkin.

4.3-rasm. **Axborot tizimlarining elektr ta’minoti**

Masalan, axborot tizimlarining elektr ta’minoti 4.3-rasmda keltirilgan sxema bo‘yicha amalga oshiriladi. Bunda *G*-generator elektr energiyasini bir kuchlanishda ishlab chiqaradi (masalan $U_1 = 11\kappa V$); bu kuchlanish birinchi

transformotorda (Tr1) $U_2 = 110kV$ (yoki 220 *kV* yoki 500 *kV*) gacha kuchaytiriladi, tok esa $n = U_2 / U_1$ marta pasaytiriladi; shu tokning pasaytirilgan miqdori yuqori kuchlanish bilan uzoq masofalarga liniyalar yordamida uzatiladi. Tr2 ga kelib kuchlanish 10,3 *kV* yoki 6,3 *kV* gacha pasaytiriladi, tok shuncha marta ortadi va kabel liniyalari orqali taqsimlanadi; so‘ngra uchinchi transfarmator Tr3 dan energiya istemolchilarga kichik kuchlanish (0,4 *kV* yoki 380/220 V)da kam quvvat isrofi bilan yetkaziladi. Keltirilgan sxemadagi yuqori kuchlanishli uzatish liniyalarida tokning qiymati energiyani qabul qiluvchi istemolchilardagiga nisbatan 500-1000 marta kichikroq bo‘ladi, Joul-Lens qonuni asosida liniyalardagi quvvat isrofi tokning kvadratiga proporsional ravishda pasaytirilib, istemolchiga yet-kaziladi. Bu misoldan transformatorning iqtisodiy samaradorligi qanchalar baland ekani ko‘rinib turibdi.

Bu sxemada elektr ta’minoti tizimi juda ham sodda holatda keltirilgan: mavjud bo‘lgan elektr liniyalarining ko‘plab tarmoqlari, o‘nlab, yuzlab generator-larning o‘zaro aloqalari keltirilmagan, va h.k. Aslida transformatorlar soni aksariyat, uchtadan ko‘proq bo‘ladi, eng yuqori kuchlanish esa magistral elektr tarmoqlarida 220 yoki 500*kV* bo‘ladi. Markaziy Osiyo davlatlarida bunday liniyalar umumiy uzunligi minglab kilometrni tashkil etadi.

O‘zgaruvchan tok chastotasi. Yevropa va Osiyo davlatlari elektr ta’minoti tizimida standart chastota *f*=50 *Hz*, $\omega = 2\pi \cdot f = 314s^{-1}$, Shimoliy Amerikada esa *f*=60 *Hz*, $\omega = 2\pi \cdot f = 367s^{-1}$ qabul qilingan. Bulardan kichikroq chastotal**a**r maxsus chastotali boshqariluvchi elektromexanik uskunalarda, undan katta chastotalar esa minglab Gers (kilogers - kHz), millionlab Gers (Megogers - *MHz*) axborot texnologiyalari tizimlarida qo‘llaniladi.

Tovush chastotalarining diapazoni 20 *Hz* dan 20 *kHz* gacha bo‘ladi. Radiotexnikada oddiy qabul qiluvchi radiolarning chastotalari 150 *kHz* dan 12 *MHz* gacha oraliqda bo‘ladi. O‘ta yuqori chastota (o‘.yu.ch.) texnikasida bir necha minglab megagers (ya’ni *GHz* - gigagers)li chastotalar ishlatiladi. O‘.yu.ch. texnikasining rivojlanishi radiolokasiya ixtiro qilinishiga olib keldi.

Keyinchalik bu chastotalar aloqaning har xil turlarida, fizik kuzatuvlar texnikasida va eksperimentlarda qo‘llanila boshlandi. Bular qatoriga radioastranomiya, elektron texnikasi, ayniqsa molekulyar elektronika kiradi.

4.2. Rezistor va kondensatorli zanjirda o‘zgaruvchan tok

Kondensatorda zaryadlanish va razryadlanish jarayoni. O‘zgaruvchan kuchlanishi *u* ga teng bo‘lgan manba kondensator *C* ga ulanib (4.4,*a*-rasm) berk kontur hosil qilsa, zanjirdan o‘zgaruvchan tok *i* oqib o‘tadi. Misol uchun, o‘zgaruvchan kuchlanish generatoriga kabel tarmog‘i ulanganini ko‘raylik (4.4,*b*-rasm). Tarmoqning izolyasiyalangan o‘tkazgichlari orasida elektr maydoni hosil bo‘ladi, o‘tkazgichlarda esa ortiqcha zaryadlar to‘plami paydo bo‘ladi: potensiali yuqoriroq bo‘lgan o‘tkazgichda musbat zaryadlar ($+q$) va quyi potensialli o‘tkazgichda - manfiy zaryadlar ($-q$). Bunda zaryadning qiymati sig‘im va kuchlanishning qo‘paytmalariga teng

$$q = Cu_C = Cu.$$

Zaryadning o‘zgarishi tokning quyidagi o‘zgarishi bilan mos bo‘ladi

$$i = dq/dt = Cdu_C/dt = Cdu/dt.$$

Manbaning kuchlanishi berilgan, deb faraz qilib

$$u = U_m \cos\omega t = U_m \sin(\omega t + \pi/2) \tag{4.5}$$

so‘ngra differensiallab, tok qiymatni aniqlaymiz

$$i = -C\omega U_m \sin\omega t = I_m \sin(\omega t + \pi) \tag{4.6}$$

Kuchlanish chastotasiga proporsional bo‘lgan garmonik tokning amplitudasi

$$I_m = C\omega U_m \tag{4.7}$$

ga teng bo‘lib, fazasi bo‘yicha kuchlanishdan $\pi/2$ burchakka ilgarilab ketadi.

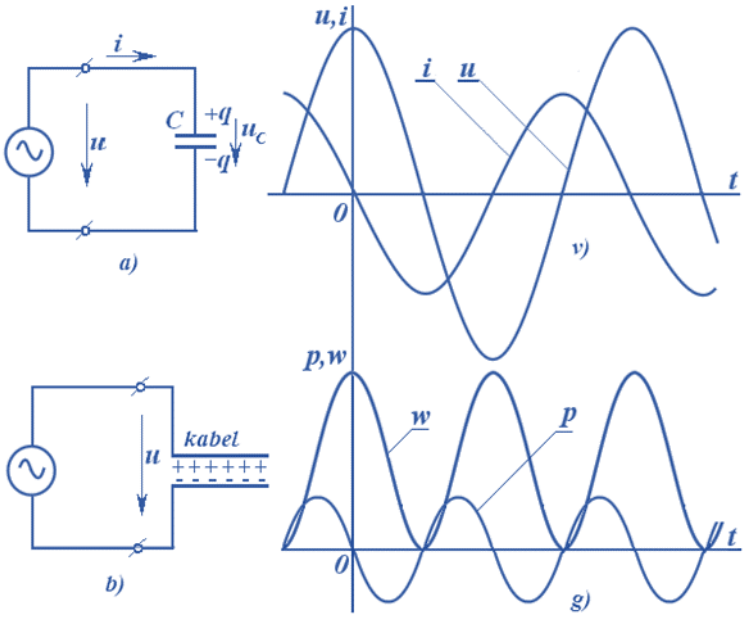
Shunga e’tibor qaratish zarurki, ushbu ifodani kondensator kuchlanishining har qanday boshlang‘ich fazasi uchun ham qo‘llash mumkin.

Kabel tormog‘ining uzunligi katta bo‘lganda, sig‘im tokining qiymati sezilarli darajada bo‘ladi. Misol uchun, umumiy uzunligi 25 *km* bo‘lgan kabel

tarmog‘i sig‘imi $C=10\cdot10^{-6}\ F$ (Farada) bo‘lsa, kuchlanishi $U_m=9{,}5kV$ va chastotasi $f=50\ Hz$ bo‘lganda, tokning amplitudasi $I_m=29{,}8\ A$ (Amper) bo‘ladi.

Agar (4.7)da sig‘im toki amplitudasining qiymati chastotaga proporsional ekanligini e’tiborga olsak, yuqori chastotali va o‘ta yuqori chastatali kuchlanishlarni uzatishning qanchalar katta muammolari bor ekanligini bilamiz.

4.4,*v*-rasmda kuchlanish va toklar oniy qiymatlarining grafigi keltirilgan. Bunda, kuchlanishning musbat (yarim davr) qiymati, 4.4,*a*-rasmdagi belgilanganiga muvofiq, kondensatorning yuqoridagi elektrodi potensiali pastdagi elektrodi potensialidan balandroq bo‘lgan vaqt oralig‘iga mos keladi. Tokning 4.4,*a*-rasm-dagi musbat ishorasi kondensatorning yuqoridagi elektrodiga musbat zaryadning oqib kelishiga mos keladi.



4.4-rasm. **Kondensatorda zaryadlanish va razryadlanish jarayoni**

Biror funksiya va uning hosilasi orasidagi bog‘lanish haqidagi mulohazalarni kondesatorga tatbiqi shuni ko‘rsatadiki, sig‘imdagi kuchlanish ekstremal bo‘lgan onda tokning oniy qiymati nolga teng (ya’ni zaryadlanish tokining oqishi to‘xtagan) bo‘ladi; kuchlanishlar qiymatlari nolga teng bo‘lsada, zaryadlar oqishi tezligi katta bo‘lganligidan, shu ondagi tokning qiymatlari ekstremal ($\pm I_m$) darajaga erishadi.

Kondensator elektr maydoni energiyasining o‘zgarishi

$$w = w_Э = \frac{Cu^2}{2} = \frac{qu}{2} = \frac{q^2}{2C} \qquad (4.8)$$

generator va zaryadlanayotgan kondensator orasidagi *energiya almashinuvi* bilan bog‘liq. Generatordan har onda uzatilayotgan quvvat, ya’ni uning oniy qiymati tok va kuchlanishlar oniy qiymatlarining ko‘paytmasiga teng

$$p = ui = dw_Э / dt. \qquad (4.9)$$

Quvvatning yuqorida keltirilgan ixtiyoriy bog‘lanishlaridan shuni ko‘rish mumkinki, u kuchlanish chastotasidan ikki marta katta bo‘lgan chastota bilan o‘zgarar ekan

$$p = u \cdot i = -C\omega U_m{}^2 \cos\omega t \cdot \sin\omega t = -\frac{CU^2{}_m}{2}\omega \cdot \sin 2\omega t. \qquad (4.10)$$

Quvvat (p_{SS}) va energiyaning (w_E) grafigi 4.4,*g*-rasmda keltirilgan. Shunga e’tibor berish zarurki, kuchlanish va tokning ishoralari bir xil bo‘lganda, quvvat musbat, tok va kuchlanish ishoralari har xil bo‘lganda-manfiy va tok yoki kuchlanishning qiymatlari nolga teng bo‘lganda, quvvat ham nolga tengdir. Bir *T* davr o‘tishi bilan kondensator energiyasi ilgarigi qiymatiga teng bo‘ladi. Shu sababdan, generatordan kondensatorga bir davr ichida uzatilayotgan o‘rtacha quvvat nolga teng

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,dt = 0 \qquad (4.11)$$

Bunda, o‘zgaruvchan toklar nazariyasida qabul qilingan belgilashlarga muvofiq, o‘rtacha (bir davr ichidagi) quvvat bosh xarf «*P*» bilan belgilandi. O‘rtacha quvvatning nolga tengligi, uning aynan sinusoidal funksiya ekanligidan kelib chiqadi.

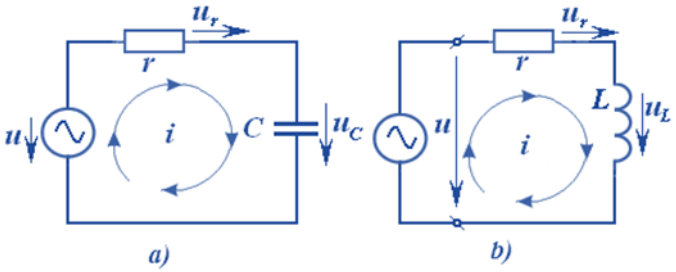
C,r - zanjir. *C* kondensatorga rezistor *r* ketma-ket ulangan bo‘lsin. Bunday zanjirlar (4.5,*a*-rasm) aksariyat, elektron sxemalarda ko‘p uchraydi.

Kondensator kuchlanishi quyidagicha o‘zgaradi, deb faraz qilaylik

$$u_C = U_{Cm}\sin\omega t\,. \qquad (4.12)$$

Bunday vaziyatda ushbu zanjirdan

$$i=\frac{Cdu_C}{dt}=C\omega U_{Cm}\cdot\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)=I_m\cos\omega t=I_m\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right) \qquad (4.13)$$



4.5-rasm. ***C* va *L* elementli zanjirda o‘zgaruvchan tok**

tok oqib o‘tadi. Tokning qiymati ma’lum bo‘lgani uchun rezistor *r* dagi kuchlanishni Om qonuni asosida aniqlash mumkin

$$u_r=ri=rI_m\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right) \qquad (4.14)$$

KKQ asosida *C*-*r* li zanjirning kirishidagi kuchlanish

$$u=U_m\sin(\omega t+\beta)=u_r+u_C=I_m\cdot r\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)+\frac{I_m}{\omega C}\sin\omega t. \qquad (4.15)$$

Bu yerda kondesatordagi kuchlanish amplitudasi (4.7) tenglikdagi tokning amplitudasi orqali ifodalangan.

Trigonometrik (4.4.) o‘zgartirishlar yordamida quyidagicha yozish mumkin

$$U_m=I_m\sqrt{r^2+1/(\omega C)^2}=\sqrt{U_{rm}^2+U_{Cm}^2} \qquad (4.16)$$

$$tg\beta=r\cdot\omega\cdot C \qquad (4.17)$$

Qarshilik r dagi quvvat isrofi. O‘zgaruvchan tok $i=I_m\sin\omega t$ qarshilik *r* orqali oqib o‘tganda, unda Joul-Lens qonuniga binoan quvvat ajralib chiqadi

$$p=u_R\cdot i=i^2\cdot r \qquad (4.18)$$

Bir davrdagi o‘rtacha quvvat tokning o‘rtacha kvadratik qiymati orqali ifodalanadi

$$P=I^2\cdot r, \qquad (4.19)$$

bunda *P*, I^2 - quvvat va tokning o‘rtacha kvadratik qiymati.

Garmonik tokli *r* rezistor uchun

$$P = I^2{}_m \cdot (\sin^2 \omega t) \cdot r = \frac{1}{2} I_m{}^2 (1 - \cos 2\omega t) \cdot r \qquad (4.20)$$

Biroq, garmonik funksiya *cos2ωt* ning bir davr mobaynida o‘rtacha qiymati nolga teng.

Shuning uchun *r* dagi o‘rtacha quvvat

$$P = \frac{1}{2} I_m^2 \cdot r. \qquad (4.21)$$

4.3. Davriy miqdor ta’sir etuvchi (effektiv) qiymati

Garmonik funksiyalarda *o‘rtacha kvadratik* qiymatni *ta’sir etuvchi* yoki *effektiv* qiymat deyiladi. Bunday nomlashni quyidagicha tushuntirish mumkin. Joul-Lens qonunidagi kabi, har qanday kattalik oniy qiymatlarining kvadratiga proporsisional bo‘lganda u *o‘rtacha hisobda* har doim *ta’sir etuvchi* (*effektiv*) qiymatning kvadratiga proporsionaldir. O‘rtacha kvadratik qiymat bosh harf bilan hyech qanday qo‘shimcha indekslarsiz belgilanadi.

Tokning o‘rtacha kvadratik qiymati

$$I = \sqrt{i^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}; \qquad (4.22)$$

kuchlanishning o‘rtacha kvadratik qiymati

$$U = \sqrt{u^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \qquad (4.23)$$

va h.k.

(4.19) va (4.21)dan ko‘rinadiki, garmonik funksiyalar uchun o‘rtacha kvadratik qiymatlar amplitudani $\sqrt{2}$ ga bo‘linganiga teng, ya’ni

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \ , \qquad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \ . \qquad (4.24)$$

Shunday qilib, (4.21) o‘rniga quyidagi yozish mumkin

$$P = I^2 \cdot r. \qquad (4.25)$$

Qarshilik *r* orqali o‘zgarmas tok oqib o‘tganda, amplitudasi $I_m = I\sqrt{2}$

bo‘lgan garmonik tok oqib o‘tgandagi kabi ta’sir bir xil bo‘ladi.

4.4. Induktivlik va rezistori bo‘lgan zanjirda o‘zgaruvchan tok

Ikki o‘tkazgichli l uzunlikdagi, uzunlik birligining qarshiligi r_0 va induktivligi L_0 bo‘lgan havo liniyasini ko‘raylik. Liniya boshida generator ulangan, ketida esa qisqa tutashgan bo‘lsin. Bunday liniya qarshiligi $r=r_0 \cdot l$, induktivligi $L = L_0 \cdot l$ ga teng bo‘lgan ketma-ket r va L zanjirning o‘zgaruvchan tok generatoriga ulangan sxemasini (4.5,*b*-rasm) anglatadi.

Agar liniyadan $i = I_m \sin\omega t$ tok oqib o‘tayotgan bo‘lsa, unda generatorning kuchlanishi quyidagicha

$$u = u_r + u_L = ir + L di/dt \tag{4.26}$$

yoki

$$u = rI_m \sin\omega t + I_m \omega L \sin(\omega t + \pi/2) \tag{4.27}$$

bo‘ladi.

Ikki garmonik funksiyaning yig‘indisi uchun (4.4)da keltirilgan trigonomet-rik o‘zgartirishlarni qo‘llab, generator kuchlanishini

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi),$$

va uning amplitudasini

$$U_m = I_m \sqrt{r^2 + (\omega L)^2} \tag{4.28}$$

aniqlaymiz. Tok fazasi kuchlanishdan φ burchakka kechikadi, bunda

$$\varphi = \omega L / r \tag{4.29}$$

Quvvat. Generatordan zanjirga uzatilayotgan quvvatning oniy qiymati tok va kuchlanishlar oniy qiymatlarining ko‘paytmasiga teng

$$p = u \cdot r = U_m \sin(\omega t + \varphi) \cdot I_m \sin\omega t = \frac{1}{2} U_m I_m [\cos\varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] \tag{4.30}$$

Tenglikning o‘ng tomoni shuni anglatadiki, quvvatning tarkibida o‘zgarmas tashkil etuvchisi mavjud ekan. Uning qiymati esa o‘rtacha quvvatga teng

$$P = \frac{1}{2} U_m I_m \cos\varphi = UI \cos\varphi \tag{4.31}$$

Bu ifodani kuchlanish va tok orasidagi fazalar farqi φ ga teng bo‘lgan barcha zanjir quvvatlari uchun qo‘llash mumkin.

Ikki marta katta chastota bilan pulslanuvchi quvvatning qiymati $\cos(2\omega t+\varphi)$ ga proposional bo‘lib, uning o‘rtacha qiymati nolga teng. Uning mavjudligini qarshilikda isrof bo‘luvchi quvvat (i^2r) o‘zgarmas bo‘lmasligi va, shu bilan birga, magnit maydon energiyasi ($Li_2/2$) uzluksiz o‘zgarib turishi bilan tushuntirish mumkin.

(4.30) ifodani energetik jarayon orqali ham isbotlash mumkin. Darhaqiqat,

$$p=i^2r+\frac{d}{dt}\left(\frac{Li^2}{2}\right) \tag{4.32}$$

uchun tokning qiymati $i=I_m\sin\omega t$ bo‘lganda (4.32) tenglikning o‘ng tomoni oddiy o‘zgartirilishi natijasida (4.30)ga yoki shunga o‘xshash bog‘lanishga olib kelishi mumkin

$$p=\frac{1}{2}rI_m{}^2(1-\cos2\omega t)+\frac{1}{2}I_m{}^2\omega L\sin2\omega t=p_r+p_L, \tag{4.33}$$

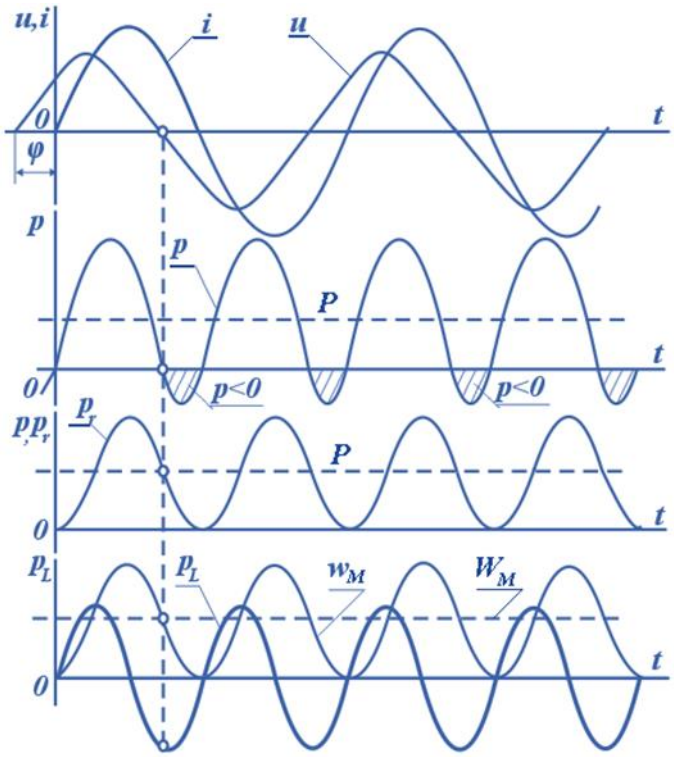
bunda $p_r=i^2r;\quad p_L=\frac{d}{dt}\left(Li^2/2\right)$.

4.6-rasmda tok, kuchlanish, quvvatning oniy qiymatlari, quvvatning ikki tashkil etuvchilari va magnit maydon energiyasining grafigi keltirilgan. Punktir chiziqlar bilan quvvatning o‘rtacha qiymatlari (P) va magnit maydon energiyasining o‘rtacha qiymatlari ko‘rsatilgan

$$w_m=\left(Li^2/2\right)=LI^2/2 \tag{4.34}$$

Grafiklar tahlilida quyidagi xususiyatlarga e’tiborni qaratish mumkin:

1) kuchlanishning oniy qiymati nolga teng bo‘lganda ham, tokning oniy qiymati nolga teng bo‘lganda ham, quvvatning shu onlardagi qiymati nolga aylanadi. Generator uzatayotgan quvvati ushbu onlarda (u=0, $i\neq0$ yoki i=0, $u\neq0$) nolga teng bo‘lganda ham, aktiv qarshilikdagi ajralayotgan quvvat ($p_r=i^2r$) nolga teng emas. Bu, yuzaki qaragandagi nomuvofiqlik faqat elektromagnit maydon energiyasining almashinuvi hisobiga shunday bo‘ladi: shu onlarda p_L manfiy va u absolyut qiymati bo‘yicha quvvat p_r ning musbat qiymatiga teng;



4.6-rasm. **O‘zgaruvchan tok zanjirida energiya tebranishi**

2) p_L ning o‘rtacha qiymati nolga teng bo‘lgani uchun, hamma quvvatning o‘rtacha qiymati aktiv qarshilikda sarflanayotgan quvvatning o‘rtaga qiymatiga teng;

3) o‘zgaruvchan magnit maydoni uzatayotgan quvvat (ya’ni p_L) rezistor qarshiligida sarflanayotgan kuvvatdan (p_r) katta bo‘lgan vaqt oralig‘ida (4.6-rasm), o‘zgaruvchan tok generatori berayotgan quvvat manfiy (p<0) bo‘ladi.

Shunga o‘xshash tahlilni *r*-*C* zanjiri uchun mustaqil bajarilsa, o‘quvchi uchun katta foydali bo‘ladi.

4.5. Induktivlik, sig‘im va rezistorli zanjirda o‘zgaruvchan tok

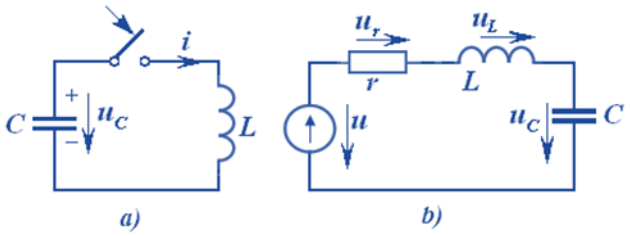
Tarkibida induktivlik (L) bilan birga sig‘im (C) bo‘lgan o‘zgaruvgan tok zanjirlarini o‘rganish alohida qiziqish uyg‘otadi, chunki L va C elementlari tebranma kontur hosil qiladi: sig‘imdagi energiya $w_C = Cu_C^2/2$ kamayish onida, induktivlikdagi $w_m = Li^2/2$ energiya ortadi, davrning keyingi yarmida bu jarayon teskarisiga qaytariladi. Oldindan zaryadlangan kondensatorli *L*-*C* kontur (4.7,*a*-rasm) ideallashtirilgan, ya’ni isrofsiz (r=0) bo‘lsa, kalit ulangandan so‘ng

L-C konturda «so‘nmas» energiya tebranishlari hosil bo‘ladi. Rasmda tanlangan musbat tok yo‘nalishi kondensatorning razryadlanishiga mos keladi, shuning uchun

$$i = -C du_C/dt \tag{4.35}$$

Lekin KKQ asosida, ixtiyoriy tanlab olingan on uchun kondensator kuchlanishi u_C miqdori induktivlikdagi u_L kuchlanishga teng bo‘lishi shart $u_C = u_L = Ldi/dt$; shu sababli keyingi tenglama o‘ng tomonidagi tokni (4.35)dagi u_C orqali ifodalasak, quyidagi hosil bo‘ladi

$$u_C = -LC\frac{d^2u_C}{dt^2}. \tag{4.36}$$



4.7-rasm. **Erkin tebranishlarni hosil bo‘lishi**

Bu tenglamaga quyidagi garmonik funksiya mos keladi

$$u_C = U_0 \cos\omega_0 t \tag{4.37}$$

bunda U_0 - kondensator kuchlanishining boshlang‘ich vaqt uchun qiymati $U_C(0)=U_0$. (4.37)dagi u_C ni (3.36)ga qo‘ysak, quyidagini aniqlaymiz

$$U_0 \cos\omega_0 t = LC\omega_0^2 U_0 \cos\omega_0 t$$

ya’ni quvvat isrofi bo‘lmagan zanjirdagi erkin so‘nmas garmonik tebranish xususiy burchak chastotasi quyidagicha aniqlanadi

$$\omega_0^2 LC = 1 \text{ yoki } \omega_0 = 1/\sqrt{LC} \tag{4.38}$$

Real zanjirlarda aktiv qarshilik mavjud ($r\neq 0$) va unda sarf bo‘layotgan energiya mavjudligi sababli, tebranishlar so‘nuvchan bo‘ladi.

Endi tarkibida L-r-C bo‘lgan ketma-ket ulangan kontur, ω chastotali garmonik kuchlanish manbaiga ulangandagi holatni ko‘raylik. Tok chastotasi ω konturning xususiy chastotasi ω_0 ga teng bo‘lgan ($\omega=\omega_0$) rezonans holatda

(4.7,*b*-rasm) *L* va *C* elementlarda, yuqorida ko‘rsatilganidek, energiya tebranishlari hosil bo‘ladi; manbadan kelayotgan energiya esa *r* qarshilikdagi ajralayotgan energiya isrofiga sarflanadi.

Konturda $\omega=\omega_0$ (ya’ni, $\omega_0^2 LC=1$ yoki $\omega L=1/\omega C$) bo‘lganda, induktivlik va sig‘imdagi kuchlanishlar hamma vaqt bir birini kompensasiyalaydi, $\varphi=0$ va $\cos\varphi=1$ bo‘lganligi sababli manbaning hamma kuchlanishi qarshilik *r* ga qo‘yilgan bo‘ladi, ya’ni $u=u_r$. Bu xolatni zanjirning umumiy tenglamasidan ko‘rish mumkin

$$u=u_L+u_r+u_C=L\frac{di}{dt}+ri+u_C \tag{4.39}$$

4.7,*b*-rasm zanjirida tok $i=Cdu_C/dt$, chunki yuqorida tanlangan tokning musbat yo‘nalishida tok kondensatorni zaryadlaydi va uning kuchlanishini ko‘paytiradi.

(4.39) tenglamaning o‘ng tomonidagi qiymatlarni kondensator kuchlanishi orqali ifodalasak, quyidagi tenglama hosil bo‘ladi

$$u=LC\frac{d^2u_C}{dt^2}+RC\frac{du_c}{dt}+u_c \tag{4.40}$$

Kondensatordagi kuchlanish ifodasi $u_C=U_{Cm}\cos\omega t$ deb faraz qilib tenglamani differensiallasak, quyidagi yechimlarni olamiz

$$\left.\begin{aligned} u_L&=-LC\omega^2U_{Cm}\cos\omega t;\\ u_r&=-r\omega CU_{Cm}\sin\omega t. \end{aligned}\right\} \tag{4.41}$$

KKQ binoan, manba kuchlanishi uchchala elementlar kuchlanishlari yig‘indisiga teng

$$u=U_m\cos(\omega t+\beta)=U_{Cm}(1-LC\omega^2)\cos\omega t-U_{Cm}r\omega C\cdot\sin\omega t \tag{4.42}$$

Rezonans bo‘lganda $U_L+U_C=0$, ya’ni $1-LC\omega^2=0$ bo‘lgani uchun manbaning kuchlanishi *r* qarshilikdagi kuchlanishga teng

$$u=u_r=-U_{Cm}r\omega C\cdot\sin\omega t. \tag{4.43}$$

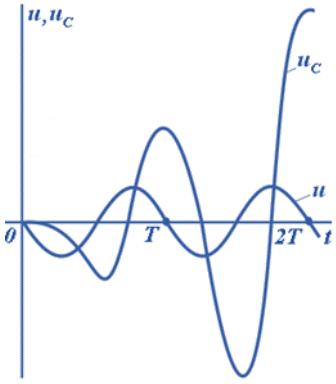
Shu sababli, kondensatordagi kuchlanishning amplitudasi bilan manba kuchlanishining amplitudasi quyidagi bog‘lanishda bo‘ladi

$$U_m = U_{Cm} \cdot r \cdot \omega \cdot C. \qquad (4.44)$$

Bu ifodadan radiotexnika asosini tashkil etgan ajoyib xulosa kelib chiqadi, ya’ni $r\omega C$ ning qiymati birdan kichik ($r\omega C < 1$) bo‘lganda kondensatordagi kuchlanish amplitudasi manba kuchlanishining amplitudasidan bir necha marta, ba’zida o‘nlab, yuzlab marta katta bo‘lishi mumkin.

Tebranish tizimida tebratuvchi kuch chastotasi xususiy chastotaga teng bo‘lgandagi ($\omega = \omega_0$) tebranishning bir maromda juda katta amplitudalargacha (rezonans) oshib borishini oddiy arg‘imchoq misolida har birimiz ko‘rganmiz. Avval, kichik bo‘lgan kuch ta’sirida tebranma tizim muvozanat xolidan ozgina og‘ishi ko‘riladi. Davriy bo‘lgan kuch (xususiy chastota bilan) ta’sirida tebranishlar amplitudasi ortib boradi. Rezonans tizimlari amplitudalarining oshib borishi mana shunday kichik kuchlar ta’siri yig‘ililgan jarayoniga o‘xshash bo‘ladi.

4.8-rasmda L, r, C konturni t=0 vaqtdagi $u = -U_m \sin \omega t$ kuchlanishli manbaga ulangandagi (LrC=0,002) tebranishlarning bir maromda ortib borishining grafigi keltirilgan.



4.8-rasm. ***L, r, C* konturda tebranishlar**

Ikkinchi davrning tugashidayoq kondensatordagi kuchlanishning maksimal qiymati manba kuchlanishi amplitudasining qiymatidan taxminan 6 marta ortganligini ko‘rish mumkin. Barqarorlik jarayonida esa - kuchlanish ekstremumining ortishi tugagandan so‘ng, kondensator kuchlanishi

amplitudasining qiymati manbanikiga nisbatan $1/\omega rC$=500 marta ortiq ekanligini ko‘ramiz.

Sig‘im kuchlanishi amplitudasining ortib borish jarayonida, tokning har bir davrida manbadan konturga kelayotgan energiya qisman aktiv qarshilikda isrof bo‘lsa, qisman tebranish konturida (L va Cda yig‘ilayotgan) energiyaning oshirib borishiga sarflanadi.

Barqarorlashgan rejimda esa tebranishlar amplitudasining ortishi tugaydi va manbadan kelayotgan quvvat $p=u\cdot i$ ixtiyoriy olingan vaqt uchun qarshilikdagi quvvat isrofi $u_R i=i^2 r$ ga teng.

4.6. O‘zgaruvchan tok zanjiri uchun Kirxgof qonunlari

Yuqorida ko‘rsatilganidek L,r,C zanjir ixtiyoriy elementidagi kuchlanish potensiallar farqi sifatida keltirilishi mumkin. Shuning uchun bu elementlarning ikki nuqtalari orasidagi kuchlanishni ham potensiallar farqi deb ko‘rsatish mumkin. Mana shu Kirxgofning ikkinchi qonunini tatbiq etish shartidir.

Masolan, 4.9-rasmda keltirilgan zanjir sxemasi uchun manba (generator) kuchlanishi quyidagicha yoziladi

$$u_\Gamma = u_{ad} = u_{ab} + u_{bd} \quad \text{va} \quad u_{bd} = u_{bc} + u_{cd}, \qquad (4.45)$$

bunda $u_{mn}=\varphi_m-\varphi_n$.

Bu tengliklarning tashkil etuvchilari o‘rnida potensiallar va kuchlanish-larning oniy qiymatlari nazarda tutilmoqda. Har bir shoxobcha uchun alohida, masalan, ab shoxobcha uchun (4.9-rasm) kuchlanish quyidagi yig‘indi sifatida keltirilishi mumkin

$$u_{ab}=u_r+u_L+u_C,$$

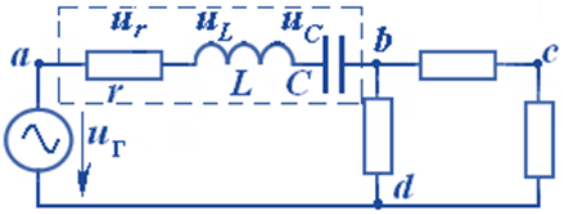
bunda $u_r=i\cdot r;\quad u_L=L\,di/dt;\quad i=C\,du_C/dt$

yoki $$u_C=\frac{q}{C}=\frac{1}{C}\int i dt.$$

Garmonik tokli zanjirlarda faqat barqarorlik rejimini ko‘rganda shunga iqror bo‘lish mumkinki, bu toklarga aynan shu chastotali garmonik

kuchlanishlar mos kelar ekan. Bunda (4.26), (4.27)larni *differensiallash* yoki (4.15)ni *integrallash* natijalari funksiya boshlang‘ich fazasini $+\pi/2$ *yoki* $-\pi/2$ *burchakka siljishiga olib kelar ekan* va amplitudaning qiymati ω marta ko‘payishi yoki kamayishiga sabab bo‘lar ekan.

Ushbu mulohazalar L, r, C parametrlar faqat o‘zgarmas bo‘lganida haqlidir.



4.9-rasm. **Kuchlanishlar yig‘indisi**

Tarmoqlangan zanjirni taxlil qilganda va hisoblaganda KTQ tadbiq etilishi zarur. O‘zgaruvchan tokli zanjirlarga uni qo‘llash mumkinmi? Mumkin bo‘lsa, zanjir qanday shartlariga javob berishi lozim?

KTQ - bu elektr miqdori saqlanish qonunidir, elektr zanjirlari nazariyasi tilida esa bu quyidagicha ta’riflanadi: tugunda birlashayotgan hamma shoxobchalar toklari algebraik yig‘indisi shu tugun zaryadining o‘zgarish tezligiga teng. O‘zgarmas tokli zanjirda tugunlardagi zaryadlar ko‘payishi yoki kamayishi mumkin emas, chunki zaryadlar miqdori o‘zgarganda tugunlar potensiali ham o‘zgarishi zarur edi. O‘zgaruvchan tokli zanjirda esa, agar ushbu tugun boshqa tugunga nisbatan biror sig‘imga ega bo‘lsa, u holda tugun zaryadi o‘zgarishi mumkin.

4.10-rasmdagi «1» tugunda i_a, i_b va i_c toklar olib kelayotgan zaryad ortayapti deb faraz qilaylik. Unda zaryadlar saqlanishi qonuniga asosan

$$dq_1/dt = i_a + i_b + i_c. \qquad (4.46)$$

Agar biror tugun (masalan «1») zaryadi ortayotgan bo‘lsa, u holda boshqa («2» yoki «3») tugunlarning zaryadlari shunday kamayishi lozimki, unda quyidagi tenglik bajarilishi shart

$$dq_1/dt = -dq_2/dt - dq_3/dt.$$

Bunda faqat, zanjirda elektr miqdori saqlanish qonuni buzilmaydi, degan shart bajarilishi lozim

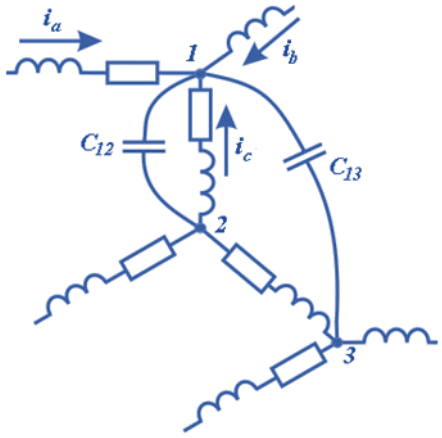
$$\frac{d}{dt}\sum q_n = 0.$$

Demak ushbu xolatda 1 va 2 hamda 1 va 3 tugunlar orasida C_{12} va C_{13} sig‘imlar mavjud bo‘lishi zarur ekan; bu sig‘imlarni ushbu tugunlar orasiga ulangan kondensatorlar sifatida ko‘rsatish mumkin (4.10-rasm). Shuning uchun, «1» tugun uchun *a*, *b*, *s* shoxobchalardan tashqari, «1» tugunga ulanayotgan (aslida mavjud bo‘lmagan) yana ikki kondensatorli C_{12} va C_{13} ikki shoxobchani e’tiborga olish zarur. Ushbu shoxobchalar orqali «1» tugundan

$$i_{C12} = C_{12}du_{12}/dt \quad \text{va} \quad i_{C13} = C_{13}du_{13}/dt$$

toklari oqadi. Shu sababli, (4.46) zaryadning saqlanish qonunini «1» tugunga tatbiq etsak, qo‘yidagini aniqlaymiz

$$i_a + i_b + i_c = dq_1/dt = C_{12}du_{12}/dt + C_{13}du_{13}/dt.$$



4.10-rasm. ***L,C* larni murakkab ulanishi**

Shunday qilib, KTQga qaytdik. Uning o‘zgaruvchan toklar zanjiri uchun ta’rifi quyidagicha bo‘ladi: tugunga kelayotgan toklarning yig‘indisi, tugundan qaytayotgan toklar yig‘indisiga teng. Ushbu qonun faqat sig‘imlarni zaryadlovchi toklarni hisobga olgandagina o‘z kuchini saqlab qoladi.

4.7. Oddiy garmonik funksiyalar ustida matematik amallar, geometrik usul

Chiziqli elektr zanjirlarini hisoblashda ko‘p martalab ularni qo‘shish, ayirish, u yoki bu o‘zgarmas qiymatlarga ko‘paytirib integrallash va

differensialash amallarini bajarishga to‘g‘ri keladi.

Eng oddiy holatlarda, berilgan funksiyalar bir hil chastotaga ega bo‘lsa, yuqorida ko‘rsatilgan hamma chiziqli operasiyalar natijasida shu chastotali garmonik funksiya hosil bo‘ladi. Demak, funksiyaning faqat amplitudasi va boshlang‘ich fazalari aniqlansa kifoya.

Ikki gapmonik funksiyani qo‘shish (yoki ayirish) uchun (4.4)ga o‘xshash trigonometrik o‘zgartirishning analitik ifodalarini qo‘llash mumkin. Bunday o‘zgartirishlarning geometrik talqini har doim amallarning ko‘rgazmali, har xil qiymatlarni keltirib chiqarish hulosalarining sodda bo‘lishini ta’minlaydi, hamda vujudga kelishi mumkin bo‘lgan hatolarning oldini olishga imkon beradi. Geometrik usuldan keyin ko‘riladigan kompleks usul esa yanada kattaroq imkoniyatlar borligini ko‘rsatadi.

Tekislikdagi A vektorni uning uzunligi $|A|$ va boshlang‘ich hisob uchun tanlangan ixtiyoriy o‘q bilan shu vektor orasidagi σ burchagi orqali ifodalash mumkin (4.11,*a*-rasm). Bu burchakning musbat ishorasiga shu vektorning soat miliga teskari yo‘nalishdagi burilishi mos keladi. Bunda vektorning

$$A=A\angle\sigma, \qquad (4.45)$$

kabi belgilanishi qulay hisoblanadi. A va σ - *qutb koordinatalari* yoki *moduli* va *argumenti* deyiladi.

Bosma nashr (kitob yoki maqolalarda) vektorlarni quyuq shriftli bosh harf bilan (***A***), qo‘lyozma matnlarda quyuq bo‘lmagan bosh harf yuqorisiga gorizantal chiziqcha chizib belgilash qabul qilingan ($\bar{A}$).

Agar argument vaqtning chiziqli funksiyasi bo‘lsa

$$\sigma=\alpha+\omega t, \qquad (4.46)$$

u holda boshlang‘ich o‘qqa vektorning proyeksiyasi kosinusoida sifatida berilgan garmonik funksiyaning oniy qiymatini ko‘rsatadi

$$\alpha=A\cos(\omega t+\alpha). \qquad (4.46,\ a)$$

Unga perpendikulyar bo‘lgan o‘qqa vektorning proyeksiyasi esa sinusoida bilan ko‘rsatilgan garmonik funksiyaning oniy qiymatiga teng

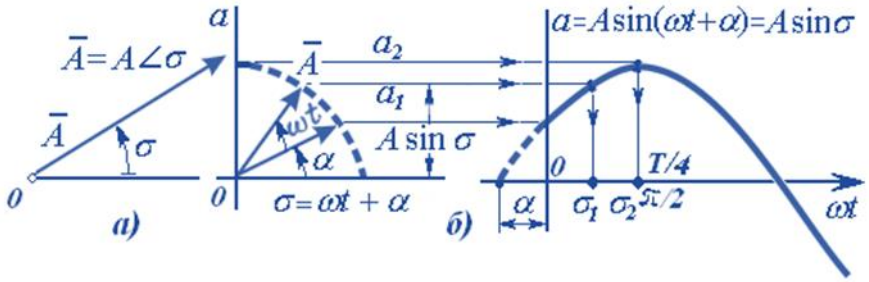
$$\alpha=A\sin(\omega t+\alpha). \qquad (4.46,b)$$

Sinusoidani (yoki kosinusoidani) aylanuvchi vektor proyeksiyalari yordamida ifodalash ana shunga asoslangan (4.11,*b*-rasm).

Vektor *A* ni garmonik funksiya «*a*»ning *tasviri* deb atash mumkin. Agar chastota ω berilgan bo‘lsa $A = A\angle\varphi$ vektori barcha kerakli axborotni o‘z ichiga olgan bo‘ladi: uning moduli - garmonik funksiya «*a*»ning amplitudasini, argumenti - boshlang‘ich fazasini anglatadi.

Garmonik funksiyalar oniy qiymatlarining yig‘indisini vektorlar tasvirlari-ning yig‘indisi orqali almashtirish mumkin. Chunki vektorlar yig‘indisining proyeksiyasi vektorlar proyeksiyalarining yig‘indisiga teng.

Garmonik funksiyalarni tasvirlovchi vektorni geometrik qurish, hamda vektorlarni grafik qo‘shish *vektor diagrammasi* deyiladi. Bunday diagrammalar yechimning yo‘llarini ko‘rgazmali qilib tushuntiradi. Vektorlarni aniqlik bilan qurish natijasida izlanayotgan (aniqlanishi zarur bo‘lgan) amplituda va fazani topish mumkin. Taxminiy vektor diagrammalarini qurish analitik hisoblashning ishonchli tekshiruvi bo‘lishi mumkin va vektorlarning qaysi kvadrantda bo‘lishi lozimligini oson yo‘l bilan aniqlash imkonini beradi



4.11-rasm. **Sinusoidani aylanuvchi vektor**

4.8. Kompleks (simvolik) usul

Yuqorida bayon etilgan yechimlarni aniqlashdagi geometrik usul, aksariyat hollarda sermehnat ekanligi ko‘rinib turibdi; muhimi, undan foydalanish natijasida zanjirning tenglamalarini umumiy holda yozib olish va uni tahlil qilish ko‘p qiyinchiliklarga sabab bo‘ladi.

Shuning uchun amerikalik olim Shteynmets tomonidan mukammal qilib ishlab chiqilgan kompleks usulini barcha elektrotexniklar qabul qilganlar. Bu

usul *simvolik usul* deb ataladi.

Usulning asoslanishi. Berilgan garmonik funksiya

$$a=A_m \sin(\omega t+\alpha) \qquad (4.47)$$

ni kompleks son sifatida tasvirlash imkoniyatini ko‘raylik. Buning uchun *vaqtning kompleks garmonik funksiyasi* «$\tilde{a}$» tushunchasini kiritamiz

$$\tilde{a} = A_m e^{j(\omega t+\alpha)} = A_m[\cos(\omega t+\alpha) + j\sin(\omega t+\alpha)], \qquad 4.48)$$

bunda eksponenta Eyler trigonometrik funksiyalari ifodasi orqali keltirilgan.

Kompleks garmonik funksiya «$\tilde{a}$»ning mavhum qismi, ya’ni $Im\tilde{a}$ vaqtning quyidagi garmonik funksiyasiga aynan tengdir

$$a = Im\tilde{a} = ImA_m e^{J(\alpha+j\omega t)} \qquad (4.49)$$

Ko‘rsatkichli funksiyani

$$A_m e^{j\alpha} = A_m \angle\alpha = \dot{A}_{\mathrm{m}} \qquad (4.50)$$

deb qabul qilib, yanada soddaroq qilib yozish mumkin

$$a = Im\dot{A}_m e^{j\omega t} \qquad (4.49, a)$$

$\dot{A}_m$ qiymatni «*a*» *garmonik funksiyani tasvirlovchi kompleks* deyiladi. Tasvirlovchi kompleks quyidagi effektiv qiymat orqali ifodalanishi xam mumkin

$$\dot{A}_m = \dot{A}_m/\sqrt{2} = A\cdot e^{j\alpha} = A\angle\alpha \qquad (4.51)$$

(oxirgi holatda bosh xarf ketiga «*m*» indeksi qo‘yilmaydi).

Agarda $\omega=2\pi\cdot f$ chastota qiymati ma’lum bo‘lsa, u holda kompleks $\dot{A}$ yoki $\dot{A}_m$ unga aynan o‘xshash garmonik funksiya xaqida to‘liq axborot bera oladi. Bu funksiyaning «*a*» oniy qiymatini topish uchun $\dot{A} = A\cdot e^{j\alpha}$ kompleksni $\sqrt{2}$ va $e^{j\omega t}$ ga ko‘paytirish va olingan natijaning

$$a = A\sqrt{2}\cdot\sin(\omega t+\alpha) = \mathrm{Im}(A\sqrt{2}\cdot e^{j\alpha}\cdot e^{j\omega t}) \qquad (4.52)$$

mavhum qismini aniqlash zarur.

Garmonik funksiyani kompleks tasvirga tenglashtirib bo‘lmaydi; faqat

ularning mos kelishligi to‘g‘risida gapirish va quyidagicha yozish mumkin $a \sim \dot{A}$, bunda «~» o‘xshashlik belgisidir.

Adabiyotlarda tok *i*, kuchlanish *u* va boshqa garmonik funksiyalarning kompleks shakldagi yozuvi o‘zgaruvchining katta harfdagi belgisi ustiga nuqta qo‘yish bilan ($\dot{I},\dot{U}$ va h.k.) amalga oshiriladi.

Garmonik funksiyalarni qo‘shish. Ikki garmonik funksiya «*a*» va «*b*» larning yig‘indisi «C»ni aniqlash lozim bo‘lsin

$$a+b=\mathrm{Im}\tilde{a}+\mathrm{Im}\tilde{b}=c=\mathrm{Im}\tilde{c}, \qquad (4.53)$$

bunda $\tilde{b}$ va $\tilde{c}$ – mos ravishda kompleks garmonik funksiyalar.

Biroq, ikki kompleks sonlar mavhum qismlarining yig‘indisi komplekslar yig‘indilarining mavhum qismiga teng, shuning uchun

$$a+b=\mathrm{Im}(\tilde{a}+\tilde{b}), \qquad (4.54)$$

yoki, agar qo‘shiluvchilarning chastotalari teng bo‘lsa

$$a+b=\mathrm{Im}[(A_m+B_m)e^{j\omega t}], \qquad (4.55)$$

va (4.54) va (4.53) ni solishtirsak, quyidagi aniqlanadi

$$c=C_m e^{j\omega t}=(A_m+B_m)e^{j\omega t}$$

yoki $$\dot{C}_m=\dot{A}_m+\dot{B}_m, \qquad (4.56)$$

ya’ni bir xil chastotali *garmonik funksiyalar yig‘indisini ifodalovchi kompleks - qo‘shiluvchilarni ifodalovchi komplekslarning yig‘indisiga teng*; shunday qilib, oniy qiymatlarni qo‘shish amallarini kompleks tasvirlarni qo‘shish bilan almash-tirish mumkin. Tenglik (4.56)ni $\sqrt{2}$ ga bo‘lish bilan quyidagi yig‘indining to‘g‘ri ekanligini isbotlash mumkin

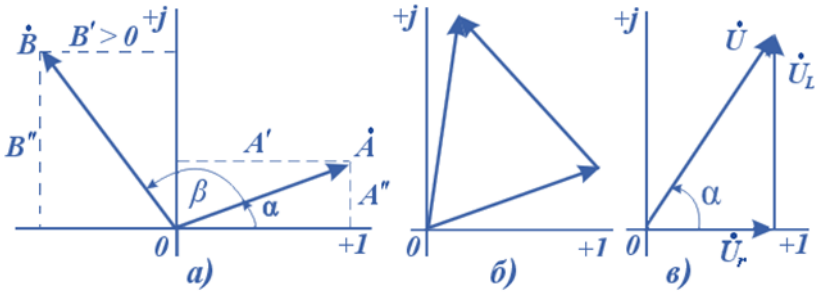
$$\dot{C}=\dot{A}+\dot{B} \qquad (4.57)$$

Kompleks tekislik. Har qanday ixtiyoriy olingan komleks $\dot{A}$ va $\dot{B}$ sonlar uchun ikki ortogonal koordinata o‘qlaridan biriga haqiqiy qiymatlar, ikkinchisiga mavhum qiymatlar qo‘yilgan tekislikda (4.12,*a*-rasm) konkret

nuqtalar mos keladi. Bunda kompleks $\dot{A}$ va $\dot{B}$ sonlar tekislikdagi kompleks koordinata boshidan shu nuqtalarga o‘tkazilgan vektorlar sifatida taqdim etiladi

$$\left.\begin{aligned}\dot{A} &= A' + jA'' = A(\cos\alpha + j\sin\alpha);\\ \dot{B} &= B' + jB'' = B(\cos\beta + j\sin\beta)\end{aligned}\right\} \qquad (4.58)$$

uning haqiqiy va mavhum tashkil etuvchilari ikki koordinata o‘qlariga shu vektorning proyeksiyasi sifatida aniqlanadi.



4.12-rasm. **Kompleks tekislik**

Keltirilgan komplekslar qutb koordinatalarida ham ifodalanishi mumkin

$$\left.\begin{aligned}\dot{A} &= Ae^{j\alpha} = A\angle\alpha;\\ \dot{B} &= Be^{j\phi}\angle\beta,\end{aligned}\right\} \qquad (4.59)$$

bunda $\dot{A} = Ae^{j\alpha} = A\angle\alpha;$ A va B kompleks moduli (vektorlar uzunligi); α, β - argument (xaqiqiy o‘qga nisbatan vektorlarning burilganlik burchagi).

Ikki kompleks yig‘indisini aniqlashda har doim algebrik ikki hadlik shakliga o‘tish maqsadga muvofiqdir

$$\dot{A} = A' + jA'', \quad \dot{B} = B' + jB''$$

so‘ngra alohida haqiqiy va alohida mavhum hadlar yig‘indilari aniqlanadi

$$\dot{C} = \dot{A} + \dot{B} = C' + jC'' = (A' + A'') + j(B' + B'') \qquad (4.60)$$

Shunday qilib, garmonik funksiyalarni qo‘shish amali bajarilishida kompleks usulni qo‘llash (4.12,*b*-rasm), geometrik usuldan farq qilmas ekan. Bunda

(4.58) va (4.60) tengliklardan uzviy ravishda (4.4) trigonometrik bog‘lanishlar ham kelib chiqadi.

Kompleks usuldan foydalanganda vektor diagrammalarini qurish tavsiya etiladi. Bu holning ilgari ko‘rilganlardan farqi shu bo‘ladiki, koordinata o‘qlaridan biri mavhum qiymatlar o‘qi deb qaraladi.

Shuni ko‘rish mumkinki, qo‘shish amalini bajarish doirasida, kompleks usulning geometrik usulga nisbatan afzalligi sezilarli emas. Farqni faqatgina mav-hum qiymatni haqiqiy qiymatdan yaqqol ajratib turuvchi $j=\sqrt{-1}$ ko‘paytmaning mavjudligida ko‘rish mumkin.

Garmonik funksiyalarni differensiallash. *Garmonik funksiyani differensial-laganda unig tasviri $j\omega$ ga ko‘paytiriladi*. Boshqacha qilib aytganda, agar komplek *qiymat* $\dot{A}$ differensiallanuvchi garmonik funksiyani ifodalasa, u holda shu funksiyaning hosilasi $j\omega A$ kompleks bilan tasvirlanadi.

Darhaqiqat, agar $a=\mathrm{Im}\tilde{a}\sim \dot{A}$ bo‘lsa, unda

$$da/dt=\mathrm{Im}\,d\tilde{a}/dt=\mathrm{Im}\,j\omega\tilde{a}\sim j\omega\dot{A}\,. \qquad (4.61)$$

Chunki $\tilde{a}=\dot{A}_m e^{j\omega t}$ va mavhum qismning hosilasi, hosilaning mavhum qismiga teng. L, r zanjiri uchun (4.5,*b*-rasm), kuchlanish quyidagi yig‘indi sifatida yozilishi mumkin

$$u=ir+Ldi/dt.$$

Agar zanjirdan $i=I_m\cdot\sin(\omega t+\alpha)\sim I\cdot e^{j\alpha}=\dot{I}$ toki oqayayotgan, deb faraz qilinsa, bunda, aniqki *i* va $\dot{I}$ o‘zaro mos deb ko‘riladi.

Differensiallash ($j\omega$)ga ko‘paytirish bilan almashtirib, qo‘shish qoidalarini e’tiborga olsak, kuchlanishni tasvirlovchi kompleks uchun quyidagi bog‘lanishni yozish mumkin

$$\dot{U}=U\cdot e^{j\beta}=(r+j\omega L)\cdot\dot{I} \qquad (4.62)$$

L, r – zanjir uchun kompleks qarshilik. Ifoda (4.62) o‘ng tomonining birinchi ko‘paytmasi (qavs ichidagi qiymat) *L, r - zanjirning kompleks qarshiligi* deyiladi.

Kompleks qarshilik har doim bosh harf $\underline{Z}$ bilan belgimlanadi va ko‘rsatkichli yoki ikki had shaklida keltiriladi, ya’ni

$$\underline{Z} = ze^{j\varphi} = z\angle\varphi = r + j\omega L = r + jx_L \qquad (4.63)$$

Bunda kichik harfli $z = |Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ yoki bosh harfli absolyut miqdor $|Z|$ modul yoki to‘la qarshilik ifodasi; $\varphi = arctg(\omega L / R) > 0-$ argument; $x_L = \omega L$ - induktiv qarshilik deb ataladilar. Kompleks qarshilikdan foydalanib, (4.62) kompleks tenglikni Om qonuni shaklida yozish mumkin

$$\dot{U} = \underline{Z} \cdot \dot{I} \qquad (4.64)$$

va uni quyidagicha ta’riflash mumkin: *agar xamma qiymatlarni kompleks shaklda tasvirlasak, zanjirdagi kuchlanish qiymati tok va qarshliklar ko‘paytmalariga teng*. Unda (4.64) dagi komplekslarni quyidagicha yozish mumkin

$$\dot{U} = U\angle\beta = z\angle\varphi \cdot I\angle\alpha = zI\angle(\alpha + \varphi). \quad .$$

Ikki kompleks sonlar ko‘paytmasini hosil qilishda ular argumentlari algebrik yig‘indisi olinadi; bu esa ko‘rsatkichli shakldan foydalanib yozganda ko‘zga yaqqol tashlanadi: $e^{j\varphi} \cdot e^{j\alpha} = e^{j(\varphi+\alpha)}$. Demak β, ya’ni (4.64)dagi kuchlanishning boshlang‘ich fazasi kompleks qarshlik Z ning argumenti φ bilan tok I ning boshlang‘ich fazasi α yig‘indilariga teng

$$\beta = \varphi + \alpha. \qquad (4.65)$$

Bunda kuchlanish amplitudasining qiymati tok ampilitudasi va qarshilik moduli ko‘paytmasiga teng

$$U_m = U\sqrt{2} = z \cdot I_m = z \cdot I\sqrt{2}. \qquad (4.66)$$

Garmonik funksiyalarni integrallash. *Garmonik funksiyani integrallaganda uning tasviri $j\omega$ ga bo‘linadi.* Boshqacha qilib aytganda, agar

kompleks qiymat $\dot{A}$ integrallanuvchi funksiyani tasvirlasa, unda uning integrali $A/j\omega$ kompleks bilan tasvirlanadi.

Komplekslik belgisi *j* ga bo‘lish, argumentni $-\frac{\pi}{2}$ burchakka o‘zgartiradi (yoki vektorni shu burchakka buradi). Bularni quyidagi bog‘lanishlar orqali ko‘rsatish mumkin

$$a = A_m \sin(\omega t + \alpha) \sim A \cdot e^{j\alpha} = \dot{A};$$

$$s = \int a dt = \frac{A_m}{\omega} \sin(\omega t + \alpha - \pi/2) \sim \dot{A} \Big/ j\omega = \dot{S} \qquad (4.67)$$

Bu yerda yana qayta eslatish zarurki, ushbu integrallashdan olingan funksiyaning faqat garmonik tashkil etuvchisini e’tiborga olayapmiz, ya’ni faqat barqarorlik rejimni ko‘rayapmiz. O‘zgarmas tashkil etuvchisi, noldan farqli bo‘lsa ham, uni e’tiborga olmaymiz.

Yuqorida keltirilgan qoidani, diffensiallashda qabul qilingan tahlilga o‘xshash yo‘l bilan tekshirish mumkin. Lekin, integralash-differnsiallashga teskari bo‘lgan amal ekanini eslatish bilan cheklansa ham bo‘ladi.

Ketma-ket ulangan r va *S* li zanjir kuchlanishi shoxobcha toki i bilan quyidagi tenglama orqali bog‘langan

$$u = ri + \frac{1}{C}\int i dt, \qquad (4.68)$$

bunga kompleks shakldagi kuyidagi tenglama mos keladi

$$\dot{U} = r\dot{I} + \frac{1}{j\omega C}\dot{I} = \left(r + \frac{1}{j\omega C}\right)\dot{I}\ . \qquad (4.69)$$

C, r - zanjirning kompleks karshiligi. (4.69)da qavs ichidagi kupaytmani *r, C* li zanjirning kompleks karshiligi deb atash mumkin

$$\underline{z} = r + 1/(j\omega C) = r - j[1/(\omega C)] = r - jx_C = ze^{j\varphi}, \qquad (4.70)$$

bunda o‘ng tomondagi ko‘rsatkichli funksiya moduli $z = \sqrt{r^2 + (1/\omega C)^2}$ - to‘la qarshilik, $\varphi = arctg\frac{-1/\omega C}{r} < 0$, uning argumenti; $x_C = 1/\omega C -$ sig‘im qarshiligi

deyiladi.

Burchak φ manfiy ishorali bo‘lishining sababi, mavhum tashkil etuvchining ishorasi minus bo‘lganligidir

$$1/(j\omega C) = -j[1/(j\omega C)] = -jx_C$$

Kompleks va differensal tenglamalarning mosligi. Keltirilgan qoidalar asosida elektr zanjirining garmonik funksiyalari uchun Kirxgof qonunlari bo‘yicha qurilgan *differensial tenglamalarga mos keluvchi kompleks algebraik tenglama-lari*ni tuzish mumkin. Yana bir marta ta’kidlash zarurki, bunda biz faqat barqarorlashgan rejimni nazarda tutamiz. Bu rejimda barcha tok va kuchlanishlar garmonik funsiyalardan iborat. Masalan ketma-ket ulangan *r, L, C* li zanjirning (4.7,*b*-rasm) tenglamalari

$$u = L\frac{di}{dt} + u_C + ri$$

yoki

$$u = L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int i dt + ri, \qquad (4.71)$$

bunga quyidagi algebrik kompleks tenglama mos keladi

$$\dot{U} = \left(j\omega L + 1/(j\omega C) + r\right)\dot{I} \qquad (4.72)$$

Oddiy ketma-ket-parallel ulangan zanjirdagi (4.13-rasm) jarayon ifoda-lanishi uchun KTQ asasida bir tenglama $i_1+i_2+i_3$ va KKQ asosida ikkita tenglama tuzish mumkin

$$u = r_1 i_1 + L_1\frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_2}\int i_2 dt + r_2 i_2;,$$

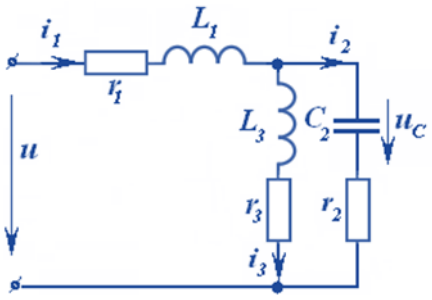
$$0 = \frac{1}{C_2}\int i_2 dt + r_2 i_2 - r_3 i_3 - L_3\frac{di_3}{dt}.$$

Bu tenglamalarga quyidagi algebraik kompleks tenglamalar mos keladi

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3; \quad \dot{U} = (r_1 + j\omega L_1)\dot{I}_1 + \left(1/(j\omega C_2) + r_2\right)\dot{I}_2;$$
$$0 = \left(1/(j\omega C_2) + r_2\right)\dot{I}_2 - \left(r_3 + j\omega L_3\right)\dot{I}_3 \ .$$

Shunday qilib, kompleks usulni taklif etish natijasida *nisbatan qiyin bo‘lgan differensial tenglamalar tizimini yechish o‘rniga, yengilroq bo‘lgan algebrik tenglamalar tizimini yechish* taklif etilmoqda.

Kompleks usulning keng qo‘llanilishini ta’minlaydigan uning asosiy xususiyati ham mana shundadir.



4.13-rasm. **Aralash ulangan zanjir**

Komplekslarni qo‘shganda va ayirganda hadlar (algebrik) shaklidan foydalangan maqsadga muvofiq, aksincha, ko‘paytirish yoki bo‘lish amallarini bajarishda qutubli (yoki ko‘rsatkichli) shakldan foydalanish zarur. Shuning uchun komplekslar bilan amallar bajarishda algebrik shakldan qutb shaklga va qutb shakldan algebraik shaklga, ya’ni biridan boshqasiga tez-tez o‘tib turishga to‘g‘ri keladi.

Kirxgof qonunlarining kompleks shakldagi ifodasi. Yuqorida keltirilgan fikrlarni umumlashtirib, Kirxgor qonunlarini quyidagi shaklda yozish mumkin

$$\sum \dot{I}_n = J; \qquad \sum \underline{Z}_n \dot{I}_n = \sum \dot{E}_k.$$

Yuqoridagi misolardan foydalanib keltirilgan bog‘lanishlarning mazmunini tushunish oson. Kompleks funksiyalardan foydalanishda, qiymatlarning musbat yo‘nalishlarini tanlash va belgilash, avvalgidek, ahamiyatlidir.

O‘zgarmas tok zenjirlari uchun keltirib chiqarilgan barcha bog‘lanishlarni o‘zgaruvchan tok zanjirlari uchun ham yozish mushkul ish emas. Masalan kontur toklari va tugun potensialari tenglamalari matrisa shaklida quyidagicha yoziladi

$$\underline{Z}_{kl} \cdot \dot{I}_l = \dot{E}_k;$$

$$B_{kl} \cdot \dot{\varphi}_{kl} = J_{kl}, \qquad (4.74)$$

bunda matrisaning barcha elementlari kompleks shaklda yozilgan, ilgarigidek

$B_{k\ell} = -Y_{k\ell}$ - *"k"* va $"\ell"$ tugunlar orasidagi ($k \neq \ell$) o'tkazuvchanlikdir va unda $B_{\ell\ell} = Y_{1\ell} + Y_{2\ell} + \cdots + Y_{\ell+1,\ell}$ va h.k.

Chiziqli bog'langan tenglamalar

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_k &= A_k + Y_{k\ell} \cdot \dot{U}_\ell; \\ \dot{U}_\ell &= B_\ell + Z_{\ell k} \cdot \dot{I}_k; \\ \dot{I}_k &= C_k + H_{kn} \cdot \dot{I}_n \end{aligned}\right\} \qquad (4.75)$$

va h.k. ham ilgarigidek o'z kuchiga egadir.

Bu ifodalarda uzatish o'tkazuvchanligi $Y_{k\ell}$, uzatish qarshiligi $\underline{Z}_{\ell k}$, uzatish koeffisenti H_{kn} ilgarigi mohiyatlariga ega, lekin ular kompleks shaklda yoki kompleks holidagi matrisa shaklida yozilgan. O'zgarmas qiymatlar A_k, B_ℓ, ... ham umumiy holda komplekslardir.

I va Z turdagi komplekslarning farqlari. Ta'rifidan ko'rinib turibdiki, garmonik o'zgaruvchi funksiyalarni ifodalovchi kompleks $\dot{I}$ *~i(t);* $\dot{U}$ *~ i(t),...* qiymatlar $\underline{Z}$ turdagi komplekslardan farqlanadi.

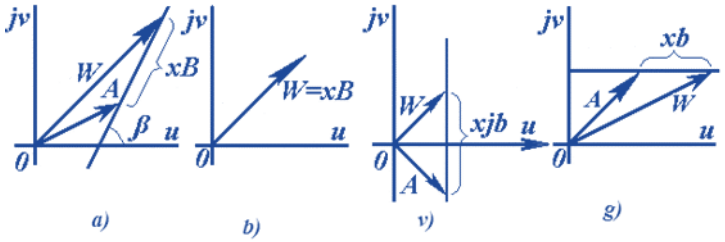
Birinchilariga $\dot{I} = I\angle\alpha,\ \dot{U} = U\angle\beta,...$ vaqt bo'yicha garmonik funksiyalar mos kelsa, ikkinchi turdagi $\underline{Z} = z\angle\varphi$ komplekslar boshqacha mazmunga ega – ular ikki garmonik funksiyalar orasidagi bog'lanishni ifodalovchi ko'paytuvchilardir. Masalan, Z kompleksi ikki garmonik fuksiyalarni tasvirlovchi kuchlanish kompleksi va tok kompleksi nisbatlariga teng: $\underline{Z} = \dot{U} / \dot{I} = \dot{U}_m / \dot{I}_m;$ uning moduli $z = U / I = U_m / I_m$ esa ushbu funksiyalar modullari nisbatiga teng, argumenti φ esa shu garmonik funksiyalarning boshlang'ich fazalari orasidagi farqni ko'rsatadi, ya'ni $\varphi = \beta - \alpha.$

Ikkinchi turdagi komplekslar *kompleks operatorlari* deyiladi. Ularni kompleks tekislikda ko'rsatish mumkin, biroq ular bu tekislikda sinusoidal o'zgaruvchi qiymatlarni tasvirlamaydi. Garmonik funksiyalarning tasvirlanishidan farqli ravishda ularni belgilovchi bosh harf ustiga nuqta

qo‘yilmaydi. Bu qiymatlarning kompleks ekanligini ataylab ko‘rsatish zarur bo‘lgan xollarda, ba’zi adabiyotlarda belgilanayotgan qiymat bosh xarfi ustiga maxsus belgi (~, ^, -) qo‘yiladi.

4.9. Kompleks tekislikda to‘g‘ri chiziq tenglamasi

O‘zgaruvchan tokli elektr zanjirlarini tahlil qilganda zanjir parametrlaridan biri r, Z yoki chastota ω o‘zgarganda, unga bog‘liq ravishda kompleks toki $\dot{I}$, kuchlanishi $\dot{U}$ yoki kirish qarshiligi $\underline{Z}_{\text{kir}}$ning moduli va argumenti qanday o‘zgarishini bilish katta ahamiyatga ega. Aksariyat, kompleks maydonida ushbu ko‘rilayotgan vektorlar uchlarining siljishini tasvirlovchi egri chiziq sifatida o‘zgarish qonuniyatlarini aniqlashga imkon bo‘ladi; bunday egri chiziqlar *godograf* deyiladi. Shuning uchun, kompleks tekislikda bunday *chiziqlar qanday tenglamalar yordamida ifodalanishini* bilish zarur.



4.14-rasm. **Godograf chiziqlari**

Kompleks tekislikda amaliy ahamiyatga ega bo‘lgan chiziqlar – bular to‘g‘ri chiziq va aylanadir ($W = U + jU$).

Kompleks maydonidagi to‘g‘ri chiziq, umumiy holda quyidagi chiziqli bog‘lanish orqali ifodalanadi $W = A + x\hat{A}$, bunda x - haqiqiy sondan iborat o‘zgaruvchi; $A = a\angle\alpha, B = b\angle\beta$ - modullari a va b bo‘lgan o‘zgarmas komplekslar. Bu to‘g‘ri chiziq haqiqiy sonlar o‘qi bilan β burchak (4.14,*a*-rasm) tashkil etadi. Buni o‘rganishda xususiy hollarni ko‘rib chiqish zarurati bor: $A = 0$ bo‘lganda to‘g‘ri chiziq koordinata boshidan o‘tadi. (4.14,*b*-rasm); $B = jb$ bo‘lganda to‘g‘ri chiziq mavhum sonlar o‘qiga parallel (4.14,*v*-rasm); $B = b$ bo‘lganda to‘g‘ri chiziq haqiqiy sonlar o‘qiga parallel (4.14,*g*-rasm).

Nazorat savollari

1. Davriy va nodavriy o‘zgaruvchan kuchlanish va toklarni sharhlab bering.

2. Kondensatorda zaryadlanish va razryadlanish jarayonini izohlang.

3. Davriy miqdor ta’sir etuvchi (effektiv) qiymati tushuntiring.

4. Induktivlik va rezistori bo‘lgan zanjirda o‘zgaruvchan tokni tushuntiring.

5. Induktivlik, sig‘im va rezistorli zanjirda o‘zgaruvchan tokni izohlang.

6. O‘zgaruvchan tok zanjiri uchun Kirxgof qonunlarni tushuntiring.

7. Oddiy garmonik funksiyalar ustida matematik amallar va geometrik usulni izohlang.

8. Kompleks (simvolik) usulni tushuntirib bering.

9. Kompleks tekislikda to‘g‘ri chiziq tenglamasini tushuntiring.

5-BOB. TARKIBIDA L, R, C BO‘LGAN CHIZIQLI O‘ZGARUVCHAN TOK ZANJIRI NAZARIYASI VA HISOBLASH USULLARI

5.1. Elektr zanjiri tenglamalarining kompleks shakldagi ko‘rinishlari

Kirxgof qonunlari. O‘zgarmas *L*, *r*, *C* parametrli o‘zgaruvchan tok zanjirlarini taxlil qilish va hisoblash usullari Kirxgof qonunlarini tok va kuchlanishlarning oniy qiymatlariga tatbiq etishga asoslangan, demak bu qonunlarni barqarorlik rejimi uchun va kompleks shaklda yozilgan garmonik toklar uchun qo‘llashga asoslangan.

Kirxgof qonunlarini tatbiq etish shartlari quyidagilardir:

- zanjirning ko‘rilayotgan nuqtalari orasidagi kuchlanishni potensiallar farqi deb qarash mumkunligi;

- ko‘rilayotgan zanjirning ixtiyoriy tuguni uchun undagi toklar oniy qiymatlari yig‘indisining nolga tengligi.

Ushbu shartlarning mukammalroq tahlilini faqatgina elektromagnit maydoni nazariyasi ko‘rilayotganda bajarish mumkin. Quyidagi barcha bayonlarimizda esa ko‘rilayotgan zanjir uchun ushbu shartlar bajariladi, deb hisoblaymiz.

Mazkur fikrlar *o‘zgarmas tok zanjirlari nazariyasining barcha teorema va hisoblash usullarini* o‘zgaruvchan tok chiziqli zanjirlariga qo‘llash mumkinligi haqidagi xulosaga olib keladi. Bunda elektr zanjiri kompleks shakldagi tenglamalar tizimining yechimlarini o‘zgarmas tok zanjirlari uchun ilgari aniqlangan andozalar (qoliplar)ga keltirish mumkin. Albatta, bunda o‘ziga yarasha xosliklar paydo bo‘ladi. Masalan, ikki kuchlanish o‘zaro yoki ikki kompleks qarshiliklar o‘zaro tengligi haqida gap ketganda, ularning ham modullari tengligini, ham argumentlari tengligini nazarda tutish zarur; zanjirning ish rejimi na faqat manba kuchlanishi va toki qiymatlari bilan aniqlanadi, balki ular fazalar farqiga (boshlang‘ich fazasiga) ham, chastota va h.k.larga ham bog‘liq. O‘zgaruvchan toklar nazariyasida butkul yangi tushunchalar ham uchraydi.

Qarshilik. Ixtiyoriy shoxobcha yoki ikki qutblik komplleks qarshiligi, umumiy xolda, haqiqiy va mavhum tashkil etuvchilardan iborat bo‘ladi

$$\underline{Z}=r+jx \tag{5.1}$$

Bu yerda, albatta, quyidagi yozuvning haqli ekani shubhasiz

$$\dot{U}=\dot{I}\,\underline{Z}, \tag{5.2}$$

bunda $\dot{U}=U\angle\beta$ va $\dot{I}=I\angle\alpha$ - ikki qutblikning kirish qismidagi kuchlanish va tok.

Tenglik (5.1)da $\underline{Z}=z\angle\varphi$ yoki $\underline{Z}=ze^{j\varphi}=r+jx$, (5.3)

bunda $z=\sqrt{r^2+x^2}$ va $tg\varphi=x/r$ yoki $\varphi=arctg(x/r)=\beta-\alpha.$

Kompleks qarshilik $\underline{Z}$ ning moduli z ni *to‘la qarshilik* ham deb ataladi. Uning haqiqiy qismi r ni, sodda qilib qarshilik yoki *aktiv qarshilik* deyiladi (bu passiv zanjirning *aktiv qarshiligidir*! Aktiv zanjir bilan adashtirilmasin!).

Mavhum qismini esa *reaktiv qarshilik* deyiladi.

Induktivlikning reaktiv qarshiligi musbatdir

$$\underline{Z}_L=jx=j\omega L=jx_L; \quad x=x_L>0 \tag{5.4}$$

Sig‘imning reaktiv qarshiligi manfiydir

$$\underline{Z}_C=jx=\frac{1}{j\omega C}=-j\frac{1}{\omega C}=-jx_C;\ x=-x_C<0 \tag{5.5}$$

Ketma-ket ulangan L, r, S li zanjirning kompleks qarshiligi

$$\underline{Z}=r+jx=r+j(\omega L-1/\omega C)=r+j(x_L-x_C). \tag{5.6}$$

Demak, bu holda reaktiv qarshilik yoki musbat yoki manfiy bo‘lishi mumkin

$$x=\omega L-1/\omega C=x_L-x_C;$$

agar $x>0$ bo‘lsa, u holda $x_L>x_S$ yoki $\omega^2>1/LC;$ (5.7)

agar $x<0$ bo‘lsa, u holda $x_L<x_S$ yoki $\omega^2<1/LC.$ (5.7,*b*)

Rezonans holatda, ya’ni

$$\omega=\omega_0=1/\sqrt{LC} \tag{5.8}$$

bo‘lganda reaktiv qarshilik x nolga teng; agar $\omega<\omega_0$ bo‘lsa x manfiy; yuqori $\omega>\omega_0$ chastotalarda x musbat ishorali.

Qarshilik $\underline{Z}$ ni kompleks maydonda grafik sifatida tasvirlash mumkin. Bu grafik zanjir parametrining u yoki bu qiymatlari o‘zgarganda $\underline{Z}$ ning qanday o‘zgarishini aniqlamoqchi bo‘lganda ancha qulaydir (godograf).

Biror zanjir ketma-ket ulangan L,r,C li shoxobchasida (5.1,*a*-rasm) chastota o‘zgargandagi qarshilikning godografi mavhum o‘qqa parallel bo‘lgan to‘g‘ri chiziq bilan tasvirlanadi (5.1,*b*-rasm).

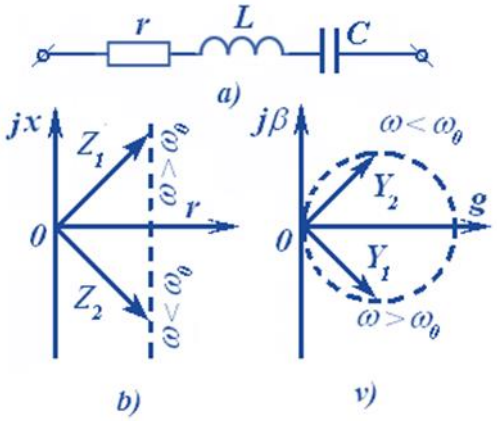
O‘tkazuvchanlik. Kompleks qarshiligi $\underline{Z}$ ga teskari bo‘lgan qiymat kompleks o‘tkazuvchanlik deyiladi

$$\underline{Y}=\frac{1}{\underline{Z}}=\frac{1}{ze^{j\varphi}}=\frac{1}{z}e^{-j\varphi} \tag{5.9}$$

yoki $$\underline{Y}=ye^{-j\varphi}=y\angle-\varphi=g=jb, \tag{5.10}$$

bunda $y=1/z=\sqrt{g^2+b^2}$ va $\varphi=arctg(b/g).$

O‘tkazuvchanlikning moduli y (absolyut qiymati), uning to‘liq o‘tkazuvchanligi deb ataladi; g va b – aktiv va reaktiv o‘tkazuvchanligi deyiladi. Bazi adabiyotlarda $\underline{Y}=y\angle-\varphi=g-jb$ ifodaning reaktiv o‘tkazuvchanligi ishorasini o‘zgacha qabul qilinadi. Biz keyingi matnlarda reaktiv o‘tkazuvchanlik ishoralarini (5.9) va (5.10) dagi kabi olamiz, deb qabul qilamiz.



5.1-rasm. **Ketma-ket ulangan *r,L, C* li zanjir**

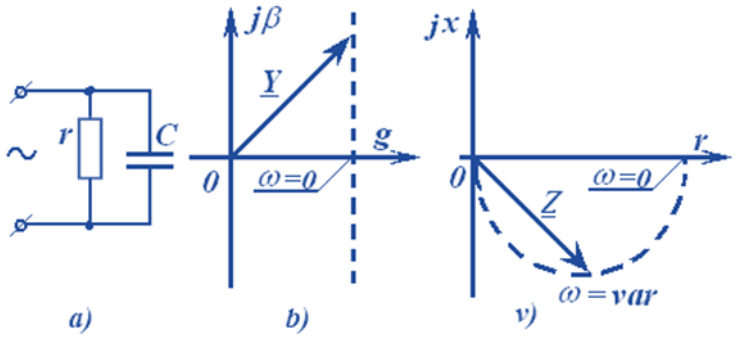
Parallel ulangan shoxobchalardagi toklarni hisoblaganda, o‘zgarmas tok zanjirlaridagi kabi, ularning o‘tkazuvchanligi qo‘shiladi, ya’ni ikki parallel shoxobcha (yoki zanjir bo‘lagi)ning ekvivalent o‘tkazuvchanligi

$$\underline{Y}_э=\underline{Y}_1+\underline{Y}_2 \tag{5.11}$$

har bir parallel shoxobcha (yoki zanjir bo‘lagi)ning kompleks o‘tkazuvchanliklar yig‘indisiga teng.

O‘z-o‘zidan kelib chiqadiki, umumiy holda, yig‘indi $y_Э$ning moduli, modullar yig‘indisi ($y_1 + y_2$)ga teng emas.

Bunda $\underline{Y}$ vektorning godografi $\underline{Z}$ egri chizig‘iga teskari bo‘lgan chiziqni tasvirlaydi. Shuning uchun ketma-ket ulangan *L,r,C* li zanjir shoxobchasining o‘tkazuvchanligi ω o‘zgarganda uchlari aylanani hosil qiluvchi vektor bilan ifodalanadi (5.1,*v*-rasmda $\beta = -b$).



5.2-rasm. **Zanjirning komleks o‘tkazuvchanliklari va qarshiliklarining vektor godograflari**

Agar ω o‘zgargandagi $\underline{Y}$ vektor godografi parallel ulangan *r* va *C* 5.2,*a*-rasm zanjiridagi kabi to‘g‘ri chiziq bo‘lsa (5.2,*b*-rasm), u holatda $\underline{Z}$ vektorning uchlari (ya’ni vektor uchining geometrik joylashuvi) aylanadan iborat bo‘ladi (5.2,*v*-rasm). Shunga o‘xshash tahliliy qurishni $\omega C = const$ va $r = var$ uchun bajarish mumkin.

Misol. Qarshiliklari $\underline{Z}_1 = 3 - j4\Omega$ va $\underline{Z}_2 = 4 + j3\Omega$ bo‘lgan ikki parallel shoxob-chalar o‘zgaruvchan kuchlanish manbaiga ulangan (5.3,*a*-rasm). Har bir shoxob-chaning o‘tkazuvchanliklari, hamda ularni qo‘shib umumiy o‘tkazuvchanlikni hisoblash talab qilinadi. Agar zanjirdagi voltmetr $U = 100V$ ko‘rsatayotgan bo‘lsa va barcha ulangan asboblar effektiv qiymatlar ko‘rsatishini e’tiborga olsak, uchchala ampermetr ko‘rsatayotgan qiymatlarni aniqlang.

Toklarning vektor diagrammalarini quring.

Yechish. Qarshiliklarga teskari bo‘lgan qiymatlarni hisoblab, quyidagilarni aniqlaymiz

$$\underline{Y}_1=\frac{1}{\underline{Z}_1}=\frac{1}{3-j4}=\frac{3+j4}{25}=0{,}12+j0{,}16;\text{Sm};\qquad \underline{Y}_2=\frac{1}{\underline{Z}_2}=\frac{1}{3+j4}=\frac{3-j4}{25}=0{,}16-j0{,}12;\ \text{Sm}.$$

Umumiy o‘tkazuvchanlik

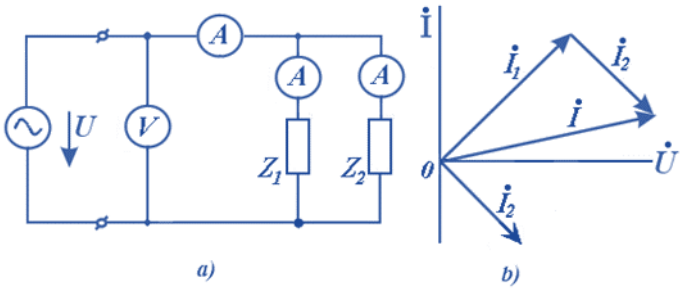
$$\underline{Y}=\underline{Y}_1+\underline{Y}_2=0\cdot 28+j0\cdot 04\quad \text{Sm}.$$

O‘tkazuvchanlik modullari $y_1=0{,}20$ Sm; $y_2=0{,}20$ Sm; $y=0{,}282$ Sm.

Shuning uchun, ampermetrlar ko‘rsatayotgan toklarning qiymatlari

$$I_1=y_1U=20A;\ \ I_2=y_2U=20A;\quad I_1=\left|\dot{I}_1+\dot{I}_2\right|=yU=28{,}2A.$$

Bunda $\dot{I}_1=\underline{Y}_1\cdot\dot{U}_1;\ \ \dot{I}_2=\underline{Y}_2\cdot\dot{U}_2$ bo‘lganda $\dot{U}=U$ ekanligini e’tiborga olinib, toklarning vektor diagrammasi 5.3,*b*-rasmda qurilgan.



5.3-rasm. **Ikki parallel shoxobchalar**

Misol. Zanjirning ikki bo‘lagi - biri aktiv qarshilik, ikkinchisi induktiv-aktiv qarshiliklardan iborat bo‘lgan qismlari ketma-ket ulangan (5.4,*a*-rasm). Ulangan o‘lchov asboblari ushbu effektiv qiymatlarni ko‘rsatmoqda:

$$I=2A;U_1=20V;U_2=36V;U=50V.$$

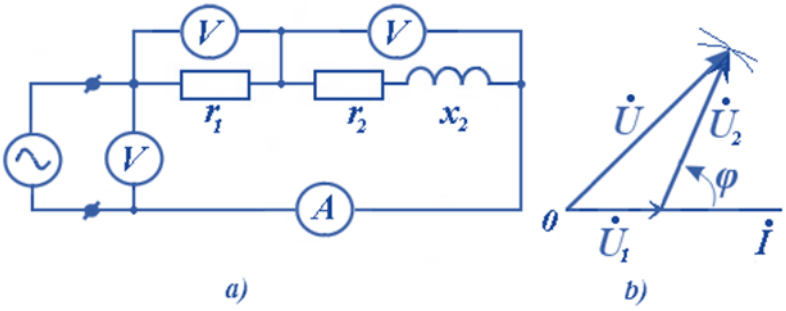
Vektor diagrammasini qurib, ikkinchi qarshilik $Z_2=r_2+jx_2$ning aktiv va induktiv tashkil etuvchilarini aniqlang.

Yechish. Kompleks shaklda berilgan kuchlanishlar uchun KKQ $\dot{U}_1+\dot{U}_2=\dot{U}$ bajarilishi shart; bunda kuchlanish $\dot{U}_1$ fazasi $\dot{I}$ tok fazasi bilan mos kelishi, $\dot{U}_2$ kuchlanishi esa $\dot{I}$ tokdan ilgarilab ketishi zarur. Berilgan

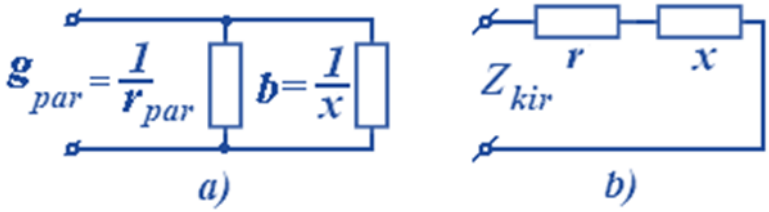
modullarda ushbu shartlarga kompleks maydonda qurilgan birdan-bir vektorlar uchburchagi mos keladi. Bunday uchburchakni qurish (sirkul yordamida) yengil amalga oshiriladi (5.4,*b*-rasm). Tok vektori $\dot{I}$ barcha elementlar uchun umumiy, shuning uchun uning vektori yo‘nalishida $\dot{U}_1$ kuchlanishning vektorini joylashtiramiz. Uning uchidan va ketidan radiuslari $|U|$ va $|U_2|$ bo‘lgan yoylarni o‘tkazamiz. Ushbu yoylar kesishgan nuqta $\dot{U}$ va $\dot{U}_2$ vektorlarning geometrik o‘rnini ko‘rsatadi.

Bunda $\dot{U}, \dot{U}_1, \dot{U}_2$ vektorlar uchun masshtablar bir xil bo‘lishi shart. Qurilgan diagrammadan $\cos\varphi_2$ va $\sin\varphi_2$, xamda $\varphi_2 = 57^0 20'$ aniqlash mumkin. Izlanayotgan qarshilikning moduli o‘lchov asboblari ko‘rsatkichidan aniqlanadi $z_2 = U_2 / I = 18\Omega$. Kompleks qarshilik $Z_2 = z_2(\cos\varphi_2 + j\sin\varphi_2) = 10+15\ \Omega$ ga teng.

Ushbu natijalarni analitik ifodalar yordamida aniqlash ham mumkin.



5.4-rasm. **Ketma-ket ulangan zanjir.**



5.5-rasm. **Parallel ulangan zanjirni ketma-ket ulangan zanjirga keltirish.**

Passiv ikki qutblikning kirish qarshiligi va kirish o‘tkazuvchanligi. Ushbu $\underline{Z}_{\text{kir}}$ va $\underline{Y}_{kir} = 1/\underline{Z}_{kir}$ kattaliklar o‘zaro teskari qiymatlardir. Ularning har biri aktiv va reaktiv qiymatlar yig‘indisi sifatida tasvirlanishi mumkin

$$\underline{Z}_{kir} = r + jx \quad \text{va} \quad \underline{Y}_{kir} = g - jb. \tag{5.12}$$

Bundagi birinchi bog‘lanish ketma-ket ulangan zanjirga, ikkinchisi esa parallel ulangan zanjirga (5.5-rasm) mos keladi, deb tasavvur etish mumkin.

Oddiy o‘zgartirishlardan so‘ng quyidagilarni aniqlaymiz

$$\underline{Y}_{kir} = g - jb = 1/\underline{Z}_{kir} = 1/(r + jx) = (r - jx)/(r^2 + x^2), \tag{5.13}$$

bunda

$$g = r/\left(r^2 + x^2\right) \quad \text{va} \quad b = x/\left(r^2 + x^2\right). \tag{5.14}$$

Ekvivalent sxemaning ikki parallel shoxobchalari tarkibida aktiv qarshilik

$$R = 1/g = \left(r^2 + x^2\right)/r \tag{5.15}$$

va induktiv qarshilik

$$X = 1/b = \left(r^2 + x^2\right)/x \tag{5.16}$$

mavjuddir.

Misol. Sxemasi 5.5,*a*-rasmda keltirilgan zanjir tarkibida sig‘imi $C_{Пар}$ bo‘lgan parallel kondensator mavjud; kondensatorning izolyasiyasi real bo‘lgani uchun, uning tarkibida katta bo‘lmagan $g_{parl} = 1/R_{parl}$ o‘tkazuvchanlik mavjud. Bunday kondensatorning kirish qarshiligini 5.5, *b*-rasmda keltirilgan tartibda ketma-ket ulangan C_Y (rasmda umumiy holat uchun X belgilangan) va R_H (rasmda r) bo‘lgan almashtirish sxemasi bilan tasvirlash zarur bo‘lsin. Parametrlardagi «*par*» va «*ket*» indekslari ushbu yelementlarning mohiyatini, ya’ni parallel zanjirni ketma-ket ulangan zanjirga almashtirilayotganini ta’kidlash uchun qo‘yilgan.

Yechish. Avvalo, (5.5)dagi ishoralarni e’tiborga olib quyidagini aniqlaymiz

$$b = 1/X = -1/X_C = -\omega C_{par}.$$

So‘ngra, (5.13)ga teskari bo‘lgan amalni bajaramiz: parallel ulangan zanjir parametrlari ma’lum deb hisoblab, ketma-ket ulangan zanjir parametrlarini aniq-laymiz

$$Z_{kir} = r_{ket} + jx_{ket} = 1/\underline{Y}_{kir} = 1/(g - jb) = (g + jb)/\left(g^2 + b^2\right),$$

undan ketma-ket ulangan zanjir elementlari

$$x_{ket} = b/\left(g^2 + b^2\right) = -\omega C_{par}/(\omega^2 C_{par}^2 + g^2{}_{par}) = -1/\omega C_{ket}$$

Keyingi bog‘lanishdan quyidagi aniqlanadi

$$C_{ket} = C_{par} + g_{par}^2/\omega^2 C_{par}.$$

Shunga o‘xshash, quyidagilarni aniqlaymiz:

$$r_{ket} = g_{par}/\left(g_{par}^2 + \omega^2 C_{par}^2\right) = R_{par}/\left[1 + \left(\omega C_{par} R_{par}\right)^2\right]$$

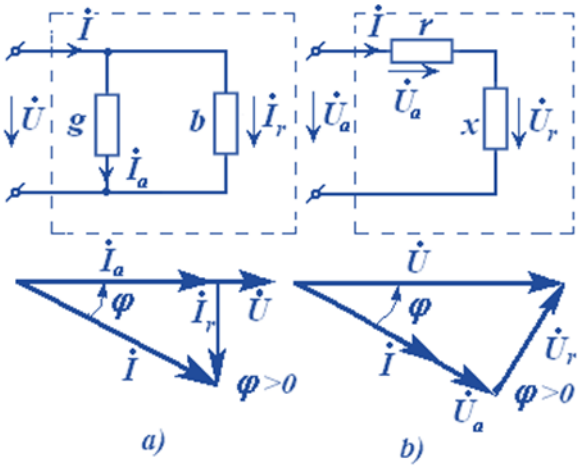
Tok va kuchlanishning aktiv va reaktiv tashkil etuvchilari. Passiv ikki qutblikning almashtirish sxemasi (5.6,*a*-rasm) parallel shoxobchalardagi toklar quyidagiga teng bo‘lsin

$$\dot{I}_a = \dot{U}\cdot g \quad \text{va} \quad \dot{I}_p = -\dot{U}\cdot jb, \tag{5.17}$$

ulardan biri ($\dot{I}_a$) tokning aktiv tashkil etuvchisi bo‘lib, kuchlanish $\dot{U}$ bilan fazasi mos keladi, ikkinchisi ($\dot{I}_p$) esa kuchlanish $\dot{U}$ dan fazasi 90^0 ga kechikadi. Berilgan shartga ko‘ra

$$\dot{I} = \dot{U}\,\underline{Y}_{kir} = \dot{U}(g - jb) = \dot{I}_a + \dot{I}_p. \tag{5.18}$$

Umumiy tokning tashkil etuvchilarga ($\dot{I}_a$ va $\dot{I}_p$) ajratilishi 5.6,*a*-rasmda keltirilgan. Diagrammadan hamda (5.17)dan ko‘rinishicha, ular ortogonaldir.



5.6-rasm. **Elektr zanjir va uni vektor diagrammasi**

Ulardan birinchisi $\dot{I}_a$ - *aktiv*, ikkinchisi esa $\dot{I}_p$ - *reaktiv tashkil etuvchilar*

deyiladi. Agar tok $\dot{I}$ fazasi kuchlanishnikidan φ burchakka kechikayotgan bo‘lsa, unda

$$I_a = I \cdot \cos\varphi \quad \text{va} \quad I_p = I \cdot \sin\varphi \tag{5.19}$$

Tokni aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarga ajratish - bu ko‘p jihatdan formal jarayondir. Bu ajratish, umumiy holda, haqiqiy va mavhum tashkil etuvchilarga ajratish bilan bog‘liq emas

$$\dot{I} = \dot{I}_a + \dot{I}_p = I' + jI'' \tag{5.20}$$

Misol. **Kuchlanish va tok kuyidagi kompleks shakllarda berilgan**

$$\dot{U} = 100 + j100 \quad V; \qquad \dot{I} = 10 + j5 \ A.$$

Tokning aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarini aniqlang.

Yechish. Hisoblash natijasida kuchlanish va toklar uchun quyidagilarni aniqlaymiz

$$\dot{U} = 141\angle 45^0 \quad V; \qquad \dot{I} = 11{,}2\angle 26^0 30' \quad A.$$

Demak, $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 45_0 - 26^0 30' = 18^0 30'$

va $I_a = 11{,}2 \cdot \cos\varphi = 1{,}7A, \qquad I_p = 11{,}2 \cdot \sin\varphi = 3{,}52A.$

Shunga o‘xshash, kuchlanishning ham aktiv, ham reaktiv tashkil etuvchilari tushunchalarini kiritamiz; bu tashkil etuvchilar ketma-ket ulangan zanjirning aktiv va reaktiv qarshiliklaridagi kuchlanishlarni (5.6,*b*-rasm) ko‘rsatadi

$$\dot{U}_a = r\dot{I} \quad \text{va} \quad \dot{U}_p = jx\dot{I}$$

Qabul qilingan soddalashtirishlar. O‘zgaruvchan tokli elektr zanjirlari sxemalarida keltirilgan manba, aksariyat ko‘rsatilmaydi. Bunda, masalan 5.6-rasmda keltirilganidek, berilgan kuchlanish U yoki tok I ga faqat strelka (musbat yo‘nalish) va unga mos keluvchi xarfli belgilari qo‘yiladi; ba’zi xollarda, agar shunday soddalashtirish tushunmovchiliklar tug‘dirmasa, o‘zgaruvchan tok generatorini “~” ishora bilan belgilab qo‘yiladi.

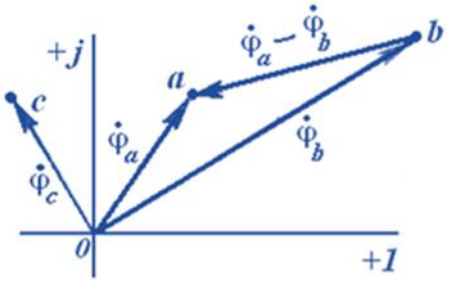
5.2. Kompleks tekislikda potensial diagramma

O‘zgaruvchan tok zanjirining har bir *a,b,s*, ... nuqtalari potensiallari $\dot{\varphi}_a, \dot{\varphi}_b, \dot{\varphi}_c$, ... kompleks qiymatlar bilan aniqlanadi, shuning uchun zanjirdagi potensiallar taqsimotini kompleks tekisligida keltirish mumkin; bunda zanjirning har bir nuqtasini kompleks tekisligidagi ma’lum nuqta orqali ifodalanadi. Bundan shu malum bo‘ladiki, zanjirdagi ixtiyoriy ikki *a* va *b* nuqtalari orasidagi potensiallar farqi, kompleks tekislikdagi *a* va *b* nuqtalarini birlashtiruvchi vektor bilan tasvirlashi ham mumkin ekan. Qabul qilingan qoidalarga muvofiq quyidagi vektor

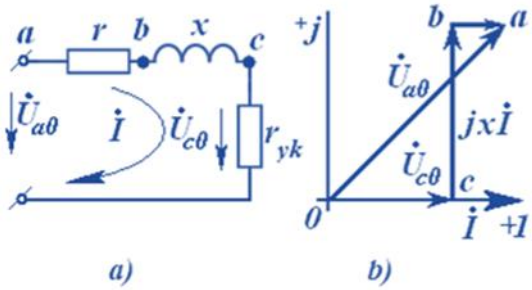
$$\dot{U}_{ab} = \dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_b \qquad (5.21)$$

5.7-rasmda keltirilganidek *b* nuqtadan *a* nuqta tomon yo‘nalgan bo‘ladi. Zanjirning har bir nuqtasiga kompleks tekisligida malum nuqta mos kelishi tufayli qurilgan vektor diagrammasi, *topografik diagramma* deb ham ataladi.

Misol uchun, 5.8,*a*-rasmda keltirilgan sodda zanjir uchun topografik diogramma qurish yo‘lini keltiramiz. Qarshiligi r_{yuk}=20,0Ω bo‘lgan yuk tarmoqqa reaktiv qarshiligi Z=5+j35Ω bo‘lgan induktiv g‘altak orqali ulangan. Bu reaktiv element sxemada r=5Ω va $x = \omega L$=35Ω qarshiliklarni ketma-ket ulab ko‘rsatil-gan; zanjirdagi tok I=5 A.



5.7-rasm. **Topografik diagramma**



5.8-rasm. **Elektr zanjiriga topografik diagramma qurish**

Koordinata boshi potensali nolga teng deb qabul qilib, *s* nuqtaning potensiali 0 nuqta potensalidan

$$\dot{\varphi}_c - \dot{\varphi}_0 = \dot{\varphi}_c = \dot{I}\, r_{yk}$$

qiymatga yuqoriroq bo‘lishini aniqlaymiz (qarshilikdagi tok potensiali quyiroq nuqtadan, potensiali yuqoriroq nuqta tomon oqadi).

Tok $\dot{I}$ ning yo‘nalishini ixtiyoriy [masalan, haqiqiy o‘q yo‘nalishida, ya’ni $\dot{I} = I$ (5.8-rasm)] tanlab olib, koordinata boshi ($\varphi_O = 0$)dan shu yo‘nalishda biror masshtabda $r_{yk}\dot{I} = \dot{U}_{cO}$ vektorni joylashtiramiz. Ushbu holatda $r_{yk}\dot{I}$ vektorning uzunligi 5·20=100 *V*. Bu vektorning uchi *s* nuqtada bo‘lib, φ_C potensialni tasvirlamaydi (5.8,*b*-rasm). Shuni ma’lum qilish zarurki, diagrammani qurish 5.8,*a*-rasmdagi $r_{yk}\dot{I}$ *kuchlanishidan* boshlab, *manba tomon davom ettirish* qulaydir.

Keyingi *b* nuqtaning potensiali *s* nuqta potensialidan $jx\dot{I}$ qiymatga balandroq joylashgan. Darhaqiqat, tokning qabul qilingan musbat yo‘nalishi (5.8,*a*-rasm) uchun (b nuqtadan *s* nuqtaga) shu nuqtalar potensiallari farqi $\dot{\varphi}_b - \dot{\varphi}_C = jx\dot{I}$ yoki $\dot{\varphi}_b = \dot{\varphi}_C + jx\dot{I}$ bo‘ladi.

5.8,*a*-rasmdagi zanjir uchun $\dot{\varphi}_b = \dot{\varphi}_C + j35\dot{I}$. Bundan ma’lum bo‘ladiki, *s* nuqtadan tok vektoriga nisbatan $+\pi/2$ burchakka burilgan cb kesmani qurish kerak. Ushbu misolda $I = 5{,}0A$ bo‘lgani uchun, *cb* kesma $175V$ ga teng bo‘lgan kuchlanishga mos bo‘lishi zarur. Bu kesmaning uchi zanjirda b nuqta bilan belgilangan nuqta potensialini ifodalaydi.

Shunga o‘xshash, *b* nuqtadan $rI = 25\ V$ kesmani joylashtiramiz va $\dot{\varphi}_a$ potensialni tasvirlovchi *a* nuqtani aniqlaymiz.

Generator (manba) kuchlanishini (5.8,*a*-rasm) *a* va *0* nuqtalar potensiallari farqi, ya’ni $\dot{U}_{a0} = \dot{\varphi}_a - \dot{\varphi}_0$ ni tasvirlovchi topografik diogrammada *0* nuqtadan *a* nuqtaga (5.8,*a*-rasm) o‘tkazilgan vektor sifatida tasvirlanadi. Bu kesmani o‘lchasak, uning qiymati tanlangan masshtabda 214 Voltga mos ekan. Demak zanjirda kuchlanish 214 *V* bo‘lganda tok 5 Amperga teng bo‘lar ekan.

Aksariyat, misol sharti boshqacha qo‘yiladi. Manbaning kuchlanishi va zanjir parametrlari berilgan bo‘lib, tokning qiymatini aniqlanish kerak bo‘ladi.

Proporsional qiymatlar usulini qo‘llaganda (§3.2), tokning ixtiyoriy qiymati $\dot{I}'$ ni tanlab, barcha diagrammani qurib, unga mos keluvchi kuchlanishni aniqlash mumkin. Haqiqiy kuchlanish $\dot{U}_{C0}$ ning diagramma yordamida aniqlangan kuchlanish $\dot{U}'_{C0}$ ga nisbatidan, ya’ni quyidagi nisbatdan

$$\eta = \dot{U}_{a0} / \dot{U}'_{aO} \tag{5.22}$$

tokning qiymatini aniqlash mumkin

$$\dot{I} = \eta \cdot \dot{I}'. \tag{5.23}$$

O‘zgarmas toklar zanjiridagidan farqli ravishda, xozirgi holatda koeffisiyent η kompleks sondir. Demak, xaqiqiy tok ixtiyoriy tanlangan tokdan, na faqat moduli bilan farqlanar ekan, balki argumenti bilan ham ajralib turar ekan.

Topografik diagramma qurishning hamma jarayoni juda sodda, faqat yodda tutish zarurki, doimo

$$\dot{\varphi}_m - \dot{\varphi}_n = \underline{Z}_{mn} \cdot \dot{I}_{mn}, \tag{5.24}$$

shuning uchun, agar shoxobchadagi $\underline{Z}_{mn}$ qarshilik toki *m* dan *n* ga musbat yo‘nalgan deb qabul qilingan bo‘lsa, u holda

$$\dot{\varphi}_m = \dot{\varphi}_n - \underline{Z}_{mn} \cdot \dot{I}_{mn}. \tag{5.25}$$

bo‘ladi.

Topografik diagrammalar qurishning ikkinchi usulini o‘rganishni o‘quvchi uchun mustaqil bajarishga tavsiya etamiz.

Topografik diagrammalarni qurish ko‘p foyda keltiradi; xususan, ko‘pfazali zanjirlar nazariyasida hamda ko‘prikli va kompencasion sxemalarda va fazalarini o‘zgartiruvchi sxemalarda keng qo‘llaniladi.

O‘lchov ko‘priklari. O‘zgaruvchan toklardagi kompleks qarshiliklarni o‘lchash maqsadida ko‘priksimon sxemalar ko‘plab qo‘llaniladi. Uiston

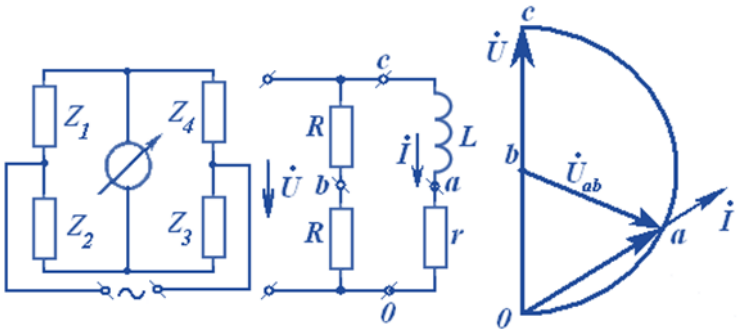
ko‘prigi-da, umumiy holda, to‘rtta yelkasida qarshiliklari (5.9-rasm) mavjuddir. Muvozanat holatiga kelgan ko‘prikda quyidagi bog‘lang‘ich shart bajarilishi zarur

$$\underline{Z}_1/\underline{Z}_2 = \underline{Z}_3/\underline{Z}_4 \qquad (5.26)$$

Ushbu shart esa ikki mustaqil shartlarga bo‘linadi

$$\underline{z}_1/\underline{z}_2 = \underline{z}_3/\underline{z}_4, \varphi_1/\varphi_2 = \varphi_3/\varphi_4, \qquad (5.27)$$

bunda φ_n - tegishli kompleks qarshilikning argumenti.



5.9-rasm. **Uiston ko‘prigi**

Ikki mustaqil shartning mavjudligi qo‘yilgan maqsadga muvofiqdir: agar berilgan uch $\underline{Z}_x$ qarshiliklar orqali to‘rtinchi noma’lum kompleks qarshilikni aniqlash zarur bo‘lsa, u holda biz ikki parametrni - modul hamda argumentni bilishimiz zarur.

Berilgan $\underline{Z}$ qiymatlar uchun ko‘prik yelkalarining muvozanatiga erishish mumkin; buning uchun uch kompleks qarshiliklardan bittasini o‘zgartirish (rostlash) yetarlimi, yoki hyech bo‘lmaganda, ulardan ikkitasini rostlash zarurmi; agar chastota qiymati o‘zgarsa, berilgan ma’lum chastotada erishilgan muvozanat saqlanadimi? (5.27) tenglamani u yoki bu muayan shartlar uchun taxlil qilganimizda osonlik bilan yuqoridagi savollarga javob topamiz.

5.3. O‘zgaruvchan tok zanjirida quvvat

Quvvatning oniy qiymati $p = u \cdot i$ va o‘rtacha quvvat P tushunchalari qo‘shimcha izohlar talab etmaydi. Yuqorida (4.79) keltirilganidek, oddiy garmonik tok bo‘lganda aktiv quvvat quyidagicha aniqlanadi

$$P = UI\cos\varphi = \mathrm{Re}\dot{U}\dot{I}^{*}, \qquad (5.29)$$

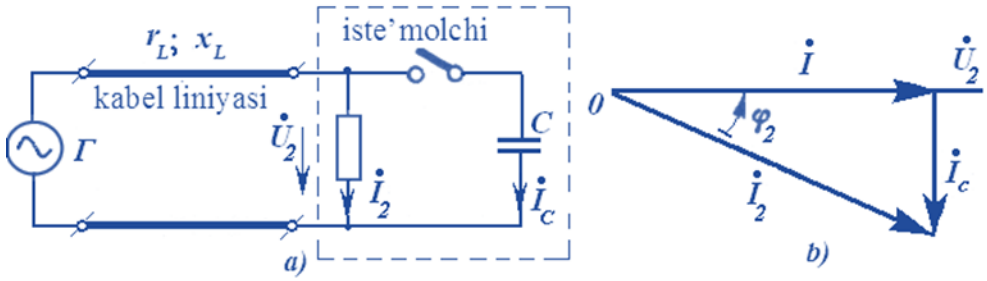
bunda $\varphi=(\psi_u - \psi_i)$ - tok va kuchlanish orasidagi *fazalar farqi* yoki tokning kuchlanishga nisbatan *kechikish fazasi* yoki *faza burchagi*; $\cos\varphi$ - *quvvat koeffisenti* deb ataladi.

Zanjirlarni tahlil qilganda, quvvatga taalluqli bo‘lgan boshqa tushunchalar ham ahamiyatlidir - bular to‘la, reaktiv hamda kompleks quvvatlardir.

To‘la quvvat. U kuchlanish va tokning effektiv (ta’sir etuvchi) qiymatlari ko‘paytmasiga teng

$$S = U \cdot I \qquad (5.30)$$

Faraz qiymatlik, o‘zgaruvchan tok generatori (G) iste’molchi bilan kabel liniyasi (qalin chiziq) orqali bog‘langan (5.10,*a*-rasm).



5.10-rasm. **O‘zgaruvchan tok generatorini iste’molchi bilan kabel liniyasi orqali bog‘lanishi**

Kabel liniyasi va generator uchun cheklangan (eng katta) kuchlanish izolyasiyaning darajasi bilan chegaralanadi: tarmoq tizimining elektrik mustah-kamligi nuqtai nazaridan kuchlanishni nominal qiymati U_{n} dan yuqoriroq oshirish ruxsat etilmaydi. Tarmoq tizimidagi tokning eng katta qiymati, generator chulg‘amlari, tarmoq simlari, kabel simlari qizib ketishining oldini olish uchun tokning nominal I_{n} qiymati bilan chegaralanadi. Ushbu ta’qiqlovchi cheklanishlar alohida kuchlanish hamda alohida tok uchun kiritiladi va, albatta, tok va kuchlanish fazalar burchagiga bog‘liq emas. Nominal (joiz yoki ruxsat etilgan) kuchlanish va tok ko‘paytmasi nominal (joiz) to‘la quvvatni hosil qiladi

$$S_N = U_N \cdot I_N. \qquad (6.31)$$

To‘la quvvatning (nominal S_N dan) ortiqroq bo‘lishi taqiqlangan vaziyatda, kabel (tarmoq) orqali qanday o‘rtacha quvvat uzatilishi mumkin? Bu qiymat tok va kuchlanish fazalari bilan aniqlanadi. O‘z navbatida, faza farqi esa, tokning xarakteriga bog‘liq. Masalan *tok induktiv xarakter*da bo‘lsa, iste’molchi toki I_2 kuchlanish U_2 dan fazasi bo‘yicha φ_2 burchakka kechikadi. Bu holat uchun istemol qilinayotgan foydali quvvat quyidagi qiymatdan

$$P_2 = U_N I_N \cdot \cos_2 = S_N \cos\varphi_2 \qquad (5.32)$$

ortmasligi shart. Masalan liniyaning oxirida tok va kuchlanishning nominal qiymatlari $U_N = 11{,}5$ kV.; $I_N = 200$ A va $\cos\varphi_2 = 0{,}8$ bo‘lsin.

Bunday holatda istemol qilinayotgan quvvat

$$P_2 = 11500 \cdot 200 \cdot 0{,}8 = 2300 \cdot 10^3 \cdot 0{,}8 = 1840 kW = 1{,}84\ mW$$

dan ortiq bo‘lmasligi shart.

Quvvat koeffisiyenti $\cos\varphi_2$ miqdori qanchalar kichik bo‘lsa, istemol qilinayotgan quvvat shunchalar kam bo‘ladi, chunki joiz to‘la quvvat o‘zgarmaydi.

Faza siljishini kompensasiyalash. Keltirilgan 5.10,*a*-rasmda iste’molchiga parallel shunday qiymatdagi sig‘imga ega bo‘lgan kondensator ulaylikki, unda kabelning tok va kuchlanishi orasidagi faza φ_2 nolga teng bo‘lsin, ya’ni quvvat koeffisiyenti $\cos\varphi_2 = 1$ bo‘lsin. Unda tarmoq orqali $P_2 = S_N$ to‘la quvvat oqib o‘tadi.

Bunda iste’molchining o‘zidagi tok I_2 nominaldan ortiq bo‘lishi mumkin, biroq liniyaning oxiridagi tok I nominal qiymatidan oshib ketmaydi.

Bayon qilingan fikrlarni 5.10,*b*-rasmdagi vektor diagrammasida tushuntirishni davom etish mumkin. Ko‘rilayotgan sharoitda kondensator shoxobchasidagi tok $I_C = I_2 \sin\varphi_2$, tarmoq (kabel) oxiridagi tok esa $I = I_2 \cos\varphi_2$ ga teng.

$I_C = U_C \omega C$ bo‘lgani uchun, ixtiyoriy berilgan shartlar uchun zarur bo‘lgan qiymatdagi kondensatorni aniqlash oson.

Reaktiv quvvat. Bu kattalik tok va kuchlanish ta’sir etuvchi (effektiv) qiymatlari ko‘paytmalarini ular orasidagi faza burchagining sinusiga ko‘paytirilganiga teng

$$Q = UI\sin\varphi = S\cdot\sin\varphi. \qquad (5.33)$$

Eslatamiz, shartga ko‘ra φ - induktiv tokning kuchlanishga nisbatan faza siljishi (kechikishi)dir. Kuchlanish $\dot{U}_L = j\omega L\dot{I}$ va $\sin\varphi = \sin\pi/2 = 1$ bo‘lganligi uchun induktivlikning iste’mol qilayotgan reaktiv quvvati quyidagicha aniqlanadi

$$Q = Q_L = U_L I = \omega L I^2 = \omega L I_m^2/2. \qquad (5.34)$$

Sig‘imdagi tok $\dot{I} = j\omega C\dot{U}_C$ kuchlanishdan $\varphi = \pi/2$ burchakka ilgarilashi sababli hamda $\sin\varphi = \sin(-\pi/2) = -1$ bo‘lgani uchun, sig‘imning reaktiv quvvati quyidagicha aniqlanadi:

$$Q = -Q_C = -U_C I = -\omega C U_C{}^2 = -\omega C U_{Cm}^2/2 \qquad (5.35)$$

Reaktiv quvvatlarning ikkala (5.34) va (5.35) qiymatlari ma’lum fizik mazmunga ega; ularning qiymatlari mazkur element (*L* va *S*)larning maksimal maydon energiyalarini burchak chastotasiga ko‘paytirilganiga teng. Shunday qilib, *Q* mazkur element istemol qilayotgan reaktiv quvvatning maksimal oniy qiymatiga teng. Masalan, induktiv elimentning magnit maydoni uchun

$$w_m = \frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2}LI_m^2\sin^2\omega t;$$

$$p = dw_m/dt = \omega L I_m^2\sin\omega t\cdot\cos\omega t = \frac{1}{2}\omega L I_m^2\cdot\sin 2\omega t,$$

ya’ni $$p_{max} = \omega L I_m^2/2 = Q_L.$$

Reaktiv quvvatlarning (5.34) va (5.35) dagi ishoralari har xilligi ham fizik mazmunga ega. Buni faqat oddiy *L* va *S* li ketma-ket (yoki parallel) ulangan zanjirlarda ko‘rish mumkin. Ikkala holda ham, biror elementning maksimal reaktiv quvvati iste’mol qilish oni ikkinchisining maksimal reaktiv quvvati qaytarish oniga mos keladi: *L* va *C* lardagi reaktiv quvvat pulsasiyasining bo‘rchak siljishi π ga teng. Yuqorida keltirilgan faza siljishini kompensasiyalash

usuli aynan induktiv yukdagi reaktiv quvvat sig‘imning reaktiv quvvati bilan komplensiyalashga asos-langan. Reaktiv quvvatlarning qay birini musbat, qay birini manfiy ishora bilan belgilash to‘g‘risidagi savol, mutlaqo shartlidir. Masalan, AQSh da *Q* ning ishorasini bizdagiga (Yevropa va Osiyo) nisbatan teskari belgilash qabul qilingan.

Keltirilgan ta’riflashlardan shu ma’lum bo‘ladiki, to‘la quvvat – aktiv *P* va reaktiv *Q* quvvatlar kvadratlari yig‘indisidan kvadrat ildiz chiqarilganiga teng

$$S=\sqrt{P^2+Q^2} \qquad \text{yoki} \quad Q=\pm\sqrt{S^2-P^2} \tag{5.36}$$

Kompleks quvvat. Bu qiymat kompleks kuchlanishning va tutash kompleks tokning ko‘paytmalari bilan aniqlanadi

$$\dot{S}=\dot{U}\dot{I}^{*}=P+jQ \tag{5.37}$$

Bundagi haqiqiy qism o‘rtacha (aktiv) quvvatga, mavhum qism esa reaktiv quvvatga teng. Komplekslar ko‘paytmalarini yoyib chiqish orqali buni isbotlash mumkin. Agar $\dot{U}=U\angle\psi_{\text{u}}$ va $\dot{I}=I\angle\psi_i$ bo‘lsa, bunda

$$\dot{S}=\dot{U}\overset{*}{I}=U\angle\psi_i\cdot I\angle-\psi_i=U\cdot I(\cos\varphi+j\sin\varphi), \tag{5.38}$$

bunda $\varphi=\psi_u-\psi_i$ – kuchlanish bilan tok orasidagi faza siljish burchagi.

Ma’lumki, quvvatning oniy va o‘rtacha qiymatlari Vattlarda (*W*) yoki unga karrali [kilovatt (*kW*), megovatt (*mW*)] yoki Vattning ulushlari [millivatt (*mW*), mikrovatt (μW) va h.k.] birliklarda o‘lchanadi; quvvatning boshqa turlari shartli birliklarda o‘lchanadi: to‘la quvvat - Volt·Amper (*V·A*), reaktiv quvvat – reaktiv Volt·Amper (*V·Ar*) yoki unga karrali (*kV·A*; *mV·A*; *kV·Ar*; *mV·Ar*).

Elektr uzatish liniyalari va elektr manbalarining yuklanganligi na faqat aktiv quvvat bilan, balki to‘la quvvat bilan ham aniqlanganligi uchun, elektr ta’minoti tizimlarida na faqat istemolchining qabul qilib olgan energiya miqdori (*kW·s*; *mW·s*)

$$W_a=\int_0^t P\,dt, \tag{5.39}$$

qiziqtiradi, balki reaktiv quvvat bilan yuklanganligi yanada etiborli hisoblanadi

$$W_p = \int_0^t Q dt \qquad (5.40)$$

Bu energiya «reaktiv energiyasi» deb ataladi va reaktiv kiloVolt·Amper·soat (*rkV·Ar·s*) yoki reaktiv megoVolt·Amper·soat (*rmV·A·s*) birliklarda o‘lchanadi.

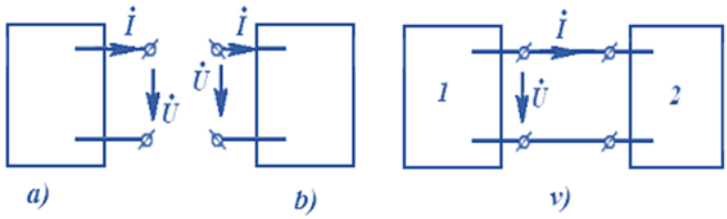
Quvvatni kuchlanish va tokning aktiv va reaktiv tashkil etuvchilari orqali ifodalash. Kompleks tenglik (5.37) hamda aktiv va reaktiv tashkil etuvchilar tariflarini hisobga olgan holda quyidagicha ifodalash mumkin:

$$P = UI_a = U_a I \quad \text{va} \quad Q = UI_p = U_p \cdot I. \qquad (5.41)$$

Bir toifadagi tashkil etuvchilarning ko‘paytmalari, masalan $U_a I_a = UI\cos^2\varphi$, fizik mazmunga ega emas, biroq ular yig‘indilari to‘la quvvatni ifodalaydi

$$U_a \cdot I_a + U_p \cdot I_p = S. \qquad (5.42)$$

Qabul qilinayotgan va uzatilayotgan quvvat. Ixtiyoriy ikki qutblik bo‘lganda (5.11-rasm) undagi qabul qilinayotgan (r_{qab}) va uzatilayotgan (r_{uzat}) quvvatlar haqida gapirish mumkin. Bunda doimo r_{uzat}=-r_{qab} sharti bajariladi. 5.11,*a*-rasmda $p = ui$- uzatiladigan va $p = -ui$ - qabul qilinadigan quvvat; 5.11,*b*-rasmda $p = ui$ - qabul qilinadigan va $p = -ui$ - uzatiladigan quvvat.



5.11-rasm. **Ikki qutblikda qabul qilinayotgan va uzatilayotgan quvvat**

Bu tushunchalar oniy, kompleks, aktiv va reaktiv quvvatlarga xosdir. To‘la quvvatga qolganda, tarifga ko‘ra u xar doim musbat ishora bilan belgilanadi.

Reaktiv quvvatning ishorasi na faqat quvvat uzatilayotgan yoki qabul qilinayotganiga bog‘liq, balki musbat reaktiv (induktiv) quvvat yoki manfiy reaktiv (sig‘im) quvvati ekanligiga ham bog‘liq.

Shuning uchun ikki qutblik manfiy reaktiv quvvatni iste’mol qilayotgan bo‘lsa, u musbat reaktiv quvvatni uzatayapdi deyish mumkin.

Misol. Bir juft ikki qutblikdan iborat bo‘lgan zanjirda kuchlanish va tokning musbat yunalishlari 5.11,*v*-rasmdagidek qabul qilingan. Quyidagi kuchlanish va toklar qiymatlari uchun

A) $\dot{U} = 100 + j100V; \quad \dot{I} = 10 + j5A;$

V) $\dot{U} = 100 + j100V; \quad \dot{I} = 20 - j60A.$

birinchi ikkiqutblikdan uzatilayotgan va ikkinchi ikkiqutblik qabul qilayotgan kompleks quvvatlarni aniqlang.

Bundan tashqari, ushbu ikki qutubliklardan qaysi birini passiv deb qarash mumkin va reaktiv qarshiliklarning xaraktrini (x<0 - sig‘im; x>0 - induktiv) aniqlang.

Yechish. Berilgan A shart uchun birinchi (5.11,*v*-rasm) ikki qutblikdan uzatilayotgan quvvat

$$S_{1uz} = \dot{U}\overset{*}{I} = 1500 + j500.$$

Ikkinchi ikki qutblik ham shu quvvatni qabul qiladi ($S_{2\ to'la} = S_{1uz}$).

Birinchi ikki qutblik tarkibida generator mavjud ekan, ikkinchi ikki qutblikni passiv deyish mumkin; uning qarshiligi induktiv xarakterga ega (φ_2 > 0).

Hisoblar natijasini avvalgi misol bilan solishtirsak, quvvatni aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarga ajratish imkoniyati borligiga ishonch hosil qilamiz.

Berilgan *B* shart uchun birinchi ikki qutublikdan uzatilayotgan quvvat $S_{1uz} = \dot{U}\overset{*}{I} = -4000 + j8000$ $V{\cdot}A$, ya’ni ikkinchi ikki qutblik birinchisiga aktiv quvvat uzatayotganligi aniqlanadi. Passiv deb birinchi ikki qutblikni aytish mumkin, uning qarshiligi

$$\underline{Z}_1 = \dot{U}/(-\dot{I}) = 2{,}24\angle -63^0 25 \ \ \Omega.$$

sig‘im xarakteriga ega.

Birinchi ikki qutblik uzatayotgan reaktiv quvvat manfiydir, yoki boshqacha qilib aytganda - u musbat reaktiv quvvat uzatayapti.

Quvvat balansi (muvozanati). Energiyaning saqlanish qonuniga binoan, har qanday zanjir uchun ixtiyoriy onda quvvat balansi saqlanadi, ya’ni shu zanjirga uzatilayotgan barcha quvvatning oniy qiymati zanjirda istemol qilinayotgan barcha quvvatlar oniy qiymati (*r*)ga teng. Bundan esa quyidagi xulosa kelib chiqadi: zanjirga har xil manbalardan (generatorlardan) kelayotgan barcha o‘rtacha quvvat, zanjirda istemol qilinayotgan barcha o‘rtacha quvvatga teng.

Chiziqli zanjirda shunday balans reaktiv quvvat uchun ham bajariladi: zanjirning ayrim elementlaridan uzatilayotgan reaktiv quvvatlar yig‘indisi, zanjir-dagi boshqa elementlarning iste’mol qilayotgan reaktiv quvvatlari yig‘indisiga teng. Ushbu xulosa energiyaning saqlanish qonuniga asoslanmagan bo‘lsa ham, uni quyidagicha isbotlash mumkin. Faraz qilaylik, ko‘rilayotgan tizimda generator sifatida faqat tok manbalari xizmat qilayapti; bu farazni yetarli darajada umumiy deyish mumkin, chunki har qanday kuchlanish manbaini ekvivalent tok manbai deb qarash mumkin. Ilgarigidek, manbaning $\dot{J}_\ell$ toki φ_ℓ potensialga ega bo‘lgan *l* tugunga oqadi, deb faraz qilamiz. Kirxgofning birinchi qonuniga asoslanib zanjirning barcha tugunlari uchun tenglamalar tizimini yozamiz, bunda *l* tugundan biror *p* tugunga kelayotgan tokni «*ln*» indeks bilan belgilaymiz

$$\dot{I}_{12} + \dot{I}_{13} + \dot{I}_{14} + ... = \dot{J}_1;$$
$$\dot{I}_{21} + \dot{I}_{23} + \dot{I}_{24} + ... = \dot{J}_2;$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

Barcha toklarni ularning tutash qiymatlari orqali almashtirib hamda tenglik-ning har birini ushbu tugun potensialiga ko‘paytirib, quyidagi tenglamalar tizimini hosil qilamiz

$$\dot{\varphi}_1 \cdot \left(\overset{*}{I}_{12} + \overset{*}{I}_{13} + \overset{*}{I}_{14} + ... \right) = \dot{\varphi}_1 \dot{J}_1 = \mathrm{S}_{1G};$$

$$\dot{\varphi}_2 \cdot \left(\overset{*}{I}_{21} + \overset{*}{I}_{23} + \overset{*}{I}_{24} + ... \right) = \dot{\varphi}_2 \overset{*}{J}_2 = S_{2G};$$

.....

Ushbu tengliklarning o‘ng tomonida birinchi S_{1G}, ikkinchi S_{2G} va h.k generatorlardan uzatilayotgan quvvatlar kompleksi mavjud. Bu tengliklarni qo‘shib hamda $\left(\overset{*}{I}_{ln} = \overset{*}{I}_{nl} \right)$ ekanini e’tiborga olib, quyidagi tenglamani hosil qilamiz

$$\overset{*}{I}_{12}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + \overset{*}{I}_{13}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3) + \cdots + \overset{*}{I}_{23}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) +$$

$$\cdots + \overset{*}{I}_{24}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_4) + \cdots = \sum_{\ell} S_{\ell\Gamma} = S_{\Gamma} \qquad (5.43)$$

Tenglama chap tomonidagi har bir had, mazkur 12,13,... shoxobchalar istemol qilayotgan quvvatga teng

$$\mathrm{S}_{12} = \overset{*}{I}_{12}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) = \overset{*}{I}_{12}\dot{U}_{12}; \qquad S_{13} = \overset{*}{I}_{12}\dot{U}_{12} \ldots,$$

o‘ng tomoni esa har bir generatordan keltirilayotgan quvvatlar yig‘indisiga, ya’ni zanjirga tashqaridan kelayotgan barcha quvvatlar yig‘indisiga teng

$$S_G = S_{1G} + S_{2G} \ldots .$$

(5.43) tenglama kompleks quvvatning balansini ifodalaydi: zanjirdagi barcha iste’mol qilinayotgan quvvatlar yig‘indisi ($S_{12} + S_{13} + \cdots + S_{24} + \cdots$) unga barcha keltirilayotgan quvvatlar yig‘indisi S_G ga teng, demak reaktiv quvvatlar balansi ham

$$\sum Q_{\ell n} = \sum Q_{\Gamma} . \qquad (5.44)$$

Tarkibida Z qarshiligi bo‘lgan shoxobchaning istemol qilayotgan kompleks quvvatini Joul-Lens qonuniga o‘xshash shaklda yozish ham mumkin

$$S = \dot{U}\overset{*}{I} = \dot{I}\,\underline{Z}\,\overset{*}{I} = I^2\underline{Z}.$$

Shuning uchun kompleks quvvatlar balansi, agar ixtiyoriy manbada tokning musbat yo‘nalishini e.yu.k. yo‘nalishi bilan mos keladi, deb hisoblansa, quyidagi tenglik bilan almashtirish mumkin bo‘ladi

$$\sum \dot{E}\overset{*}{I} = \sum I^2 \underline{Z}. \qquad (5.45)$$

5.4. Energiyaning uzatilishi

Energiyani uzatishga qo‘yiladigan talablar - signallarni uzatish bilan bog‘liq bo‘lgan telekommunikasiya tizimlarida va energiya uzatishga mo‘ljallangan elektr ta’minoti tizimlarida - bir biridan tubdan farq qiladi. Birinchisida signal manbadan, uning foydali ish koefisiyentiga (f.i.k.) e’tibor bermagan holda, imkon qadar maksimal quvvatni uzatishga harakat qilinadi. Ikkinchisida, agar signalning chastotasi o‘zgaruvchan bo‘lsa, yoki uzatilayotgan signal tarkibida har xil chastota-lar bo‘lsa, u holda tizimning tahlilida ularning chastotaviy tavsiflari masalasi ko‘riladi.

Elektr ta’minoti tizimlarida esa aksincha, f.i.k. haqidagi masala juda muhim bo‘lib, chastota deyarli o‘zgarmas qilib olinganligi sababli, uning energiya uzatish shartlariga ta’siri masalasi hyech dolzarb emas. Iste’molchilar energiya ta’minotidagi kuchlanish qiymatining tebranishi bir necha foiz bilan cheklanganligi sababli, elektr ta’minoti tizimlarining tahlilida yukning o‘zgarishida uning kuchlanishi qanday o‘zgarishini bilish juda ahamiyatlidir.

Maksimal quvvatni uzatish shartlari. Ikki simli liniyada energiya uzatishni, aktiv ikki qutblikdan passiv ikki qutblikka (5.12,*a*-rasm) energiya uzatishga o‘xshatib ko‘rish mumkin. Bunda aktiv ikki qutblik biror *EYuK* manbai *E* va ichki qarshiligi $\underline{Z}_i = R + jX$ ga ega bo‘lgan ekvivalent generator sifatida, passiv ikki qutblik esa qarshiligi $\underline{Z}_{II} = r + jx$ ga teng shoxobcha sifatida ko‘rilishi mumkin (5.12,*b*-rasm).

Iste’molchi olayotgan quvvat Joul-Lens qonuniga binoan

$$P = I^2 \cdot r \qquad (5.46)$$

bunda $$I=\frac{E}{\sqrt{(r+R)^2+(x+X)^2}}.$$ (5.47)

Signalni uzatish tizimlarida, qabul qiluvchi imkon qadar maksimal aktiv quvvatni olishi uchun, manbaning berilgan ($E=const$, $\underline{Z}_i$=const) parametrlarida qabul qiluvchining qarshiligi qanday bo‘lishi kerak, degan muammo turadi, ya’ni $R=R_{max}$ bo‘lgandagi r va x larning qiymatlari aniqlanishi talab etiladi. (5.46) va (5.47) tengliklardan yaqqol ko‘rinadiki, r=const bo‘lganda tokning ortishi natijasi-da quvvat qiymati ortadi va

$$x=-X$$ (5.48)

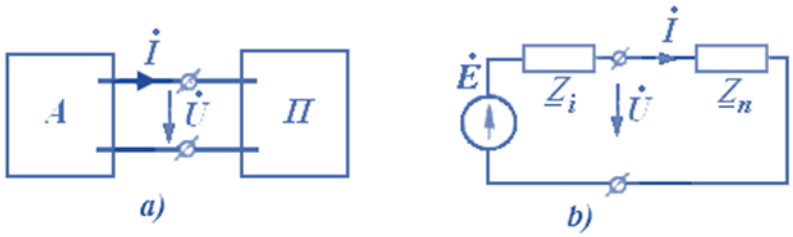
bo‘lganda maksimal qiymatiga erishadi.

Natijada o‘zgarmas tok elektr zanjirlari nazariyasida keltirilganidek, $R=R_{max}$ uchun quyidagi tenglikni hosil qilamiz

$$P=\frac{E^2 r}{(r+R)^2}$$ (5.49)

bunda $$r=R$$ (5.50)

bo‘lishi zarur.



5.12-rasm. **Ikki simli liniyada energiya uzatish**

Bu (5.48) va (5.50) shartlarni kompleks shaklda bir bog‘lanish yordamida ifodalaymiz

$$\underline{Z}_{yk}=\underline{Z}_i.$$ (5.51)

Ushbu shart bajarilganda iste’molchi qabul qilayotgan quvvat maksimal bo‘ladi

$$P_{max}=E^2/4R.$$ (5.52)

Qiymati shunga teng bo‘lgan quvvat manbaning ichki qarishiligida sarf bo‘ladi (chunki $r=R$). Shuning uchun tizimning f.i.k. 50% bo‘ladi. Albatta, bunday kichik f.i.k. elektr ta’minoti tizimlarini mutlaqo qoniqtirmaydi.

Ularda, aksariyat, r ning qiymati R ga nisbattan ancha kichik bo‘ladi.

Manba bilan iste’molchini muvofiqlash. Iste’molchining kirish qarshiligi va manbaning ichki qarshiligi tengligi shartiga *muvofiqlash sharti* deyiladi.

Agar maksimal quvvat uzatish sharti qo‘yilgan, hamda qarshiliklar xarakteri kompleks tarzda bo‘lsa, ularning tengligi (5.51) bog‘lanishi bilan almashtiriladi. Ba’zan, fizik va konstruktiv sabablarga ko‘ra, iste’molchining aktiv qarshiligini manba ichki aktiv qarshiligiga teng qilib olishning imkoniyati bulmaydi. Bunday hollarda, qo‘shimcha reaktiv elementlar kiritib, hosil bo‘lgan ikki qutiblikning ichki qarishiliklarini $\underline{Z}_{kir} = r_{kir} + jx_{kir}$ muvofiqlash imkoniyati tug‘ilishi mumkin ekan. Muvofiqlashtirish - manba bilan iste’molchi orasiga transformator kiritish bilan amalga oshirilishi mumkin.

Quyida qo‘shimcha reaktiv eliment kiritib (5.13-rasm) muvofiqlash yo‘lini ko‘rsatamiz. Ikki reaktiv elementlar parametrlari (x_1 va x_2) hamda tanlangan sxemaga qarab, r_{kir} ning qiymatini r ga nisbatan yoki ortiq yoki kam olish mumkin.

Masalan, maksimal quvvat hosil qilish shartini quyidagicha yozib,

$$\underline{Z}_{\text{kir}} = R_{kir} + jX_i = Z_i = R - jX, \qquad (5.53)$$

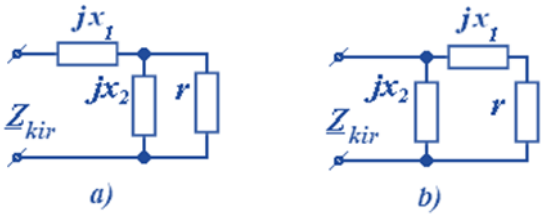
unda *ikki* mustaqil tenglama borligini ko‘rami

$$k_{kir} = R \quad \text{va} \quad x_{kir} = X.$$

Tabiiyki, agar yechimlar haqiqiy qiymatlar bo‘lishiga olib kelsa, yuqoridagi shartlarni x_1 va x_2 parametrlarni tegishli ravishda tanlash yo‘li bilan ta’minlash mumkin.

R, X va r qiymatlari berilgan deb faraz qilib, 5.13-rasmda keltirilgan ikki sxema uchun izlangan x_1 va x_2 qiymatlarni aniqlaymiz. 5.13,*a* -rasmdagi sxema uchun kirish qarshiligi

$$\underline{Z}_{kir} = r_{kir} + jx_{kir} = jx_1 + jx_2 r/(r + jx_2) = j\left(x_1 + \frac{x_2 \cdot r^2}{r^2 + x_2^{\,2}}\right) + \frac{x_2^{\,2} r}{r^2 + x_2^{\,2}}.$$



5.13-rasm. **Manba bilan iste'molchini muvofiqlash**

Yechim haqiqiy qismini manbaning berilgan qarshiligiga tenglashtirib

$$r_{\text{kir}} = x_2^2 r/\left(r^2 + x_2^2\right) = R, \tag{5.54}$$

quyidagini aniqlaymiz:

$$x_2 = \pm r\sqrt{R/(r-R)}. \tag{5.55}$$

Izlanayotgan yechim faqat $r>R$ bo'lgandagina mavjuddir. Bunda 2 indeksli shoxobchaga yoki induktivlik (agar yechim ildizi oldida plyus ishora bo'lsa ($x_2>0$) yoki sig'im (agar yechim ildizi oldida minus ishora olinsa $x_2<0$) kiritiladi. Kirish qarshiligining mavhum qismi ishorasini manba induktiv qarshiligi ($-x$)ning teskari ishorasiga tenglashtirib, quyidagini hosil qilamiz

$$x_1 = -\left(X + \frac{x_2 r^2}{r^2 + x_2^2}\right).$$

Bunga (5.55) dan x_2 ni qo'yib, oddiy o'zgartirishlardan so'ng quyidagini hosil qilamiz

$$x_1 = -[X \pm \sqrt{R(r-R)}]. \tag{5.56}$$

Bu bog'lanishda ildiz oldi ishoralarning yuqorisidagi tanlangan x_2 ning musbat ishorasiga mos keladi.

Shunga e'tibor berish lozimki, faqat $r>R$ bo'lgandagina x_1 haqiqiy (musbat yoki manfiy) son bo'ladi. 5.13,*b*-rasmdagi sxema uchun ham bog'lanishlar shu usulda keltirib chiqariladi

$$x_1 = \pm\sqrt{r\left[X^2/R + (R-r)\right]}, \tag{5.57}$$

$$x_2 = (Xr + Rx_1)/(R-r). \tag{5.58}$$

Bu bog'lanishlardan ko'ramizki, 5.13,*b*-rasmdagi sxema uchun faqatgina

$$r < R + X^2/R \tag{5.59}$$

bo‘lgandagina yechim mavjud ekan.

Kuchlanish chastotasi o‘zgarishi bilan muvofiqlashtirish uchun kiritilayotgan L va C qiymatlari ham o‘zgaradi.

Misol. Berilgan $\underline{Z}_1=R+jX=600+j800\ \Omega$ va $r=1200\ \Omega$ qarshiliklarni 5.13,*a*-rasm zanjiriga kiritib, iste’molchi va manbani muvofiqlash uchun reaktiv qarshilik-ni tanlang.

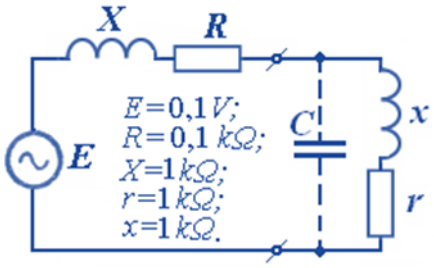
Yechish. 5.13,*a*-rasmdagi zanjir uchun keltirib chiqarilgan ifodalardan foydalanib quyidagilarni aniqlaymiz: $x_2=\pm 1200\ \Omega$ va $x_1=-(800\pm 600)\ \Omega$.

Qarshilik x_1 ning birinchi $x_1=-1400\ \Omega$ qiymati 2-shoxobchadagi induktivlik-ka ($x_2=1200\ \Omega$) mos keladi; x_1 ning ikkinchi qiymati $x_1=-200$ esa 2-shohobchadagi sig‘imga mos keladi ($x_2=-1200\ \Omega$).

Signal hosil qiluvchi manbaining yukini kamaytirish. Aksariyat muvofiqlash masalasi boshqacha tarzda qo‘yiladi: manbaning yuklanishi imkoni boricha kamaytirish zarur; biroq, buning natijasida istemolchining (yuklanishning) istemol qilgan quvvati kamaymasligi zarur. Masalan, tarkibida kichik quvvatli signal manbai bo‘lganda shunday shart qo‘yiladi. Manba va istemolchida katta induktivlik bo‘lgan holatda eng sinalgan va oddiy usul yaxshi natijalar beradi. Bu usulning mohiyati shundaki, unda yukka parallel S sig‘im ulanadi (5.14-rasm), natijada yukning kirish qarshiligi keskin ortadi. Bunda sig‘im qiymati shunday tanlanadiki, istemolchining to‘liq kirish qarshiligi faqat aktiv tashkil etuvchiga ega bo‘lishigacha erishiladi.

Keltirilgan usul barcha yirik korxonalar va energetika tizimlarida quvvat koeffisiyenti $\cos\varphi$ ni oshirish uchun qo‘llaniladi.

Misol. 5.14-rasmda manba va istemolchi ko‘rsatilgan. Ular parametrlarining qiymatlari sxema ostida keltirilgan. Manbaning toki va iste’molchining olayotgan quvvati quyidagi holatlar uchun aniqlansin: a) punktir chiziq bilan belgilangan sig‘im C uzilgan; b) sig‘im C mavjud va ikki parallel shoxobchalar umumiy reaktiv o‘tkazuvchanliklari nolga teng.



5.14-rasm. **Manba va iste'molchi**

Yechish. a) sig'im ulanmagan holatda zanjirning toki quyidagiga teng edi: $I' = E/\sqrt{(R+r)^2+(X+x)^2} = 49{,}7\,\mu A$, iste'molchining iste'mol qilayotgan quvvati $P' = (I')^2 \cdot r = 0{,}248\,\mu W$ bo'ladi;

b) umumiy reaktiv o'tkazuvchanlik nolga teng bo'lishi uchun zarur bo'lgan sig'imning qiymati quyidagi tenglikdan aniqlanadi

$$\omega C = -\mathrm{Im}\left(\frac{1}{r+jx}\right) = \frac{x}{(r^2+x^2)}.$$

Bunda ikki parallel shoxobchalarning qarshiliklari

$$r=(r^2+x^2)/r \approx 10{,}1\ k\Omega.$$

Manbaning toki

$$I = E/\sqrt{(R+r_{kir})^2+X^2} = 9{,}75\ \mu A.$$

Yuklanishning iste'mol qilayotgan quvvati

$$P' = (I')^2 \cdot r = 0{,}248\ \mu W.$$

Energiyani uzatish uchun mo'ljallangan zanjirlar. Soddalashtirilgan holatda mazkur zanjirning tarkibiga U_1 kuchlanishli manba, $\underline{Z}_{yk}$ qarshilikli iste'molchi bilan $\underline{Z}_L$ qarshiligi bo'lgan bog'lovchi liniya kiradi.

Agar manba kuchlanishi $\dot{U}_1$ hamda $\underline{Z}_L$ va $\underline{Z}_{yk1}$ qarshiliklar berilgan bo'lsa, zanjirning umumiy tokini

$$\dot{I} = \dot{U}_1/(\underline{Z}_L + \underline{Z}_{yk}), \qquad (5.60)$$

hamda iste'molchining kuchlanishini $\dot{U}_2$ ni aniqlash mumkin

$$\dot{U}_2 = \dot{I}\,\underline{Z}_{yk} = \dot{U}_1\,\underline{Z}_{yk}/\left(\underline{Z}_L + \underline{Z}_{yk}\right). \qquad (5.61)$$

Bunda iste’molchining tortayotgan quvvati

$$\mathrm{S}_2 = \dot{U}_2 \overset{*}{I} = P_2 + jQ_2 = I^2 Z_{yk}. \tag{5.62}$$

Manbaning uzatayotgan quvvati esa

$$S_1 = \dot{U}_1 \overset{*}{I} = P_1 + jQ_1 = S_2 + I^2 Z_L. \tag{5.63}$$

Ko‘rilayotgan zanjirning foydali ish koeffisiyenti

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / \left(P_2 + I^2 \cdot r_L\right). \tag{5.64}$$

Keltirilgan bog‘lanishlardan foydalanib, boshqa berilgan qiymatlar U_2, P_2, Q_2, Z_L uchun ham zanjirning ishlash rejimini aniqlash mumkin. Bunda (5.62) dan ma’lum bo‘ladiki

$$\dot{I} = \mathrm{S} / \overset{*}{U}_2 = P_2 / \overset{*}{U}_2 - jQ_2 / \overset{*}{U}_2 \tag{5.65}$$

va manbaning kuchlanishi

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{I}\,\underline{Z}_L. \tag{5.66}$$

Tokning qiymati na faqat iste’molchining aktiv quvvatiga, balki uning reaktiv quvvatiga ham, boshqacha qilib aytganda, uning quvvat koeffisenti $Sos\varphi_2$ ga bog‘liq ekan; tokning moduli

$$I = P_2 / U_2 \cos\varphi_2. \tag{5.67}$$

Ushbu qiymatni (6.64) ga qo‘ysak, quvvat uzatishdagi f.i.k.ni hisoblashning eng sodda bog‘lanishini keltirib chiqaramiz

$$\eta = \frac{1}{1 + P_2 r_{Л} / U_2^2 \cdot \cos\varphi_2}. \tag{5.68}$$

Bundan ma’lum bo‘ladiki, iste’molchining kuchlanishi va $\cos\varphi_2$ ning ortishi bilan uning f.i.k. ortar ekan, bundan ko‘ra aniqroq qilib aytsak, liniya oxiridagi kuchlanishning aktiv tashkil etuvchisi ortsa, iste’molchining f.i.k. ham ortar ekan.

Agar $U_{2a} = const$ bo‘lsayu, biroq uzatilayotgan quvvat ortsa, f.i.k. ning qiymatini ilgarigidek holatda saqlash uchun liniyaning aktiv qarshiligini kamaytirish zarur. (5.68) bog‘lanish f.i.k. ning katta bo‘lishi uchun liniya kuchlanishini oshirish nechog‘lik muhim ekanini ko‘rsatadi. Kuchlanishni,

masalan, 6,3 kV dan 110 kVga (17,5 marta) kuchaytirib uzatilsa, f.i.k.ning o‘zgarmas qiymatida liniya qarshiligini 10 marta oshirish (yoki simning kesim yuzasini kamaytirish) va uzatilayotgan quvvatni 30 marta kuchaytirish mumkin.

Kuchlanish pasayuvi va yo‘qotilishi. Liniyaning toki bilan kompleks qarshiligi ma’lum bo‘lsa, unda kuchlanish pasayuvini aniqlash mushkul ish emas

$$\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{I}\,\underline{Z}_L. \tag{5.69}$$

Biroq, iste’molchi nuqtai nazaridan olganda, berilgan kuchlanish va tizim parametrlarida, liniya oxiridagi kuchlanish U_2 ning modulini aniqlash zarur. Boshqacha qilib aytganda, liniya boshi va oxiridagi kuchlanishlar modullarining ayirmasi

$$\Delta U = U_1 - U_2, \tag{5.70}$$

yani *kuchlanish passayuvini* aniqlash ahamiyatlidir.

Umumiy holda, ayirmaning moduli (kuchlash pasayuvi moduli) modullar ayrmasiga teng emas.

Faraz qilaylik $\dot{U}_2 = U_2 e^0 = U_2$, ya’ni kompleks kuchlanish tarkibida faqat haqiqiy qiymat mavjud (mavhum had nolga teng) va $\varphi_2 > 0$ bo‘lsin. Bu holatda $\dot{I} = \dot{I}_a + \dot{I}_r = I_a - jI_r$ (5.6,*a*-rasmga qarang) va

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{I}\,\underline{Z}_L = \dot{U}_2 + (I_a - jI_r)(r_L + jx_L) = U_2 + I_a r_L + I_r \cdot x_L + j(I_a x_L - I_r r_L).$$

Modulning qiymatini haqiqiy va mavhum qisimlar kvadratlari yig‘indisidan kvadrat ildiz chiqarilganiga teng deb hisoblab, $\left(\frac{x_L I_a - r_L \cdot I_r}{U_2 + r_L I_a + x_L I_r}\right)^2 < 0{,}002$ bo‘lganda 1% aniqlik bilan hisoblaymiz

$$U_1 \approx U_2 + I_a r_L + I_r x_L. \tag{5.71}$$

Ushbu sharoitda

$$\Delta U = U_1 - U_2 \approx r_L I_a + x_L I_r \tag{5.72}$$

deb hisoblash mumkin.

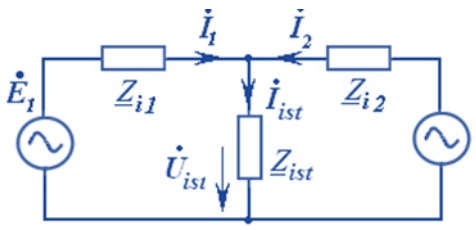
Yuqoridagi mulohazalardan ko‘rinadiki, berilgan liniya va yuklanishda liniya oxiridagi kuchlanishlar pasayuvini reaktiv quvvat yordamida ma’lum chegaralarda boshqarish mumkin ekan.

Ikki manbali zanjir. Telekommunikasiya korxonalarini elektr energiyasi bilan ta’minlash tizimlarida, aksariyat, bir necha manba qatnashadi.

Soddalashtirilgan (5.15-rasm) zanjirda $\underline{Z}_{ist}$ iste’molchi bilan kuchlanishlari $\dot{E}_1$, $\dot{E}_2$ va ichki qarshiliklari $\underline{Z}_{i1}$, $\underline{Z}_{i2}$ bo‘lgan manbalar ulangan. Bu qarshiliklar qiymatlari liniyalar va generatorlarning ichki qarshiliklarini o‘z ichiga oladi. Bunday tizimning rejimi nafaqat e.yu.k.lar qiymatlari bilan, balki ular orasidagi fazalar farqi bilan ham aniqlanadi.

O‘zgaruvchan tok zanjiridagi ikki manbaning ichki qarshiliklari tarkibida reaktiv elementlarning mavjudligi, shunga o‘xshash bo‘lgan o‘zgarmas tok zanjiri-dan tubdan farq qiladi. O‘zgarmas tok zanjirida bir manba e.yu.k.ning ortishi, u tomonidan uzatilayotgan quvvatning ulushiga ta’sir etadi, holos. Agar o‘zgarmas tok manbasining e.yu.k. qiymati iste’molchi kuchlanishidan kichik bo‘lsa, u uzatayotgan quvvat manfiy ishorada bo‘ladi, ya’ni manba iste’molchiga aylanadi (akkumulyatorni zaryadlayotgan generator akkumulyatordan quvvat olayotgan motorga aylangani kabi).

O‘zgaruvchan tok zanjirida manbalardan birining e.yu.k. qiymati ortishi, u uzatayotgan quvvatning ortishiga olib kelishi shart emas. U reaktiv quvvat ishlab chiqarishga olib kelishi mumkin, holos. Uzatilayotgan quvvatning qiymati e.yu.k. ning faza burchagi o‘zgarishiga qo‘pdan bog‘liqdir.



5.15-rasm. **Ikki manbali zanjir**

Nazorat savollari

1. Elektr zanjiri tenglamalarining kompleks shakldagi ko‘rinishlarini sharhlab bering.

2. Passiv ikki qutblikning kirish qarshiligi va kirish o‘tkazuvchanligini tushuntirib bering.

3. Tok va kuchlanishning aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarini tushuntirib bering.

4. Kompleks tekislikda potensial diagrammalarini izohlab bering.

5. O‘zgaruvchan tok zanjirida quvvatlarni sharhlab bering

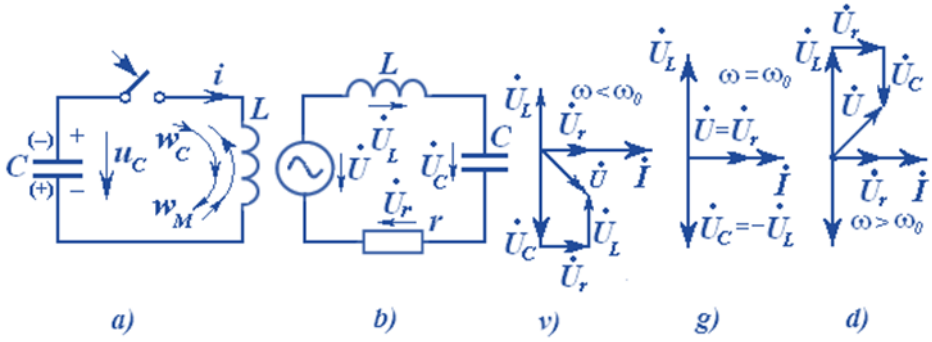
6. Energiyaning uzatilishiga misollar keltiring.

6-BOB. REZONANS, CHASTOTAVIY TAVSIF VA UZATISH FUNKSIYASI

6.1. Elektr zanjirlarida rezonans hodisalarining tahlili

Rezonans hodisasi oldingi mavzularda qisqacha bayonda berilgan edi. Ushbu bobda uni batafsil fizik jarayonlar va matematik tahlil yordamida o‘rganamiz.

O‘zgaruvgan tok zanjirlari tarkibida induktivlik bilan sig‘im bo‘lgan holatda ularni o‘rganish alohida qiziqish uyg‘otadi. Chunki ma’lum shartlar bajarilganda *L* va *C* elementlari tebranma kontur hosil qilishi ayon. Masalan, sig‘imi oldindan zaryadlangan *L*-*C* konturda (6.1,*a*-rasm) kalit ulanishi bilan garmonik tebranishlar hosil bo‘ladi. Rasmda tanlangan musbat tok yo‘nalishi sig‘imning razryadlanishiga $i = -C du_C/dt$ mos keladi.



6.1-rasm. ***L*-*C* konturda garmonik tebranishlar**

Bu tok oqimi yordamida sig‘imdagi zahiralangan elektr maydoni energiyasi $w_C = Cu^2_{\tilde{N}}/2$ induktivlik *L* ga o‘tadi va unda magnit energiyasi $w_M = Li^2/2$ ga aylanadi. Induktivlikda magnit maydon energiyasi maksimum qiymatiga erishib, sig‘imga tokning shu yo‘nalishida energiya qaytariladi va *S* teskari ishora bilan zaryadlanadi (6.1,*a*-rasm qavs ichidagi ishoralar). Sig‘im energiyasi maksimal qiymatiga erishgach, u energiyani tokning avvalgi yo‘nalishiga teskari yo‘nalishda induktivlikka qaytaradi. *L* da energiya maksimal qiymatga erishgach, shu tok yo‘nalishida energiya *C* ga yana qaytariladi va kondensator dastlabki ishoralar bilan qayta zaryadlanadi (6.1,*a*-

rasm qavssiz ishoralar). Shu tarzda $L-C$ konturda tebranishlar hosil bo‘ladi. Ideal - rezistorsiz (r=0, ya’ni isrofsiz) zanjir bo‘lsa «so‘nmas» tebranishlar davom etaveradi. Konturda rezistor mavjud bo‘lganda ($r\neq0$) L va C orasidagi energiya almashinuvi natijasida rezistordan tok oqib o‘tadi va unda I^2r quvvat isrofini hosil qiladi; tebranishlar esa so‘nuvchi bo‘ladi. Kontur-dagi energiya almashinuvi tebranishlari chastotasi *faqat sig‘im va induktivlik qiymatlariga bog‘liq*

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

Agar konturni garmonik kuchlanishlar manbaiga ulansa, u holda energiya almashinuvidagi I^2r isroflar manbadan kelayotgan energiyadan olinadi; bunda tebranishlar chastotasi manba tokining chastotasiga teng bo‘lishi ham mumkin

$$\omega = \omega_0.$$

Rezonans hodisasi bir necha hil ta’riflanishi mumkin. Bu ta’riflardan biri L va C elementlarga ega bo‘lgan *passiv ikki qutblikning kirish qismida kuchlanish fazasi* φ_u *va tok fazasi* φ_i *mos* (*teng*)*, ya’ni* $\varphi_u-\varphi_i=\varphi=0$ *bo‘lsa, rezonans hodisasi mavjud bo‘ladi*; bunda mazkur ikki qutblik tashqaridan reaktiv quvvat olmaydi ($\varphi=0$). Bunday rezanons *energetik yoki faza rezonansi* deyiladi. Rezonansning bunday ta’rifi elektrotexnikada keng qo‘llaniladi.

Ikkinchi ta’rif axborot texnologiyalari sohalariga ko‘proq mos keladi. Unga ko‘ra, rezonans hodisasi L va C passiv elementlari bo‘lgan zanjirga tashqaridan berilayotgan kuchlanish yoki tokning burchak chastotasi ω zanjirning xususiy (rezonans) chastotasi ω_0 ga teng bo‘lganda kuzatiladi. Bunday rezonans radio-texnik (to‘lqin) rezonansi deb ataladi. Ushbu ikki hil ta’riflanayotgan hodisa aslida yagona fizik jarayondir, ya’ni $\varphi_u-\varphi_i=\varphi=0$ bo‘lganda $\omega=\omega_0$ kuzatiladi.

6.2. Kuchlanishlar rezonansi

Zanjirda L, r, C elementlar ketma-ket (6.1,*b*-rasm) ulangandagi rezonans shunday nomlanadi. Ushbu ketma-ket ulangan zanjirdagi tok quyidagicha

aniqlanadi

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{r + j(x_L - x_C)} = \frac{\dot{U}}{r + jx} \quad , \qquad (6.1, a)$$

yoki

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} , \qquad (6.1,b)$$

bunda

$$x = x_L - x_C = \omega L - 1/\omega C .$$

Rezonans bo‘lganda manba kuchlanishining burchak chastotasi xususiy burchak chastotasiga teng bo‘ladi

$$\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC} , \qquad (6.2)$$

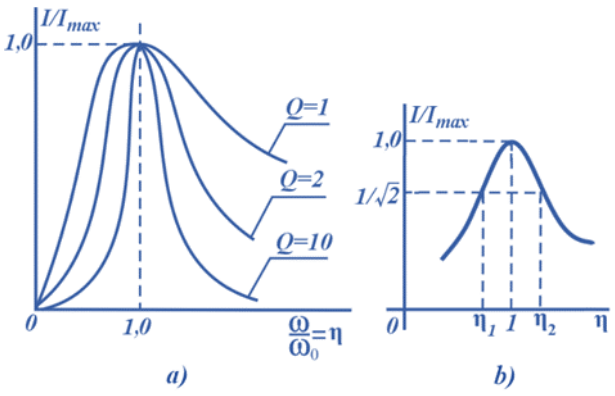
va passiv elementlarning toki o‘zining maksimal qiymatiga erishadi

$$I_{max} = U/r, \qquad (6.3)$$

bunda x=0 bo‘lganligi uchun *kirishdagi kuchlanish va tok fazalari teng* $\varphi_u = \varphi_i$ (yoki *mos*) *bo‘ladi.* Bu xolat uchun 6.1, *g*-rasmda sxemaning vektor diagrammasi tasvirlangan. Tenglik (6.3) dan shuni anglash mumkinki, rezonansga erishish uchun ikki usuldan birini qo‘llash mumkin ekan: yoki manba kuchlanishining chastotasi ω ni yoki kontur L va S parametrlaridan biri (x_L va x_C, ya’ni xususiy chastota ω_0)ning qiymatlarini o‘zgartirish zarur ekan.

Tok I, kuchlanish U_L yoki U_C larning ω, L yoki C ga bog‘liqligi rezonans funksiyalari deyiladi. Ushbu funksiyalarning nisbiy chastota orqali ifodalari ko‘proq qo‘llaniladi

$$\eta = \omega/\omega_0 = \omega\sqrt{LC} . \qquad (6.4)$$



6.2-rasm. **Rezonans egri chiziqlari**

Rezonans konturining muhim parametrlaridan bir – *Q* asllikdir. *Asllik deb, reaktiv elementlardan biri qarshiligining (ya'ni* $\omega_0 L$ *yoki* $1/\omega_0 C$ *), unga ketma-ket ulangan aktiv qarshilikka nisbatiga aytiladi*

$$Q = \omega_0 L / r = 1/(\omega_0 C r) = \rho / r . \qquad (6.5)$$

Ushbu tenglikning suratida konturning tavsifiy qarshiligi ρ keltirilgan. Uning qiymati

$$\rho = \sqrt{L/C} . \qquad (6.6)$$

Berilgan kontur rezonans funksiyalarining nisbiy birlikdagi ko'rinishlari uning aslligiga bog'liqdir (6.2,*a*-rasm). Biroq bu bog'lanishlar masalaning mohiyatini ($\omega = \omega_0$ bo'lganda tokning maksimum I_{max} ga erishishini) ko'rsatgani bilan, I_{max} ning absolyut qiymati qanday o'zgarishini aniqlamaydi. Shuning uchun, $I(\omega)$ bog'lanishda tokni absolyut qiymatda oladigan bo'lsak, *Q* ning katta qiymatlarida va $\omega \neq \omega_0$ da *I* ning qiymati birnecha amperni tashkil etsa ham, $\omega = \omega_0$ bo'lgandagi I_{max} ning qiymati o'nlab, ba'zan esa yuzlab ampergacha yetishi ko'rish mumkin.

Tenglik (6.1,*b*) ga o'zgaruvchan η va *Q* parametrni kiritsak, tokning umumlashtirilgan rezonans funksiyasini aniqlaymiz

$$I = \frac{U}{r\sqrt{1+\frac{1}{r^2}(\eta\omega_0 L - 1/\eta\omega_0 C)^2}} = \frac{I_{max}}{\sqrt{1+Q^2\cdot(\eta - 1/\eta)^2}} . \qquad (6.7)$$

Hosil bo'lgan tenglik hamda 6.2,*a*- va 6.2,*b*-rasmlarda keltirilgan bog'-lanishlardan shuni anglash mukinki, konturning aslligi qanchalar katta bo'lsa, tokning rezonans egri chizig'i shunchalar tik bo'ladi va I_{max} shunchalar katta bo'ladi.

Rezonans konturining yana bir muhim qiymatlaridan biri, rezonans funksiyasi kengligi yoki konturning uzatish kengligi deb nomlangan $\Delta\eta$ kattalikdir. U tokning qiymati $I_{max}/\sqrt{2}$ bo'lgandagi η_1 va η_2 chastotalar farqiga teng (6.2,*b*-rasm). Bunda konturning kompleks qarshiligi rezonansdagi $Z_{min}=r$ minimal qarshilikka nisbatan $\sqrt{2}$ marta katta bo'ladi.

Tenglik (6.7) dan $I_{max}/I=\sqrt{2}$ deb hisoblab η_1 va η_2 larning qiymatlarini aniqlaymiz

$$\sqrt{2}=\sqrt{1+Q^2\left(\eta_{1,2}-1/\eta_{1,2}\right)^2}$$

yoki
$$1=\pm Q\left(\eta_{1,2}-1/\eta_{1,2}\right), \tag{6.8}$$

bundagi musbat ishora $\eta_2$ning qiymatiga, manfiy ishora esa $\eta_1$qiymatiga mos keladi. Shunday qilib,

$$\eta_2-1/\eta_2=1/Q \quad \text{va} \quad \eta_1-1/\eta_1=-1/Q. \tag{6.9}$$

Bu qiymatlarning yig‘indisini hisoblab, quyidagini aniqlaymiz

$$\eta_1+\eta_2-(\eta_1+\eta_2)\eta_1\eta_2=0$$

undan
$$\eta_1\cdot\eta_2=1 \quad \text{yoki} \quad \omega_0=\sqrt{\omega_1\omega_2} \tag{6.10}$$

ekanligi ma’lum bo‘ladi. Demak rezonans chastotasi ω_0 uzatish kengligi chegaraviy chastotalarining o‘rtacha geometrik qiymatiga teng.

Rezonans chastotasi ω_0 ni tajriba usuli bilan ham aniqlash mumkin. Buning uchun ω ning qiymatini o‘zgartirib, tokning maksimal qiymatiga mos kelgan $\omega=\omega_0$ ni aniqlash kifoyadir. Biroq tajribalar shuni ko‘rsatadiki, avval ω_1 va ω_2 (η_1 va η_2) chegaraviy chastotalarni o‘lchab olib (bu qiymatlar orasida tok keskin o‘zgarishini kuzatish mumkin), so‘ngra (6.10) dagi o‘rtacha geometrik qiymat orqali hisoblash aniqroq natija beradi.

Yuqoridagi (6.9) tengliklarning ikkinchisini birinchisidan ayirsak, quyidagi-larni aniqlash mumkin

$$\eta_2-\eta_1+(\eta_2-\eta_1)/\eta_1\eta_2=2Q$$

yoki
$$\eta_2+\eta_1=\Delta\eta=1/Q. \tag{6.11}$$

Bu shunday xulosaga olib keladi: rezonans funksiyasining kengligi kontur aslligiga teskari bo‘lgan qiymatga teng; demak, rezonans funksiyasi shakli orqali uning aslligini aniqlash mumkin ekan.

Induktivlik va sig‘imdagi kuchlanishning chastotaga bog‘liqligi quyidagicha ifodalanadi

$$U_L=\omega LI=\frac{\omega LU}{\sqrt{r^2+\left(\omega L-1/\omega C\right)^2}}, \tag{6.12}$$

$$U_C = \frac{I}{\omega C} = \frac{U}{\omega C\sqrt{r^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}, \qquad (6.13)$$

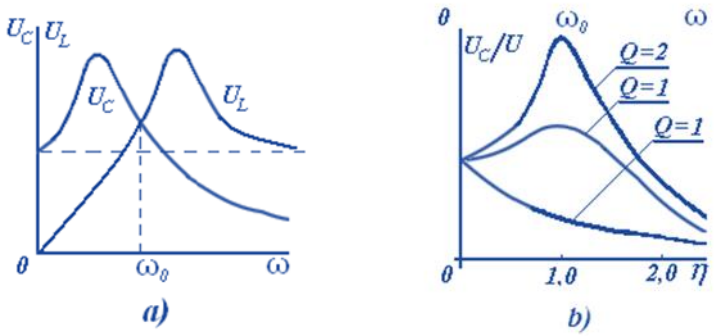
yoki nisbiy chastota η ni kiritib hamda (6.5)ni e'tiborga olib, quyidagilarni aniqlaymiz

$$U_L = \eta\omega_0 LI = \frac{\eta Q}{\sqrt{1+Q^2(\eta - 1/\eta)^2}} \cdot U = \frac{\eta Q}{\sqrt{1+Q^2\alpha^2}} \cdot U \qquad (6.14)$$

$$U_C = \frac{1}{\eta\omega_0 C} I = \frac{Q}{\eta\sqrt{1+Q^2(\eta - 1/\eta)^2}} \cdot U = \frac{Q}{\eta\sqrt{1+Q^2\alpha^2}} U \qquad (6.15)$$

bunda $\alpha = (\eta - 1/\eta)$ – konturda rezonansdan uzoqlashish darajasini ko'rsatuvchi parametr. Uni boshqacha ifodalash ham mumkin

$$\xi = (\omega^2 - \omega_0^2)/\omega^2 = \alpha/\eta = \alpha\omega_0/\omega.$$



6.3-rasm. **Rezonansni chastotaviy tavsifi**

Rezonas funksiyalari $U_L = f(\omega)$ va $U_C = f(\omega)$ 6.4,*a*-rasmda keltirilgan. Birinchisi (agar $Q > 1/\sqrt{2}$ bo'lsa) ω_0 ga nisbatan yuqoriroq chastotada maksimum-ga erishadi, chunki ω (6.12.) ifodaning suratida joylashgan, ikkinchisi - ω_0 dan quyiroq chastotada maksimumga erishadi, chunki ω (6.13) ifodaning maxrajida joylashgan. Ushbu chastotalarning qiymatlarini mazkur funksiyalar maksimumlari orqali aniqlash mumkin

$$\eta_L = \frac{1}{\sqrt{1 - 1/2Q^2}}; \quad \eta_C = \sqrt{1 - 1/2Q^2}, \qquad (6.16)$$

bunda η_L va $\eta_{\tilde{N}}$ - (6.14) va (6.15) qiymatlar maksimumiga mos keluvchi nisbiy chastotalar.

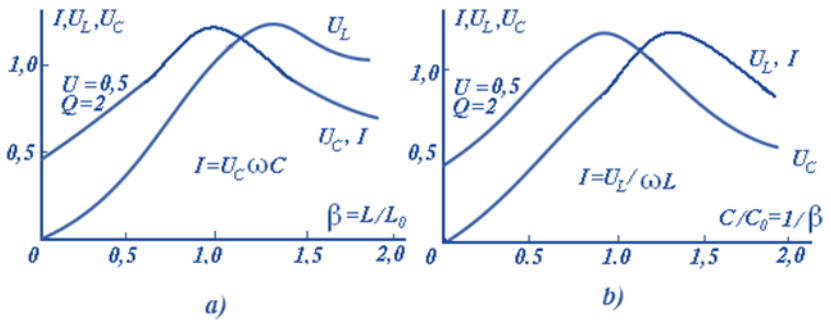
Bu kuchlanishlarning maksimal qiymatlari bir hil va quyidagicha

aniqlanadi

$$U_{L\max}=U_{C\max}=\frac{Q}{\sqrt{1-1/4Q^2}}\cdot U. \qquad (6.17)$$

Agar rezonans vaqtida $x_L=x_C>>R$ yoki $Ix_L=Ix_C>>IR$, $U_L=U_C>>U_R=U$ dan ayrilishi mumkin va ketma-ket tebranish konturida kuchlanishlar rezonansi bo‘ladi. Sababi reaktiv elementlardagi kuchlanishlar zanjir kirishidagi kuchlanishdan ancha katta bo‘lishi mumkin.

Ushbu (6.16) va (6.17) tengliklardan quyidagilar ma’lum bo‘ladi. Asillikning qiymati $Q>5$ bo‘lganda rezonans chastotalar ($\eta_0 \approx 1$)da U_L va U_C funksiyalar maksimumlarini 1% aniqlik bilan $Q\cdot U$ ga teng deb qabul qilish mumkin.



6.4–rasm. **Rezonansdagi maksimal qiymatlar**

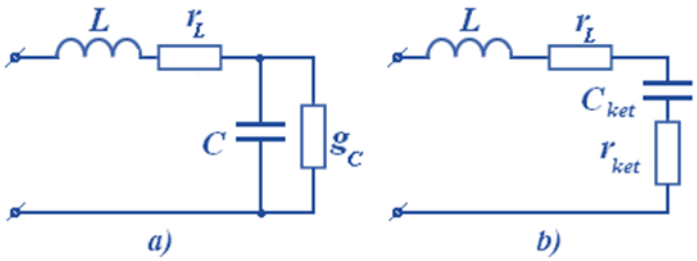
Bunda keltirilgan tahlil va xususan, (6.10), (6.11) shakldagi tenglamalar tarkibida *L, r, C* bo‘lgan ekvivalent konturlarni hisoblash uchun qo‘llanilishi mumkin, biroq ulardagi energiya tebranishi va sarflanishi boshqa fizik jarayonlar sifatida ko‘rilishi mumkin.

Rezonansda o‘lchashlar. Yuqorida ko‘rsatilganidan, ketma-ket ulangan konturning sig‘imi yoki induktivligi qiymatlarini o‘zgartirib rezonans jarayoniga sozlash mumkin. Buning natijasida U_{Lmax} yoki U_{Cmax}ning holatlari chapga yoki o‘ngga surilishi mumkin, chunki *L* va *S* qiymatlar (6.12) va (6.13) ifodalarning tarkibida mavjud.

6.3,*a*–rasmda (6.7), (6.12) va (6.13) tengliklar yordamida qurilgan - induktivlik o‘zgargandagi (ya’ni *L=var* bo‘lgandagi) hamda 6.3,*b*-rasmda

konden-satorning sig‘imi o‘zgargandagi (ya’ni $S=var$ bo‘lgandagi) I, U_S, U_L ning o‘zgarishlari keltirilgan; bunda qolgan parametrlar o‘zgarmas.

Funksiyalar maksimumining sezilarli siljishi faqat asllikning kichik qiymat-laridagina ko‘rilada, masalan 6.3,*a* va *b*-rasmlar $Q=2$ uchun qurilgan; bundan tashqari, rezonans jarayonining o‘zi ham sust ekanligi ko‘zga tashlanadi. Q ning katta qiymatlarida, masalan $Q>10$ bo‘lganda U_L va U_C larning siljishlari 1% ga ham yetmaydi (6.4–rasm).



6.5–rasm. **Sxemalarining o‘zaro ekvivalentligi**

Parallel va ketma-ket almashtirish sxemalarining o‘zaro ekvivalentligi. Soddalashtirilgan holatda real induktivlikdagi energiyaning so‘nishi g‘altak o‘tkazgichlaridagi aktiv qarishilik r_L ning mavjudligi bilan tushuntiriladi. Shu sababli induktiv g‘altak o‘rniga ketma-ket ulangan ikki elementlar L va r_L qabul qilinadi. Kondensatordagi energiyaning so‘nishi esa, plastinkalar orasidagi izolyat-siya takomil emasligi natijasida o‘tkazuvchanlik mavjudligi bilan tushuntiriladi. Bunda, ushbu g_C o‘tkazuvchanlik sig‘im S bilan paralel ulangan deb hisoblanadi. Quvvat isrofi mavjud bo‘lgan g‘altak va kondensatorlar ketma-ket ulangandagi (6.5,*a*-rasm) sxemani ekvivalent ketma-ket almashtirilgan sxema sifatida (6.5,*b*-rasm) keltirish qulaydir, unda

$$r_{ket}=g_S / (g^2_S + \omega^2 C^2) \qquad (6.18)$$

va

$$C_{ket} =(g^2 C+g^2)/ \omega^2 C, \qquad (6.19)$$

keyingi ifodalarda C va g_S kondensatorning parallel ulangan almashtirish sxemasiga (6.5,*a*-rasm) mos keladi. C_{ket} va r_{ket} esa - ketma-ket almashtirish sxemasiga mos keladi (6.5,*b*-rasm). E’tibor bersak, g_C qanchalar kichik bo‘lsa, r_{ket} shunchalar kichik bo‘lishi ko‘zga tashlanadi.

Induktivlik g‘altagi parametrlarini ham ixtiyoriy ketma-ket ulangan (L va

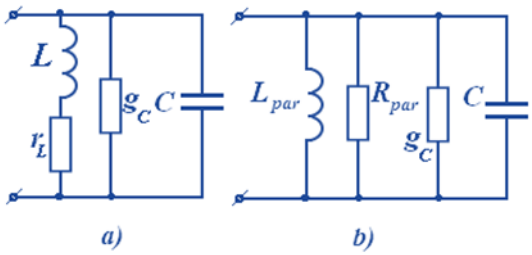
r_L) yoki parallel ulangan deb faraz qilib olishimiz mumkin; keyingi holatda

$$R_{par}=(\omega^2 L^2 + r^2_L)/ r_L \qquad (6.20)$$

va $$L_{par}=(\omega^2 L^2 + r^2_L)/ \omega^2 L \qquad (6.21)$$

[(6.15) va (6.16) tengliklarga qarang]. Shunga e'tibor berish zarurki, r_L qaranchalar kichik bo'lsa, R_{par} shunchalar katta bo'ladi. G'altak parametrining aynan shunday ekvivalent almashtirish sxemasi uni sig'imlar bilan parallel ulaganda qo'llashga qulay hisoblanadi (6.6,*a*,*b*-rasmlar).

Induktivlik g'altagi va kondensatorlar aslliklari. Sxemalari 6.1,*a* va 6.5,*b*-rasmlarda keltirilgan zanjirlarni taqqoslab, asillikning kamayishi sababi - g'altak $(I^2 \cdot r_L)$ va kondensatordagi $(I^2 r_{кем} = U_C^2 g_C)$ energiya isrofi natijasi ekanligini ko'rish mumkin.



6.6-rasm. **Ekvivalent almashtirish sxemasi**

Darhaqiqat, asllik ifodasi (6.5) ni tahlil qilib, uni quyidagi shaklga keltirsak

$$1/Q = 1/\omega L = r_L/(\omega L) + r_{ket}/(\omega L),$$

har bir elementning unga ta'sirini osonlikcha baholash mumkin. Ammo rezonansda $1/(\omega L) = \omega C_{ket}$ bo'lgani uchun, keyingi tenglikni quyidagicha yozish mumkin

$$1/Q = 1/Q_L + 1/Q_C, \qquad (6.22)$$

bunda $$Q_L = \omega L / r_L \quad \text{va} \quad 1/Q_C = r_{ket}\omega C_{ket}. \qquad (6.23)$$

Aniqlangan Q_L va Q_C larning son qiymatlari g'altak va kondensatorning asilliklari deyiladi. Shunisi ayonki, asilliklarning almashtirish sxemalari boshqa parametrlar orqali ham ifodalanishi mumkin

$$Q_L = R_{par}/\omega L_{par}; \quad 1/Q_C = g_S/\omega C_{ket}, \qquad (6.24)$$

ularni aniqlash (6.23) tenglikka (6.18)–(6.21)larni qo‘yish orqali erishildi.

6.3. Toklar rezonansi

L, r, C larni parallel ulash bilan hosil qilingan rezonans hodisasi shunday nomlangan. Ushbu uch elimentlar ulanishining soddalashtirilgan shakli 6.7,*a*-rasmda keltirilgan. Bu holda

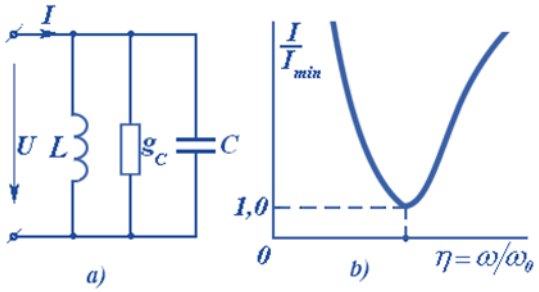
$$\dot{I} = (g - jb)\dot{U} = [g - j(b_L - b_C)]\dot{U} \qquad (6.25)$$

yoki

$$I = U\sqrt{g^2 + b^2} = U\sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}\,, \qquad (6.26)$$

bunda

$$b = b_L - b_C = 1/\omega L - \omega C. \qquad (6.27)$$



6.7-rasm. **Toklar rezonansida elementlar ulanishi**

Rezonans holatida $b_L = b_C$ va $b = 0$ bo‘lgani uchun tokning fazasi kuchlanishning fazasi bilan mos keladi va 6.7,*a*-rasmdagi soddalashtirilgan zanjirda tokning qiymati $I = gU$ minimal bo‘ladi. U=const bo‘lgandagi rezonans funksiyasi $I/I_{\min} = f(\eta)$ 6.7,*b*-rasmda keltirilgan.

Agar bu zanjirda $b_L = b_C >> g$ yoki $Ub_L = Ub_C >> Ug$, $I_L = I_C >> I_g = I$ bo‘ladi. Demak, reaktiv elementlardagi toklar zanjir kirishidagi tokga nisbatan ancha katta bo‘lishi mumkin. Shuning uchun bunday rezonansga toklar rezonansi deyiladi.

Tahlil qilinayotgan parallel ulangan *L, r, C* zanjirning kompleks qarshiligini aynan shu elimentlarni ketma-ket ulab, ularning kompleks o‘tkazuvchanligi bilan solishtirilsa, ular orasida to‘la o‘xshashlik borligini ko‘rish qiyin emas. Bunday o‘xshashlik *duallik prinsipi* deyiladi (6.1-jadvalga qarang).

Reaktiv va aktiv qarshiliklari bo‘lgan shoxobchalarni parallel ulash. Bunday zanjirlardagi rezonansni tahlil qilish birmuncha murakkabroqdir. 6.6,*a*-rasmdagi kondensatorga parallel ulangan (L-r_L) induktivlik va aktiv qarshilik 6.7,*a*-rasmdagi zanjirga nisbatan o‘zining chactotaviy xususiyatlari bilan haqiqatga yaqinroqdir. Birinchi sxemadagi (6.6,*a*-rasm) zanjirning rezonans shartlari quyidagicha ifoda bilan aniqlanadi

$$\omega^2_r = 1/LC - r^2_L/L^2 \qquad (6.28)$$

Ushbu shart 6.1-jadvaldagi 6.7,*a*-rasm sxemasi uchun keltirilgan shartdan farqlidir.

Umumiy tokning minimal qiymati rezonans chastotasi ω_r ga mos kelmasdan, undan biroz kattaroq chastotaga mos ekanini ko‘rish mumkin

$$\omega^2_{\min} = \omega^2_p + 1/\sqrt{LC}\left[\sqrt{1+2(r_L g + r_L^{\,2}/\rho^2)} - 1\right]. \qquad (6.29)$$

6.1.-jadval

Ketma-ket ulangandagi (6.1,*b*-rasm)	**Parallel ulangandagi (6.6, *a*-rasm)**
$\underline{Z} = r + j(\omega L - 1/\omega C)$ $\underline{Y} = g - jb = \dfrac{1}{r + j(\omega L - 1/\omega C}$ $g_{\max} = 1/z_{\min} = 1/r$ $Q = \omega_0 L/r$	$\underline{Y} = g + j(\omega C - 1/\omega L)$ $\underline{Z} = r + jx = \dfrac{1}{g + j(\omega C - 1/\omega L)}$ $r_{max} = 1/y_{\min} = 1/g$ $Q = \omega_0 C/g$
$\dfrac{\underline{Y}}{g_{\max}} = \dfrac{1 - jQ\alpha}{1 + jQ^2\alpha^2} = \dfrac{\underline{Z}}{r_{\max}}$ Ikalla holatda ham $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}; \eta = \omega/\omega_0; \alpha = \eta - 1/\eta.$	

Murakkab konturlardagi rezonans. Agar ikki qutublikning reaktiv eliment-lari soni ikkitadan ortiq bo‘lsa (6.8-rasm), uning kirish qarshiligi chastotaning bir necha qiymatlarida sof aktiv (rezonans) bo‘lishi mumkin; shunga o‘xshash, tok ham chastotaning mazkur bir necha qiymatlarida o‘zining ekstremal qiymatlariga erishishi mumkin. Bayon qilingan hodisa reaktiv elementlardan birining o‘zgarishida ham ko‘rinishi mumkin.

Masalan, 6.8,*a*-rasmdagi zanjir uchun birinchi toklar rezonansini $\omega L_2 = 1/\omega C$, ya’ni kirish o‘tkazuvchanligi Y nolga teng bo‘lganda ham kuzatish mumkin; bu parallel shoxobchalar uchun qabul qilingan ideallashtirish shartiga

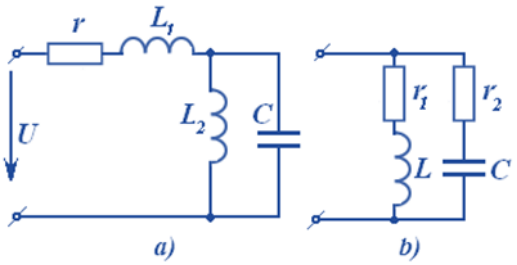
mos keladi, ya’ni shoxobchalarda quvvat isrofi bo‘lmaydi. 6.8,a-rasmga nisbatan rezonans sharti quyidagicha aniqlanadi. Zanjirning kompleks qarshiligi

$$\underline{Z}=\mathrm{r}+\mathrm{j}\omega\mathrm{L}_1+\frac{j\omega L_2\cdot\frac{1}{j\omega C}}{j\omega L_2+\frac{1}{j\omega C}}=r+j(\omega L_1-\frac{\frac{L_2}{C}}{\omega L_2-\frac{1}{\omega C}})=r+jx \qquad (6.30)$$

$$x=\omega L_1-\frac{L_2}{C(\omega L_2-\frac{1}{\omega C})}=0; \qquad \omega^2 L_1 C L_2-L_1-L_2=0; \qquad \omega_0=\sqrt{\frac{L_1+L_2}{CL_1L_2}};$$

Kirish o‘tkazuvchanligi modulining ekstremallik shartlari, ushbu o‘tkazuv-chanlik reaktiv tashkil etuvchisining nolga teng bo‘lishi bilan mos kelmasligi mumkin. Qarshilik aktiv tashkil etuvchilarining katta qiymatlarida shunga o‘xshash rezonans umuman yo‘qolishi ham mumkin.

6.8,*b*-rasmdagi zanjirda qiziqarli jarayonni kuzatish mumkin; agar parallel konturda $r_1=r_2=\sqrt{L/C}$ bo‘lsa, u holda chastotaning ixtiyoriy qiymatlarida ham kirish o‘tkazuvchanligi sof aktiv bo‘lib, qiymati $Y=\sqrt{C/L}$ ga teng bo‘ladi, ya’ni chastotaning ixtiyoriy qiymatlarida rezonans saqlanadi.



6.8-rasm. **Parallel shoxobchalar**

6.4. Chastotaviy tavsiflar

Ikki qutbliklar. Chiziqli ikki qutblik haqidagi to‘liq axborotni, hususan, keltirilgan ixtiyoriy kuchlanishga nisbatan uning reaksiyasini (aks ta’sirini) chastotaviy tavsifdan, ya’ni kirish qarshiligi yoki o‘tkazuvchanligi haqiqiy va mavhum qismlarining chastotaga bog‘liqligidan qurib olish mumkin

$$\left.\begin{aligned} Y(j\omega)&=g(\omega)-jb(\omega)=y\angle-\varphi\,,\\ Z(j\omega)&=r(\omega)+jx(\omega)=z\angle\varphi. \end{aligned}\right\} \qquad (6.31)$$

Agar keltirilgan kuchlanish tarkibida bir necha garmonik tashkil

etuvchilar bo‘lsa ham, chastotaviy tavsif yordamida uning kirish tokini aniqlash mumkin; chastotaviy tavsif yordamida o‘tkinchi jarayondagi tokni ham aniqlash mumkin.

Shuni e’tiborga olish zarurki, chiziqli passiv ikki qutblik bo‘lganda, kompleks o‘tkazuvchanlik (qarshlik)ning haqiqiy va mavhum qismlari chastotaviy tavsiflari yoki uning moduli va argumentlari chastotaviy tavsiflari orasida ma’lum bog‘lanish mavjuddir.

Umumiy holda, chastotaning kompleks funksiyasini quyidagicha belgilash qabul qilingan

$$F(j\omega)=F_1(\omega)-jF_2(\omega) \quad ,$$

bunda $F_1(\omega)$ va $F_2(\omega)$ yoki soddalashtirib yozganda F_1 va F_2- chastotaning haqiqiy funksiyalari.

F_1 bilan F_2 orasidagi ma’lum bog‘lanishni umumiy holda quyidagi integral-lar bilan ifodalash mumkin

$$\left.\begin{aligned} F_1(\omega_1)&=\frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}\frac{\omega F_2(\omega)}{\omega^2-\omega_1^2}d\omega+F_1(\infty);\\ F_2(\omega_1)&=-\frac{2}{\pi}\omega_1\int_o^{\infty}\frac{F_1(\omega)}{\omega^2-\omega_1^2}d\omega. \end{aligned}\right\} \qquad (6.32)$$

Ushbu tengliklarni keltirib chiqarish adabiyotda mavjud bo‘lib, fizikada 1927 yildan Kramers va Kronig formulalari nomi bilan ma’lum; tahminan 20 yildan so‘ng chiziqli elektr zanjirlar nazariyasiga kiritildi. (6.32) ifodalar chastota-ning $\omega=0$ dan $\omega=\infty$gacha bo‘lgan oralig‘ida o‘zgarishida bir tashkil etuvchi cheksiz qiymatga ega bo‘lmasa, ikkinchi tashkil etuvchisining chastotaviy bog‘lanishini ushbu oraliqda aniqlash mumkin ekanligini ko‘rsatadi.

Ikki qutblikning chastotaviy tavsiflarini eksperiment natijalari yordamida ham qurish mumkin. Bu usul bilan qurilgan chastotaviy tavsiflar zanjirlarning almashtirish sxemalaridagi berilgan parametrlar asosida hisoblangan chastotaviy tavsiflarga nisbatan ikki qutublikning hususiyatlarini to‘laroq ifodalaydi, chunki ko‘p hollarda, ayniqsa katta chastotalarda *L*, *r*, *C* qiymatlarining o‘zi ham chastotaga bog‘liq. Undan tashqari, zanjir elementlari bog‘lanish sxemasini

chizish jarayonida biz uni, aksariyat, soddalashtiramiz; mavjud kichik induktivlik, sig‘im, qarshiliklarni e’tiborga olmaymiz.

Agar ikki qutblikning chastotaviy tavsiflari ma’lum bo‘lsa, ushbu ikki qutblik ishtirok etgan zanjirning barcha hisoblashlari uchun ikki qutblik ichidagi har xil elementlar ulanishlarini va ularning parametrlarini bilish shart emas.

Bundan tashqari, ikki qutublikning ichki qismida elektr zanjirlari nazariyasi va uning elementlari doirasiga kirmaydigan jarayonlar mavjud bo‘lsa, masalan mexanik tebranishli ultra tovush generatorining (MTG) kirish qismiga kelayotgan elektromagnit energiyasi ultra qisqa to‘lqindagi mexanik energiyaga aylantirayot-gan bo‘lsa, mazkur ikki qutblikning chastotaviy tavsiflari elektr zanjirlari atama-larida, aniq ifodalanishi mumkin

$$Y(j\omega)=g(\omega)-jb(\omega)$$

Bunday mexanik to‘lqinlarning quvvati juda katta bo‘lishi mumkin. MTG ning manbai bunda elektr zanjiri sifatida qaralib, aniq chastotaviy tavsifga $Y(j\omega)$ ega bo‘lgan ikki qutblik deb ko‘riladi; ushbu tavsif rezonans xarakteriga ham ega bo‘lishi mumkin. Shunga o‘xshash, radio to‘lqinlarini tarqatuvchi anntennani ham, ta’minlovchi kabelga nisbatan ikki qutblik deb qarash mumkin.

Bir necha ikki qutbliklar parallel ulanganda, ularning o‘tkazuvchanliklari yig‘indisi olinadi. Shuning uchun, bunday ulanishlar natijasida hosil bo‘lgan natijaviy o‘tkazuvchanlik qiymati har bir ikki qutbliklarning o‘tkazuvchanliklari yig‘indisiga teng $Y(j\omega)=\sum^{n}Y_n(j\omega)$. Ketma-ket ulanganda esa ular qarshiliklari yig‘indisi olinadi. Bunday vaziyatda, ayrim ikki qutbliklar uchun tavsiflari o‘tkazuvchanlik orqali ifodalangan bo‘lsa, ularni teskarisiga aylantirib, qarshiliklar bilan ifodalash zarur.

Reaktiv ikki qutbliklarning chastotaviy tavsiflari. In-duktivlik g‘altagi *L* va kondensatori *C* bo‘lgan elektr zanjirlarini loyihalash jarayonida (masalan *LC*-filtrlar, faza o‘zgartiruvchi konturlar) ular chastotaviy tavsiflarining alohida hususiyatlarini ajratib olib o‘rganish uchun aksariyat, qiymatlari kichik bo‘lgan

aktiv qarshiliklarni e’tiborga olmasa ham bo‘ladi, ya’ni ikki qutblikni sof reaktiv deb qarash mumkin. Bunday reaktiv ikki qutbliklarning chastotaviy tavsiflari ularni berilgan tavsiflar asosida sintez qilish imkoniyatini taqdim etuvchi ma’lum qonuniyatlarga bo‘ysunadi.

Oddiy reaktiv ikki qutblik deb kompleks qarshiliklari $Z_L = jx' = j\omega L$ va $Z_C = jx'' = 1/j\omega C = -j/\omega C$ bo‘lgan induktivlik *L* va sig‘im *S* li zanjirga aytiladi.

Ularning chastotaviy tavsiflari 6.9,*a*-rasmda keltirilgan. L_1 va S_1 lar ketma-ket ulangandagi kompleks qarshiliklari quyidagi ifodadan aniqlanadi

$$\underline{Z} = jx = j\left(\omega L_1 - 1/\omega C_1\right) = j\omega L_1\left(1 - 1/\omega^2 L_1 C_1\right) = \frac{L_1}{j\omega}(\omega_1^2 - \omega^2) \qquad (6.33)$$

bunda $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$ – ketma-ket rezonans konturining yoki kuchlanish rezonansining ikki qutblik reaktiv qarshiligi nolga teng bo‘lgandagi «nol» chastotasi (6.9,*b*-rasm).

L_1 va C_1 lar parallel ulaganganda ularning kompleks qarshiliklari quyidagicha bo‘ladi

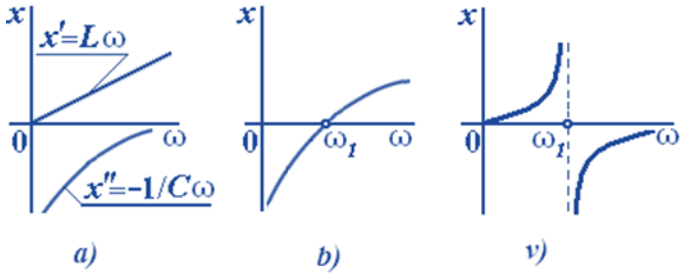
$$\underline{Z} = jx = \frac{j\omega L_1 \cdot 1/j\omega C_1}{j\left(\omega L_1 - 1/\omega C_1\right)} = \frac{j\omega}{C_1(\omega_1^2 - \omega^2)} \qquad (6.34)$$

bunda $\omega_1 = 1/\sqrt{L_1 C_1}$ –parallel rezonans konturi yoki tok rezonansi reaktiv ikki qutblikning qarshiligi cheksizlikka teng bo‘lgandagi - «qutb» chastotasi (6.9, *v*-rasm).

Har qanday reaktiv ikki qutblik uchun bo‘lganidagi kabi, barcha qurilgan tavsiflar uchun $dx/d\omega > 0$ sharti bajariladi. Masalan, 6.10, *a*-rasmda keltirilgan ikki qutblikning chastotaviy tavsifini ular alohida shoxobchalari tavsiflarining yig‘indisi deb qaraymiz; buning uchun 6.9,*v*-rasmdagi parallel konturning x_1 va 6.9,*a*-rasmdagi x' tavsiflarini qo‘shamiz, chunki kontur va induktivlik ketma-ket ulangan. Hosil bo‘lgan chastotaviy tavsif $dx/d\omega > 0$ shartini qanoatlantiradi, parallel kontur rezonans chastotasi ω_1 da «qutb»ga ega va ketma-ket rezonans chastotasi ω_1 da «nol»ga ega. Ketma-ket (6.33) va parallel (6.34) konturlardagi kabi, ikki qutblikning kompleks qarshiligi *Z* ni ω_1 va ω_2 rezonans chastotalari

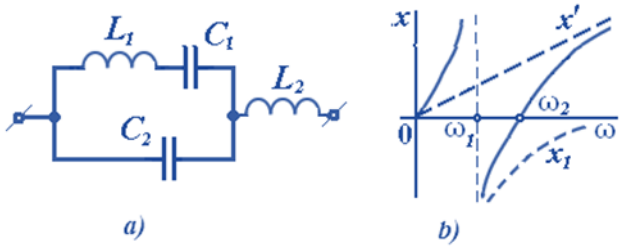
orqali ω ning kasr rasional funksiyasi sifatida ko‘rsatish mumkin

$$\underline{Z} = jx = \frac{j\omega L_1 \cdot 1/\, j\omega C_1}{j\left(\omega L_1 - 1/\,\omega C_1\right)} + j\omega L \qquad (6.35)$$



6.9-rasm. **Chastotaviy tavsiflar**

Qarshilik *Z* ifodasi ω_1 chastotasida «qutb» bo‘lishini ta’minlash uchun maxrajida $(\omega_1^2 - \omega^2)$ ikki hadlik bo‘lishi lozim, chastotasi ω_2 bo‘lganda «nol» bo‘lishini ta’minlash uchun *Z* suratida $\left(\omega_2^2 - \omega^2\right)$ ikki hadlik mavjud bo‘lishi zarur.



6.10-rasm. **Rezonansda reaktiv qarshiliklar chastotaviy tavsiflar**

Undan tashqari, juda katta chastotalarda C_1 sig‘imning qarshiligi L_1 va *L* induktivliklar qarshiliklaridan anchagina kichik. Shuning uchun, 6.10,*a*-rasmda ikki qutblikning qarshiligi induktivlik *L* qiymati bilan aniqlanadi (chunki C_1 sig‘imning juda kichik qarshiligi *L* induktivlikni «qisqa tutashtiradi») va $j\omega L$ qiymatga intiladi. Yuqorida keltirilgan *Z* qarshilik $\omega >> \omega_1$ va $\omega >> \omega_2$ bo‘lganda 1 ga intiladi, ya’ni ushbu bog‘lanishda $j\omega L$ bo‘lmaydi va *Z* ning qiymatiga

$$\underline{Z} = j\omega L\left(\omega_2^2 - \omega\right)/\left(\omega_1^2 - \omega^2\right)$$

yaqinlashadi.

Reaktiv qarshilik xaqida teorema. Har qanday reaktiv ikki qutblik uchun $dx/d\omega > 0$ tengsizligi bajariladi.

Darhaqiqat, har qanday ikki qutblik *m* shoxobchadan iborat bo‘lib, har bir *k*-nchi shoxobchalar ketma-ket ulangan L_k induktivligi va C_k sig‘imidan iboratdir (bir necha induktivlik va sig‘im ketma-ket ulangan bo‘lsa, ularni ketma-ket ulangan ekvivalent L_k va C_k bilan almashtirish mumkin). Ixtiyoriy *k*-nchi shoxobcha uchun $dx_k / d\omega_k > 0$ sharti bajariladi (6.9-rasm). Ikki qutblikning umumiy qarshiligi $\tilde{o}$ barcha *k* shoxobchalar qarshiliklarining funksiyasidir, shuning uchun bir necha o‘zgaruvchilari bo‘lgan funksiyalarni differensiallash qoidasiga muvofiq

$$\frac{dx}{d\omega} = \sum_{k=1}^{m} \frac{\partial x}{\partial x_k} \frac{dx_k}{d\omega} \quad , \tag{6.36}$$

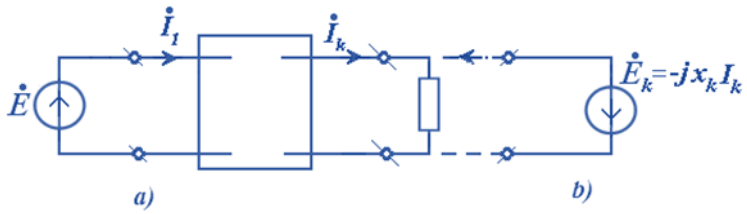
har qanday kontur uchun hosila $\partial x / \partial x_k > 0$ to‘g‘ri ekanligini isbotlash kifoyadir.

Buning uchun ikki qutblikning kirish qismiga $\dot{E} = \dot{E}_1$ e.yu.k. manbaini ulaymiz, *k*-nchi shoxobchani (6.11,*a*-rasm) ajratamiz, hamda jx_k qarshilikni kompensiyalash prinsipiga asosan (§3.7) e.yu.k. $\dot{E}_k = -jx_k \dot{I}_k$ bilan almashtiramiz; bunda ifodaning manfiy ishorasi $\dot{E}_k$ musbat yo‘nalishiga $\dot{I}_k$ ning musbat yo‘nalishi mosligi uchun qo‘yilgan. Superpozisiya usulidan foydalanib $\dot{I}_1$ va $\dot{I}_\text{k}$ toklarni quyidagicha ifodalaymiz

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \underline{Y}_{11} \dot{E}_1 + \underline{Y}_{1k} \dot{E}_k; \\ \dot{I}_k &= \underline{Y}_{k1} \dot{E}_1 + \underline{Y}_{kk} \dot{E}_k, \end{aligned}\right\} \tag{6.37}$$

bunda Y_{nl} o‘tkazuvchanlik x_k qarshilikka bog‘liq emas, ya’ni x_k o‘zgarishida Y_{nl} o‘zgarishsiz qoladi. $\dot{E}_k$ ning o‘rniga uning $-jx_k \dot{I}_k$ qiymatini qo‘ysak, so‘ngra ikkala tenglama tarkibidan tok $\dot{I}_k$ ni ajratib olsak, $\dot{I}_1(\dot{E}_1)$ bog‘lanishni

aniqlaymiz



6.11-rasm. **Kompensiyalash prinsipi**

$$\dot{I}_1=\left(Y_{11}-\frac{jY_{1k}\cdot Y_{k1}x_k}{1+jY_{kk}x_k}\right)\dot{E}_1, \tag{6.38}$$

bundan

$$jx=\frac{\dot{E}_1}{\dot{I}_1}=\frac{1+jY_{kk}x_k}{Y_{11}+j\left(Y_{11}Y_{kk}-Y_{1k}^2\right)x_k} \tag{6.39}$$

va hosilani aniqlaymiz

$$\frac{\partial x}{\partial\omega}=\frac{Y_{1k}^2}{\left[Y_{11}+j\left(Y_{11}Y_{kk}-Y_{1k}^2\right)x_k\right]^2}.$$

Agar reaktiv ikki qutblik kirish va uzatish o‘tkazuvchanliklarini sof mavhum sonlar deb faraz qilsak, ya’ni $Y_{n\ell}=-jb_{n\ell}$, u holda

$$\frac{\partial x}{\partial x_k}=\frac{b_{1k}^2}{\left[b_{11}+\left(b_{11}b_{kk}-b_{1k}^2\right)x_k\right]^2}>0 \tag{6.40}$$

ekanligi isbotlangan bo‘ladi.

Ushbu $dx/d\omega>0$ shartdan shunday xulosa kelib chiqadi: *har qanday reaktiv ikki qutblikda «nol»lar va «qutb»lar almashinib turadi*; $\omega=0$ bo‘lganda induktivlik orqali «tok uchun yo‘l ochiq» ya’ni, o‘zgarmas tok uchun induktivlikning qarshiligi nolga teng x =0; yoki bunday «ochiq yo‘l» bo‘lmasa, unda $x=-\infty$; agar $\omega\to\infty$ sig‘im orqali «ochiq yo‘l» bo‘lsa $x\to0$, aks xolda $\omega\to0$ esa $x\to\infty$.

Parallel-ketma-ket shoxobchalardan tashkil topgan har qanday ikki qutblik sxemasining shakliga ko‘ra parallel va ketma-ket rezonans chastotalari sonini ham aniqlash mumkin.

Faraz qilaylik, ketma-ket yoki parallel ulangan bir turdagi elementlar (*L* yoki *C*) ekvivalent elementlar bilan almashtirilgan. U holda ikki elementi (*L* va

C) bo‘lgan ikki qutblik bir rezonans chastotasiga ega bo‘ladi (6.9,*b* va *v*-rasm); sxemaga bir element qo‘shib uni murakkab shaklga keltirsak, u holda rezonans chastotasi bittaga ortadi (6.10-rasm). Masalan, 6.10,*a*-rasmda keltirilgan ikki qutblikda uchta rezonans chastotasi mavjud. Induktivlik orqali «ochiq yo‘l» bo‘lmaganligi uchun $\omega=0$ bo‘lganda chastotaviy tavsif $x=-\infty$ dan boshlanadi va ω_1- rezonans chastotalarning birinchisi - ketma-ket rezonans chastotasidir (6.10,*b*-rasm).

Sxema shaklidan hamda tavsifdan darhol kompleks qarshilik $\underline{Z}=jx$ ekanligi aniqlaymiz; uning ifodasi suratida ikkita ikki hadlik $\left(\omega_к^2-\omega^2\right)$ va maxrajida bitta ikki hadlik mavjud

$$\underline{Z}=\cdots\left(\omega_1^2-\omega^2\right)\left(\omega_3^2-\omega^2\right)/\left(\omega_2^2-\omega^2\right).$$

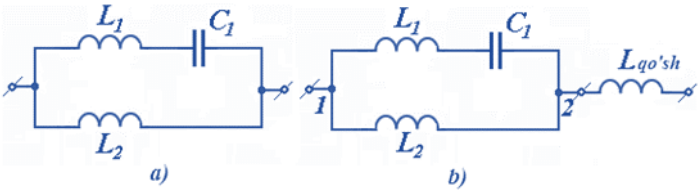
Sxemadan shu ayon bo‘ladiki, $\omega\to\infty$ bo‘lganda $\mathrm{z}\to j\omega L_2$, yuqorida keltirilgan to‘liqsiz tenglama esa ω^2 ga intiladi. Shuning uchun

$$\underline{Z}=\frac{j\omega L_2}{-\omega^2}\frac{\left(\omega_1^2-\omega^2\right)\left(\omega_3^2-\omega^2\right)}{\left(\omega_2^2-\omega^2\right)}. \qquad (6.41)$$

6.10,*b*-rasmda keltirilgan turdagi tavsiflarni qisqacha $(\infty-\infty)$ belgilanadi, chunki $\omega=0$ va $\omega\to\infty$ bo‘lganda ikki qutblikning qarshiliklari cheksiz kattadir. Shunga o‘xshash tahlil qilib, yana uch turdagi tavsiflar mavjudligni ko‘rish mumkin: $(0-\infty)$, $(\infty-0)$ va $(0-0)$.

Hulosa qilib aytish mumkinki, ikki qutblikning rezonans chastotalari soni elementlar sonidan bittaga kam bo‘ladi. Masalan, 6.12,*a*-rasmdagi ikki qutblik chastotaviy tavsifi sifat jihatidan (rezonans chastotalarining turi va soni bo‘yicha) 6.10,*b*-rasmdagi bilan o‘xshash. Agar 6.12,*a*-rasmdagi induktivlikka $L_{qo‘sh}$ qo‘shimcha induktivlikni kiritib 6.12,*b*-rasmdagi sxemani hosil qilsak, u holda zanjir tavsifi sifat jihatidan o‘zgarmaydi. Buni 6.9,*v*-rasmdagi tavsifga 6.9,*a*-rasmdagi x' tavsifni qo‘shib tekshirishimiz oson. Tavsif o‘zgarmasligining sababi shundaki, $L_{qo‘sh}$ ulangan 2 tugunda (6.12,*b*-rasm) bir xil turdagi elementlari bo‘lgan (induktivlik) shoxobchalar ulangan. Umumiy holda, biror tugunga ulanuvchi shoxobchalarda bo‘lgan bir hil turdagi elementga

qo‘shimcha shoxobcha bilan shu turdagi element kiritilganda, rezonans chastotalar soni ko‘paymaydi.



6.12-rasm. **Ikki qutblikda rezonans**

Agar qo‘shimcha qilib ulanayotgan $L_{qo‘sh}$ induktivlik o‘rniga qo‘shimcha sig‘im $C_{qo‘sh}$ ulansa, u xolda 6.12,*b*-rasmdagi ikki qutblik uchun rezonans chastotalar soni ikkitadan uchtagacha ortadi; biroq 6.12,*a*-rasmdagi ikki qutublikka L_2 ning o‘rniga $C_{qo‘sh}$ ulanganda, rezonans chastotalar soni ortmaydi.

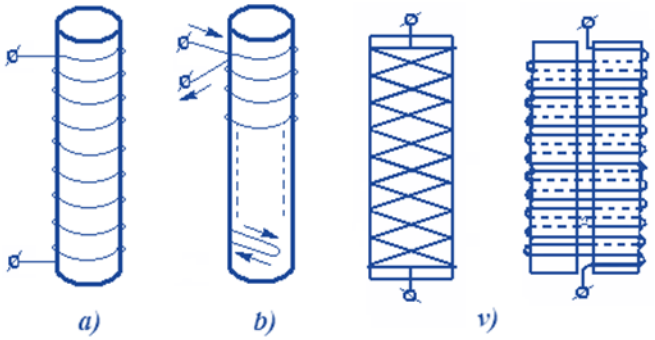
6.5. Zanjir elementlarining chastotaviy tavsiflari

Yuqorida bajarilgan barcha hisoblashlarimizda zanjirning shoxobchalaridagi qarshilik, induktivlik va sig‘imlarning har birini alohida ajratib ko‘rsatish mumkin deb faraz qilingan edi. Biroq, real sharoitda zanjir elementlarida faqat qarshilik, faqat induktivlik va faqat sig‘imlar mavjudligiga taxminan erishish mumkin.

Qarshilik. Oddiy o‘tkazgichli simi bo‘lgan rezistorlarda (6.13,*a*-rasm) yoki reostatlarda, nisbatan kichik chastotalarda ham sezilarli induktivlik hosil bo‘ladi; bunga sabab - sim o‘ramlaridagi magnit maydonidir. Magnit maydonini kamaytirish uchun bifilyar o‘ramlardan foydalaniladi (6.13,*b*-rasm); bu holda konturdagi magnit oqim juda kichik bo‘ladi, chunki qo‘shni o‘tkazgichdagi tok teskari yo‘nalgan va bu oqimni kompensasiyalaydi. Biroq, bunday sim o‘rashda ular orasidagi sig‘im sezilarli darajada ortadi; ayniqsa simli rezistorning kirish va chiqish qisqichlari yaqin joylashganda ular orasidagi kuchlanish eng katta qiymat-ga ega, shu sababli yuqori chastotalarda bifilyar qarshiliklarni qo‘llanilmaydi. 6.13,*v*-rasmda induktivlik va sig‘imlari nisbatan kichik bo‘lgan yuqori chastotali simli rezistorlar keltirilgan. O‘tkazgichning umumiy uzunligini kamaytirish uchun yuqori solishtirma qarshilikka ega bo‘lgan maxsus metall

qotishmalari ishlatiladi. Bunda imkoniyat boricha qarshiliklari temperaturaga bog‘liq bo‘lmagan qotishmalar qabul qilinadi.

Yuqori chastotalar texnikasida (radiotexnika, elektronika) maxsus tarkibga ega bo‘lgan (uglerod massalari, yarim o‘tkazuvchili keramika va h.k.) simsiz rezistorlar qo‘llaniladi; katta qarshilik, kichik o‘lchamlari hamda nisbatan katta magnit oqimlarining yo‘qligi sababli ularda induktivlik deyarli bo‘lmaydi, deb hisoblash mumkin.



6.13-rasm. **Yuqori chastotali simli rezistorlar**

Ammo, elektromagnit maydon hosil qilayotgan induktivlik va sig‘imdan tashqari, o‘tkazgichlardagi qarshilik ham chastotaga bog‘liq. Masalan, o‘zgarmas tok oqayotgandagi qarshilikdan (u ko‘pincha «*Omik*» qarshilik deyiladi), o‘zgaruvchan tok oqqandagi o‘lchangan aktiv qarshilik anchagina farq qiladi. Bunga «*yuza effekti*» katta ta’sir qiladi; o‘zgarmas tok zichligi o‘tkazgichning kesim yuzasida nisbatan tekis taqsimlanadi; o‘zgaruvchan tok esa o‘tkazgich kesim yuzasining chekka qismlarida taqsimlanadi. Uning ichki qatlamlari o‘tkazgich yuzasidagi o‘tkazish qatlamlari bilan «ekranlanadi», tez o‘zgarayotgan magnit oqim o‘tkazgichning ichki qismlariga «singish»ga ulgurmaydi. Natijada, o‘tkazgich yuzasidagi magnit maydon kuchlanganligi o‘tkazgich ichidagi magnit maydon kuchlanganligidan kattaroq bo‘ladi, demak tokning zichligi ham o‘tkazgich yuzasida katta bo‘ladi.

Chastota qanchalar katta bo‘lsa, maydon singishining chuqurligi shunchalar kichik bo‘ladi. Masalan, mis o‘tkazgichlarda chastota f=50Hz bo‘lganda o‘tkazgich yuzasiga nisbatan 10mm chuqurlikdagi elektr maydoni va tok zichligi, o‘tkazgich yuzasidagiga nisbatan 3 marta kamroq bo‘ladi;

f=0,5*MHz* bo‘lganda 0,1*mm* chuqurlikda 3 marta kam; *f*=50*MHz.* bo‘lganda 0,01*mm* chuqurlikda 3 marta kam bo‘ladi. Keltirilgan singish chuqurligi (shartli singish chuqurligi) chastotadan kvadrat ildiz chiqarilganiga proporsional. Shuning uchun, yuqori chastotali qurilmalarda o‘tkazgichning yuza qatlami asosiy ahamiyatga ega.

Real qarshilikni ikki–uch elementdan tashkil topgan ekvivalent sxema bilan har doim ham almashtirib bo‘lavermaydi, biroq uning kirish qarshiligining (yoki o‘tkazuvchanligining) chastotaviy tavsifi ko‘rilayotgan elementni uzil-kesil ifodalovchi tavsif hisoblanadi. Agar chastota o‘zgarganda aktiv qarshilik ham o‘zgarsa, ekvivalent sxema albatta chastotaga bog‘liq bo‘lgan reaktiv qarshilika ega bo‘lishi zarur.

Sig‘im. Oddiy kondensatorlar o‘zining tuzilishiga ko‘ra nisbatan katta yuzali (*S)* va orasidagi masofasi (*d*) juda kichik ikki elektroddan iborat bo‘lgan maxsus tayyorlangan qurilmadir (ya’ni $d^2 << S$). Havo kondensatori (elektrodlari orasiga dielektrik havo to‘ldirilgan) faqat katta chastotalarda ideal kondensatorlardan o‘zida induktivlik mavjudligi bilan farqlanadi.

Havo kondensatorlarining sig‘imi juda kichik (bir necha o‘n pikofarada). Katta sig‘imli kondensatorlar (bir necha mikrofarada), aksariyat, yupqa izolyasiya bilan ajratilgan metall folgadan yasaladi. Shu bilan birga, metall elektrod va elektrolit orasidagi juda yupqa elektrolitik pardadan iborat izolyasiya oralig‘i bo‘lgan elektrolitik kondensatorlar ham keng qo‘llaniladi. Ularning sig‘imlari juda ham katta bo‘ladi (o‘nlab va yuzlab mikrofarada). O‘zgaruvchan tok zanjirlarida ishlaganda izolyasiya qatlami shikastlanmasligi uchun ularga qo‘shimcha ravishda o‘zgarmas kuchlanish ulanadi.

Yuqori chastotalar texnikasida keramik kondensatorlar qo‘llaniladi (bir necha pikofarada). Ularning elektrodlari orasiga yuqori chastotalarga mo‘ljal-langan dielektrik joylashtirilgan. Radiotexnik kondensatorlar juda kichik o‘lcham-larda tayyorlanadi, ularning hajmlari bir necha kub millimetrdan oshmaydi; bosma sxemalarda tok o‘tkazgichi sifatida xizmat qiluvchi metal tasmalar bir necha santimetrgacha uzunlikda oralariga yupqa izolasiya pardasi

bilan bir-birlariga ustma-ust joylashtirilganda sig‘im hosil bo‘ladi. Yuqori kuchlanish texnikasida ishlatiluvchi kondensatorlarning geometrik o‘lchamlari birnecha metrgacha boradi.

Ba’zi hollarda kondensatorlar kirish o‘tkazuvchanligi tarkibidagi aktiv tashkil etuvchisining mavjudligi sezilarli oqibatlarga olib kelmaydi, masalan kondensator energetika tizimlaridagi faza siljishini kompensasiya qilish uchun qo‘llanilayotgan bo‘lsa, deyarli ta’siri sezilmaydi. Aksincha, rezonans konturlarida ishlatiluvchi kondensatorlar juda kichik quvvat isroflariga ega bo‘lishi zarur, shuning uchun aktiv o‘tkazuvchanlik reaktiv tashkil etuvchisining yuzdan bir ulushicha mavjud bo‘lsa ham, kontur aslligiga ta’sir etib rezonans sifatini pasaytiradi.

Real kondensatorlarda kuchlanish va tok orasidagi faza burchagi 6.14,*a*-rasmda ko‘rsatilganidek, $\frac{\pi}{2}$ dan δ burchakka farq qiladi. Ushbu sxemalarda elektrodlari ideal bo‘lmagan dielektriklar bilan ajratilgan kondensator ham keltirilgan; dielektrikda energiyaning qaytmas isrofli jarayoni sodir bo‘ladi; bunda kondensator aktiv quvvat iste’mol qiladi.

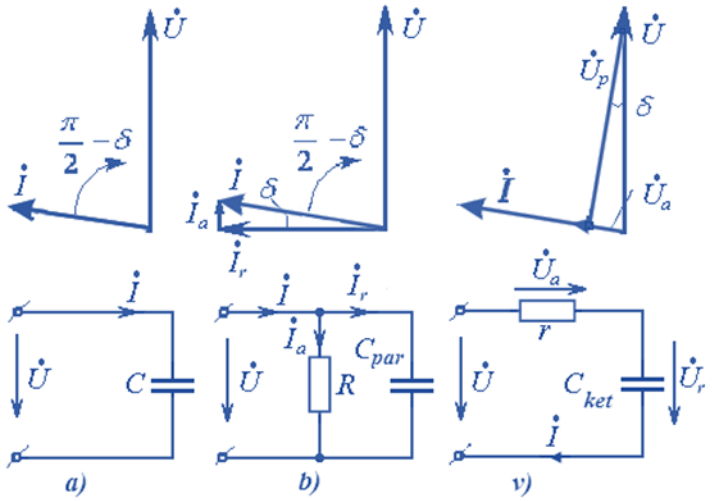
Kuchlanish $\dot{U}$ ga nisbatan $\pi/2$ dan δ ga kamroq bo‘lgan burchakka surilgan $\dot{I}$ tokni ikki tashkil etuvchiga ajratish mumkin (6.14,*b*-rasm): aktiv tok $\dot{I}_a$ (u kuchlanish bilan fazasi mos keladi) va reaktiv tok $\dot{I}_p$ (u kuchlanishga nisban ortoganaldir). Ekvivalent elektr sxemasida tokning bu ikki tashkil etuvchisini ikki parallel shoxobchalardagi toklar deb faraz qilish mumkin; bu shoxobchalardan biri – ideal kondensator C_{par}, ikkiinchisi sof aktiv qarshilik $R=1/g$. Tashkil etuvchilarga ajratishni o‘zgacha bajarish ham mumkin (6.14,*v*-rasm): to‘la kuchlanish $\dot{U}$ ikki tashkil etuvchilar - aktiv kuchlanish $\dot{U}_a$ (u tok bilan bir hil fazada), hamda reaktiv kuchlanish $\dot{U}_P$ (u tok $\dot{I}$ ga ortoganal). Ekvivalent elektr sxemasida bu tashkil etuvchilarni ikki ketma–ket ulangan

elementlardagi kuchlanishlar deb qabul qilish mumkin; biri sof aktiv qarshilik R dagi, ikkinchisi - ideal kondensator S_{ket} dagi kuchlanishlardir.

Ikkala holatdagi tok $\dot{I}$ va kuchlanish $\dot{U}$ lar bir hil bo‘lib, ular orasidagi faza burchagi ($\frac{\pi}{2}$- δ)ga teng, asillik esa g_C bo‘ladi. Ajralib chiqayotgan quvvat esa

$$P = UI_a = U_a I = U \cdot I \cdot \sin\delta \qquad (6.42)$$

ga teng bo‘ladi.



6.14-rasm. **Real kondensatorlarda kuchlanish va tok orasidagi faza burchagi**

Parallel almashtirish sxemasida (6.14,*b*–rasm)

$$tg\delta = 1/g_C = I_a / I_P = g/\omega C_{nap} = 1/\omega C_{nap} R \qquad (6.43)$$

Ketma-ket va parallel ekvivalent sxemalar parametrlari o‘zaro bog‘lanishini asillik va $tg\delta = 1/g_C$ orqali ifodalash qulaylik tug‘diradi

$$C_{ket} = C_{par}(1 + tg^2\delta);$$

$$r = R/(1 + g_C{}^2). \qquad (6.44)$$

Aksariyat, kondensatorlarda $tg\delta < 0{,}1$ ya’ni $g_C > 10$; bunda 1% dan kichik hatolikda quyidagini qabul qilish mumkin

$$C_{ket} = C_{par} \quad \text{va} \quad r = Rtg^2\delta. \qquad (6.45)$$

Real kondensatorlardagi asllik qiymati ko‘pincha minglar va o‘n

minglarni tashkil etadi.

Berilgan parametrlarda va chastotalarda parallel va ketma-ket almashtirish sxemalari ekvivalentdir. Biroq, bu ikki sxemalarning *chastotaviy tavsiflari tubdan farq qiladi*. Parallel sxemada R va C_{par} o‘zgarmas bo‘lganda chastotaning ortishi bilan $tg\delta$ kamayadi (asllik ortadi); ketma-ket sxemada r va C_{ket} o‘zgarmas bo‘lganda chastotaning ortishi $tg\delta$ ning ortishiga olib keladi (asllik kamayadi).

Parallel sxemaga mos keluvchi real kondensatorni tasavvur qilish oson, bu o‘zgarmas sig‘imli $C=C_{par}$ kondensator bo‘lib, undagi tokning aktiv tashkil etuvchisi faqat izolyasiyaning mukammal bo‘lmaganligidan vujudga keladi. Shunga o‘xshash, real kondesatorni ham ketma-ket ulangan sxemaga mos keladi deb faraz qilish mumkin, bu o‘zgarmas sig‘imli $C=C_{ket}$, ideal izolyasiyali va qarshiligi r bo‘lgan o‘tkazgichlar bilan ketma-ket ulangan deb qabul qilinadi. Real dielektrikli kondensatordagi quvvat isroflari asosan o‘zgaruvchan elektr maydonida joylashgan dielektrikning qutblanish jarayonidagi isrofidir; ular dielektrik quvvat isroflari deb ataladi; o‘zining fizik mohiyatiga ko‘ra Joul-Lens isroflari (i^2r)dan farqlanadi. Elektr zanjirlari nazariyasi doirasida ushbu dielektrik isroflar hosil bo‘lish jarayonini quyidagicha tushuntirish mumkin. Kondensator elektrodlaridagi zaryad berilgan kuchlanishga proporsional. Agar elektrodlar orasidagi fazo polyarizasiyalangan dielektrik bilan ($\varepsilon>1$) to‘ldirilgan bo‘lsa, ushbu zaryad miqdori dielektrik bo‘lmagan holatga nisbatan ε marta katta bo‘ladi. Biroq, dielektrikning polyarizasiyasi kuchlanish berilishi bilan to‘satdan bir onda paydo bo‘lmaydi. Polyarizasiya vaqt bo‘yicha kuchlanishdan kechikadi. Shuning uchun elektrodlarda garmonik kuchlanish U ulanganda, elektrodlardagi zaryad Q ham garmonik qonuniyat bilan o‘zgaradi (biroq fazasi bo‘yicha kuchlanishdan kechikadi). Ushbu kechikish δ burchak bilan xarakterlanadi

$$\dot{Q} = UCe^{-j\delta}, \qquad (6.46)$$

shuning uchun biz ko‘rayotgan holatda tok

$$\dot{I} = j\omega Q = Uj\omega Ce^{-j\delta} \tag{6.47}$$

kuchlanishdan aynan ($\frac{\pi}{2} - \delta$) burchakka ilgarilab ketadi.

Keyingi bog‘lanishlarga asoslanib, kompleks sig‘im tushunchasini kiritish mumkin (uni tepasidagi chiqiq bilan belgilaymiz)

$$\bar{C} = Ce^{-j\delta} = C' - jC''. \tag{6.48}$$

Ideal kondensatorlar o‘tkazuvchanliklari va qarshiliklari uchun keltirib chiqarilgan bog‘lanishlarni real isrofli kondensatorlarga tatbiq etib quyidagilarni aniqlaymiz

$$\underline{Y} = g - jb = j\omega\bar{C} = \omega C'' + j\omega C'. \tag{7.49}$$

Keyingi tenglikda o‘tkazuvchanlikning aktiv tashkil etuvchisi ko‘zga yaqqol tashlanadi. Ko‘p hollarda kompleks sig‘imning chastotaga bog‘liqligini quyidagicha qabul qilish mumkin

$$\bar{C} = C_0 \frac{1}{1 + j\omega\tau} = C_0 \frac{1 - j\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} = C' - jC''. \tag{6.50}$$

Keltirilgan bog‘lanishdagi o‘zgarmas qiymat τ dielektrik relaksasiyasi vaqti deyiladi va bir necha millisekund, ba’zan bir necha mikrosekund qiymatni ham tashkil etishi mumkin; C_0 - chastota $\omega = 0$ bo‘lgandagi kondensatorning sig‘imi.

Biz zaryadning qiymati kuchlanishga proporsional deb farz qilish mumkin bo‘lgandagi chiziqli dielektrikli kondensatorni ko‘rish bilan cheklandik. Dielektrikning nochiziqli effektlari bilan bog‘liqliklarini nochiziqli zanjirlar nazariyasida ko‘ramiz.

Induktivlik. Elektr zanjiriga induktivlik kiritish zarur bo‘lganda uni g‘altak sifatida kiritiladi. G‘altakning induktivligini oshirish uchun uning ichiga ferromagnit o‘zak o‘rnatiladi.

Yuqori chastotalarda g‘altakning o‘ramlari orasidagi sig‘imning ta’siri kuchayadi. Shuning uchun, radio chastotalarda ishlovchi g‘altaklarda o‘ramlar shunday bajarishga harakat qilinadiki, bunda ikki chekkadagi boshlang‘ich va

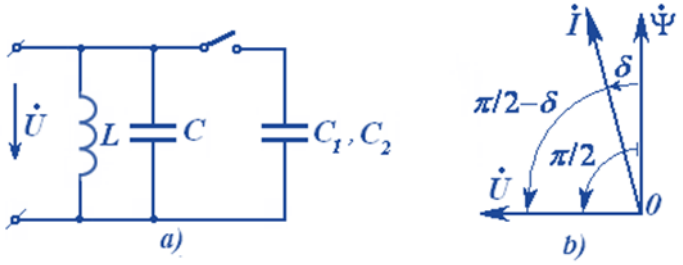
oxirgi o‘ramlar bir-biridan imkon qadar uzoqroqda joylashtiriladi. Katta o‘ramlar soniga ega bo‘lgan g‘altaklar yuqori chastotalar (megogerslar)da mutlaqo ishlatilmaydi.

O‘ramlararo sig‘imlar ta’sirini, birinchi tahminda, shu induktivlik L ning biror kondensator S bilan parallel ulangani deb qabul qilinadi (6.15,*a*-rasm). L bilan C ning qiymatlari quyidagi ikki tajriba yordamida aniqlanishi mumkin. G‘altak bilan parallel qilib o‘zgaruvchan (boshqariluvchi) kondensatorni darajalab (graduirovka qilinib) ulanadi, hamda ikki teng bo‘lmagan ω_1 va ω_2 chastotalarda tok rezonansi sodir bo‘lishiga mos keladigan C_1 va C_2 sig‘imlar aniqlanadi. Bunda $1/\omega_1^2 = L(C_1 + C)$; $1/\omega_2^2 = L(C_2 + C)$ bo‘ladi; undan L va C ni aniqlanadi.

Induktivlik qiymati milligenrining o‘ndan bir ulushicha bo‘lgan g‘altaklarda sig‘im S ning qiymati juda kichik (taxminan birnecha pikofarada) bo‘ladi; uning qiymati chastotaning faqatgina yuzlab kilogersdan ortiqroq miqdorlarida sezilarli bo‘ladi.

G‘altakning parallel ulangan sig‘imli ekvivalent sxemasi chastotaning chek-langan diapazonlarida qo‘llanilishi mumkin. Umumiy holda, g‘altakning sifatlari haqida so‘zlash uchun, uning chastotaviy tavsifi haqida xamma ma’lumotlarni bilish zarur.

Ferromagnit o‘zak induktiv g‘altaklarning xususiyatlarini tubdan o‘zgartirishi mumkin. Avvalo, ferromagnit o‘zakning mavjudligi induktivlikning qiymatini juda ham ko‘p (minglab, ba’zan esa yuz minglab) marta oshirishi mumkinligini ta’kidlash zarur. Bundan tashqari, ushbu g‘altaklar induktivliklari nochiziqli xususiyatni qabul qiladilar.



6.15-rasm. **O‘ramlararo sig‘imlar ta’siri**

Ushbu qismda (chiziqli zanjirlarni ko‘rish jarayonida) ferromagnit o‘zaklarni chiziqli rejimda, ya’ni tok bilan magnit oqimi orasida chiziqli bog‘lanish mavjud, deb qabul qilamiz (ushbu taxmin tok va magnit oqimining kichik qiymatlari uchun hatoligi katta emas). Real sharoitlardan uzoqlashmaslik uchun, tok I ning garmonik qonuniyatda o‘zgarishida, magnit oqimi va uning chulg‘am bilan ilashuvi Ψ ham garmonik qonuniyatga amal qilib o‘zgaradi, ammo tokka nisbatan biroz orqada qoladi, deb hisoblaymiz (6.15,*b*-rasm)

$$\dot{\psi} = \dot{I} \cdot L \cdot e^{-j\delta}. \qquad (6.51)$$

Natijada g‘altakdagi kuchlanish

$$\dot{U} = j\omega\dot{\psi} = j\omega L e^{-j\delta}\, \dot{I} \qquad (6.52)$$

tokdan $[(\pi/2)-\delta]$ burchakka ilgarilab ketadi.

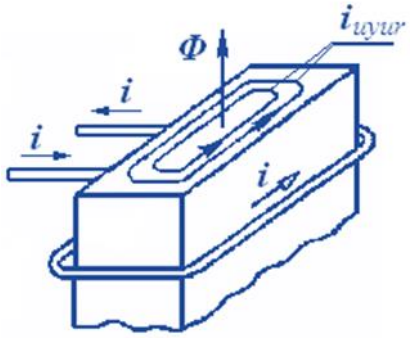
Elektr zanjirlar nazariyasiga asosan δ burchakning induktivlikda qatnashishi kondensatordagi δ burchagi mavjudligiga o‘xshash natija beradi.

Magnit ilashuvi Ψ magnitlovchi tok I dan kechikishining fizik asoslari, dielektrikdagi jarayonlar bilan ham umumiyligi bor: ferromagnit o‘zakning qutblanish (uning magnitlanish) jarayoni tok paydo bo‘lishi bilan bir onda sodir bo‘lmaydi.

Metall ferromagnit o‘zaklarda tok o‘zgarishi bilan magnit oqimi o‘zgarishi-ning kechikishiga boshqa sabablar ham bor: *Lens qonuniga binoan, magnit oqimining har qanday o‘zgarishi, ushbu magnit oqimi o‘zgarishiga aks ta’sir etuvchi tokni hosil qiladigan e.yu.k.ni induk6ivlaydi.*

Faraz qilaylik, g‘altak chulg‘ami metall o‘zakka o‘ralgan bo‘lsin, uning bir o‘rami 6.16-rasmda ko‘rsatilgan. G‘altakdagi *i* tok rasmning ko‘rsatilgan yo‘nalishida o‘zakda *F* magnit oqimi hosil qiladi va uning yo‘nalishi strelka bilan ko‘rsatilgan. Agar chulg‘amdagi tok kamaysa, metall o‘zakda magnit oqimining kamayishiga to‘sqinlik qiluvchi, shu oqimni ilgarigi yo‘nalishda saqlab qolishga intiluvchi tok hosil bo‘ladi. Metall o‘zakda hosil bo‘luvchi bu tok - uyurma toki i_{uyur} deyiladi; bu tok, albatta, elektr zanjirlaridagi faqat o‘z

shoxobchalaridan oqadigan *i* toklardan farq qiladi (bu tok va e.yu.k.lar amalda mavjud bo‘lib, ammo ularga elektr zanjirlar nazariyasining birorta usulini tadbiq etib bo‘lmasligiga ajoyib bir misol bo‘ladi). Uyurma toklarning ta’sirini batafsil tahlil qilish, o‘zgaruvchan toklarga mo‘ljallangan ferromagnit o‘zaklar yaxlit temir sifatida yasalmasdan, balki alohida yupqa, o‘zaro izolyasiyalangan tunukachalardan yasalishi tushunishga yaqqol misol bo‘la oladi. Yupqa tunukachalarda uyurma toklarning oqib o‘tishi qiyinlashadi, chunki toklar konturlari katta bo‘lgani bilan, tok uchun kesim yuza keskin kamayadi. Chastota qanchalar katta bo‘lsa tunuka-chalar shunchalar yupqa qilib bajariladi ($f = 50Hz$ da 0,5-0,35mm dan $f > 100kHz$ da birnecha mikrongacha). Radiochastotalarda yupqa ferromagnit kukunni izolyat-siya massasi bilan presslash yo‘li bilan olingan o‘zaklar ham qo‘laniladi.

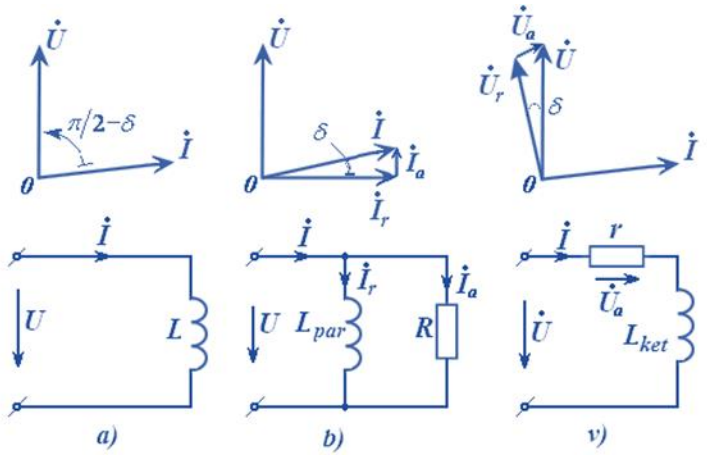


6.16-rasm. **G‘altak chulg‘ami metall o‘zakka o‘ralgan**

Uyurma toklar ta’sirini kamaytirishning yana bir yo‘li - ferromagnetiklarning solishtirma elektr qarshiligini oshirishdir. Transformatorlarda va o‘zgaruvchan tokli mashinalarda qo‘llanuvchi elektrotexnik po‘lat tunikachalari po‘latning boshqa turlariga nisbatan kattaroq solishtirma qarshilikka ega. Solishtirma qarshiliklari yarim o‘tkazgichlar va izolyatorlar solishtirma qarshiliklariga yaqin bo‘lgan nometall ferromagnetiklar - ferritlar ham qo‘llaniladi. Bunday materiallarda uyurma toklar deyarli bo‘lmaydi; biroq feritlarda ham magnit-lanishning kechikishini ko‘rish mumkin. Uning magnit singdiruvchanligi qanchalar katta bo‘lsa, bu kechikish shunchalar ko‘proq bo‘ladi.

Yuqorida keltirilgan fikrlar bilan chegaralanib, ferromagnit o‘zakli induktiv g‘altakning vektor diagrammasidan (6.17,*a*-rasm) kelib chiqadigan ba’zi xulosa-larga to‘xtalamiz.

Ferromagnit o‘zagi bo‘lgan induktivlik g‘altagi hamda uning kuchlanishi va toki vektor diagrammasi 6.17,*a*-rasmda keltirilgan. 6.17,*b*-rasmda esa toki aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarga ajratilgan vektor diagramma ko‘rsatilgan; shu yerda ikki parallel shoxobchalari bo‘lgan ekvivalent sxema ham keltirilgan: tokning aktiv tashkil etuvchisi oqishi faraz qilinayotgan $R=1/G$ aktiv qarshilik; tokning reaktiv tashkil etuvchisi oqishi taxminlanayotgan L_{par} sof reaktiv shoxobchasi. 6.17,*v*-rasmda kuchlanishi aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarga ajratilgan vektor diagrammasi hamda ketma-ket ulangan r va L_{ket} elementli ekvivalent sxemasi keltirilgan.



6.17-rasm. **Ferromagnit o‘zakli induktiv g‘altakning vektor diagrammasi**

6.17-rasmda qurilgan barcha almashtirish sxemalari va diagrammalar 6.14-rasmda keltirilgan almashtirish sxemalari va diagrammalariga o‘xshashdir. Har bir almashtirish sxemasida U, I, δ, Q_L va sarflanayotgan quvvat bir xildir [(6.42) ga qarang].

Parallel va ketma-ket almashtirish sxemalarining parametrlari uchun keltiril-gan bog‘lanishlar ham [(6.20) va (6.21) ga qarang] o‘zgarishsiz bo‘ladi.

Parallel almashtirish sxemasida (6.17,*a*-rasm)

$$tg\delta = 1/Q_L = I_a / I_p = \omega L_{nap} / R; \qquad (6.53)$$

$$\omega L_{nap} = \sqrt{1+tg^2\delta}\, U / I; \tag{6.54}$$

$$R = \frac{U}{I}\frac{\sqrt{1+tg^2\delta}}{tg\delta}. \tag{6.55}$$

Parallel va ketma-ket ekvivalent sxemalardagi (6.17-rasm) parametlarni taqqoslab quyidagilarni aniqlaymiz

$$L_{ket} = L_{ket}\left(1+tg^2\delta\right), \tag{6.56}$$

$$r = Rtg^2\delta/\left(1+tg^2\delta\right). \tag{6.57}$$

Agar $tg\delta < 0{,}1$, ya'ni $Q_L > 10$ bo'lsa, u xolda 1% dan kichik bo'lgan hatolik uchun quyidagicha yozish mumkin

$$L_{\text{par}} = L_{ket}; \quad r = R \cdot tg^2\delta. \tag{6.58}$$

Real induktivlik g'altaklarida asllik o'nlab va yuzlab birliklarga teng bo'ladi. Agar g'altak o'tkazgichlari ekspluatasiyasi jarayonida qizishidan muhofaza qilib sovutilsa yoki simlarni o'ta o'tkazuvchanlik darajasiga yetkazilsa (bu xozirgi zamon ilm va texnikasi uchun bajarish imkoni bor masaladir), u holda asillikning qiymatini yana ham oshirish mumkin.

O'zakda magnit qutblanishi bo'lgan holat uchun, ilgari kondensator uchun ko'rilgandek (6.50), induktivlikni chastotaga bog'liq bo'lgan kompleks qiymat deb qaralsa, ba'zan tajribaga yaqin natijalarga erishish mumkin

$$L = Le^{-j\delta} = L_0/\left(1+j\omega\tau\right). \tag{6.59}$$

Chastotaga bog'liq bo'lgan L, r, C parametrli zanjirda rezonans. Bunday zanjirlarning parallel va ketma-ket ulangan konturlarida rezonans sodir bo'lishi mumkin. Biroq, kontur asosiy parametrlarining chastotaga bog'liqligi, yuqorida ko'rilgan parametrlari o'zgarmas zanjirlardagi rezonansni ifodalovchi asosiy bog'lanishlarni tubdan o'zgarib yuboradi. Ularga o'xshash, zanjirning barcha yangi xususiyatlari chastotaviy tavsiflar bevosita kiritilgan tenglamalarni tahlil qilish natijasida osongina keltirib chiqariladi.

Avvalo, shuni ma'lum qilish kerakki, tok va kuchlanishning chastotaga bog'liqligi uchun yuqorida keltirib chiqarilgan ba'zi ifodalarni ushbu holat uchun mutlaqo qo'llab bo'lmaydi; masalan, rezonans chastotasi va asillikni

rezonans tavsifining kengligi bo‘yicha aniqlashni qo‘llab bo‘lmaydi. Aksincha, chastotani o‘zgarishsiz qoldirib va sig‘imning berilgan qiymatini o‘zgartirish bilan avval keltirib chiqarilgan ifodalardan foydalanib, o‘lchangan $U_S/U_{S.max}$ qiymatlar yordamida asillikni ham, konturning induktivligini $L(\omega)$ ham aniqlash mumkin. Chastotaning har xil qiymatlari uchun shunday o‘lchovlarni amalga oshirib Q va L yoki r va L qiymatlarning chastotaga bog‘liqligini aniqlash mumkin. Shunga o‘xshash o‘lchovlarni $S(\omega)$li kondensator uchun ham bajarish mumkin.

Yakuniy xulosalar. 1. Real elementlarning chastotaviy tavsiflarini tahlil qilishda, biz ular tarkibida o‘zgarmas L, r, C bo‘lgan ikki qutbliklar mavjud deb tasavvur qildik. Ko‘pgina holatlarda ushbu uslub chastotaning ma’lum diapazonida real ikki qutblikning tavsiflari bilan mos keladi. Biroq, barcha holatlarda ham bunday o‘xshatishlarni faqat $Y(j\omega)$ funksiyasini cheklangan ko‘p hadlik bilan shartli almashtirish deb qarash mumkin. Ba’zan $Y(j\omega)$ tavsiflarni transsendent funksiyalar deb qabul qilinadi. Bunday funksiyani darajali qatorga yoyib, bir necha birinchi hadlari bilan qanoatlanib, cheklangan sonli L, r, C ga ega bo‘lgan elektr zanjirini aniqlash mumkin; bunda, albatta, zanjir chastotaviy tavsiflari cheklangan diapazonda ushbu qator hadlariga mos keladi, deb qaraladi.

2. Umumiy holatda, berilgan chastotaviy tavsiflarga ega bo‘lgan ikki qutblik (yoki to‘rt qutublik)ni hosil qilish uchun L, r, C elementli sxemani tuzish va uning parametrlarini aniqlash, elektr zanjirlarini sintez qilishning asosiy muammolarini tashkil etadi.

3. Kuchlanish U ning qiymati, na faqat tok I ning qiymatiga bog‘liq bo‘ladi, balki har xil hosilalarga, ba’zan esa, o‘zining funksiyasi integraliga, ya’ni $\int udt$ ga ham bog‘liq bo‘lishi mumkin deyilgan edi. Hususan $j\omega$ hosilani, $1/j\omega$ esa integralni ifodalashini esga olsak, (6.59) dan quyidagini aniqlash mumkin bo‘ladi:

$$\dot{U} = \dot{I}\ j\omega L = \dot{I}\ L_0 j\omega/(1 + j\omega\tau) \quad \text{yoki} \quad \dot{U}(\tau + 1/j\omega) = \dot{I} L_0$$

Oxirgi tenglikka oniy qiymatlar uchun yozilgan quyidagi tenglama mos keladi

$$u = \frac{L_0}{\tau} i - \frac{1}{\tau} \int u dt \qquad (6.60)$$

6.6. Zanjirning uzatish funksiyasi

Yuqorida keltirilgan *L, r, C* ketma-ket kontur, *L, r, C* parallel kontur va reaktiv ikki qutbliklar uchun qurilgan (6.2,*a*, 6.3, 6.7,*a*, 6.9,*a* va 6.10,*b*-rasmlar) chastotaviy tavsiflar elektr zanjiri u yoki bu xususiyatlarining chastotaga bog‘liq ekanligini ko‘rsatadi. Shunga o‘xshash tavsiflar, na faqat zanjir tahlili uchun, balki elektr zanjirini sintez qilish masalalarini yechishda ham qo‘llaniladi.

Umumiy holda zanjirning chastotaviy xususiyatlari haqida zanjirning uzatish funksiyasi deb (uzatish koeffisiyenti yoki amplituda-faza tavsifi) nomlangan tavsifi yordamida fikr yuritiladi. *Uzatish funksiyasi* $H(j\omega) = H(\omega)e^{j\Psi(\omega)}$ *deyilganda, zanjir uchun chiquvchi qiymat deb qabul qilingan kattaliklardan* (*masalan zanjir toki, biror qism kuchlanishlari*)*dan birining, berilgan kirish qiymatiga nisbati tushuniladi.*

Uzatish funksiyasi modulining chastotaga bog‘liqligi, ya’ni $H(\omega)$ni *amplituda-chastota tavsifi*; argumentining chastotaga bog‘liqligi $\Psi(\omega)$ni *faza-chastota tavsifi* deyiladi. Masalan, 6.2,*a*-rasmdagi har bir rezonans egri chizig‘ini ketma-ket konturning berilgan *Q* parametri va berilgan kirish qiymati, ya’ni rezonans toki I_{max}ning ma’lum qiymati uchun amplituda-chastota tavsifi $N(\omega)$ deb qarash mumkin.

Ushbu kontur (6.1,*a*-rasm) uchun tokning kompleks shaklda yozilishi quyidagicha bo‘ladi

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{r + j(\omega L - 1/\omega C)} = \frac{\dot{U}}{r} \frac{1}{1 + jQ(\eta - 1/\eta)} \qquad (6.61)$$

va rezonans $(\eta = 1)$ bo‘lgandagi qiymati

$$\dot{I}_{max} = \dot{U}/r,$$

ya’ni, uzatish funksiyasi

$$H(j\omega)=H(\omega)e^{j\Psi(\omega)}=\frac{\dot{I}}{\dot{I}_{max}}=\frac{1}{1+jQ(\eta-1/\eta)}=\frac{1-jQ(\eta-1/\eta)}{1+Q^2(\eta-1/\eta)^2}. \qquad (6.62)$$

Faza-chastota tavsifi 6.18,*a*-rasmda keltirilganidek, $H(j\omega)$ning mavhum tashkil etuvchisini haqiqiy tashkil etuvchisiga nisbati kabi olib

$$tg\Psi(\omega)=-Q(\eta-1/\eta), \qquad (6.63)$$

qurish mumkin.

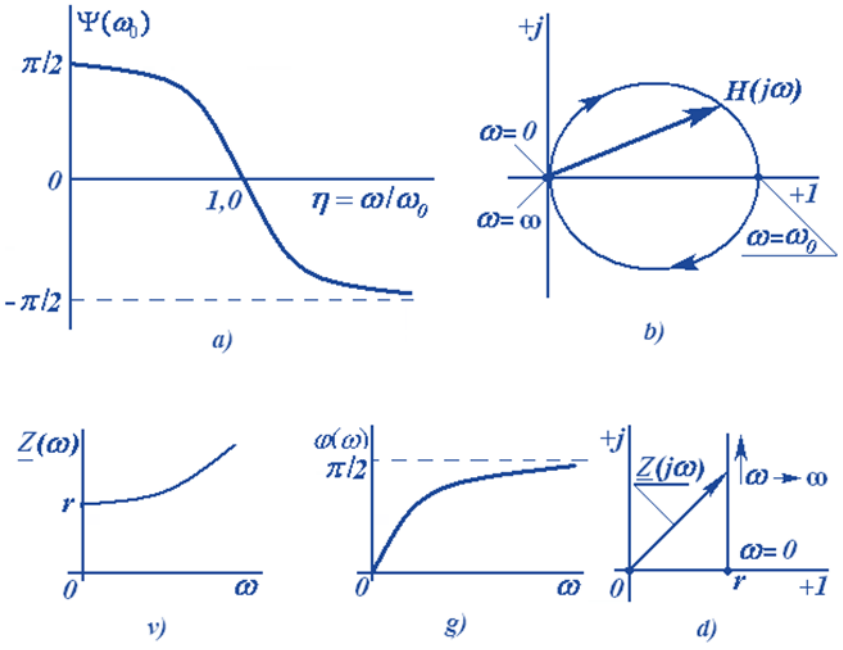
Chastotaviy tavsiflarni aksariyat, $H(j\omega)$ vektori uchining kompleks maydonidagi geometrik o‘rni - godograf deb qabul qilinadi, bunda $j\omega$ qiymatni bog‘liq bo‘lmagan o‘zgaruvchi deb hisoblanadi. Ketma-ket konturning godografi (uning amplituda-faza tavsifi) 6.18,*b*-rasmda keltirilgan.

Zanjirning kirish qarshiligi yoki kirish o‘tkazuvchanligi, uzatish funksiya-larining hususiy hollaridan biri sifatida ko‘rilishi mumkin. Masalan, 6.17,*v*-rasmdagi almashtirish sxemasi uchun g‘altakning kirish qarshiligi

$$\underline{Z}(j\omega)=\dot{U}/\dot{I}=r+j\omega L_{ket}$$

ga teng.

Amplituda-chastota tavsifi $z(\omega)=\sqrt{r^2+(\omega L_{ket})^2}$, faza-chastota tavsifi $\varphi(\omega)=arctg(\omega L_{ket}/r)$ va godografi 6.18,*v*-*d*-rasmlarda keltirilgan.



6.18-rasm. **Faza-chastota tavsif**

Agar uzatish funksiyasi o‘lchovsiz (masalan, $H(j\omega)=\dot{I}/\dot{I}_{max}$) bo‘lsa, u holda logarifmik amplituda-chastota tavsifini (LAT) quyidagicha aniqlash mumkin

$$\ln H(j\omega)=\ln\left[H(\omega)e^{j\Psi(\omega)}\right]=\ln H(\omega)+j\Psi(\omega) \qquad (6.64)$$

Neper va desibel. Ikki qiymatlar nisbati $x=u/u_0$ ni ular logorifmi $\ln x$ yordamida o‘lchash qulaydir; bu uzatish funksiyasi moduli $H(\omega)$ga va boshqa o‘lchovsiz qiymatlarga taalluqlidir. Natural logarifm N ga teng (masalan, $\ln xH=N$) bo‘lsa, ko‘rilayotgan qiymat (yoki nisbat) N neperga teng deb hisoblanadi. Agar H ning qiymati ye=2,72 ga teng bo‘lsa, uning qiymati 1 neper (*Hp*)ga teng deb qabul qilinadi. Ba’zan $\ln xH$ o‘rniga boshqa logarifm o‘lchovini, $20lgH$ ni kiritiladi. Bu qiymatning birligi desibel (*dB*). Agar $lgH=1/20$ bo‘lsa N ning qiymati 1*dB*ga teng bo‘ladi. 1*dB*=0,115*Np*; 1*Nn*=8,7*dB*.

Chastotalar shkalasi. Uni, aksariyat, logarifmik masshtabda quriladi. Chastota ikki marta ortishiga to‘g‘ri keluvchi chastota intervali – oktava deyiladi, o‘n marta ortishga esa dekada deyiladi. Chastotaning ω_1 dan ω_2 gacha o‘zgarish intervali uchun oktavalar soni

$$\eta_0=\log_2(\omega_2/\omega_1)=3{,}32\lg(\omega_2/\omega_1) \qquad (6.65)$$

va dekadalar soni

$$\eta_{Ä}=\lg(\omega_2/\omega_1) \qquad (6.66)$$

ya’ni 1 dekada = 3,32 oktava.

Nazorat savollari

1. Elektr zanjirlarida rezonans hodisalarini tushuntirib bering
2. Kuchlanishlar rezonansini tushuntirib bering.
3. Toklar rezonansini tushuntirib bering.
4. Reaktiv ikki qutbliklarning chastotaviy tavsiflarini sharhlab bering.
5. Rezonansda reaktiv qarshiliklar chastotaviy tavsiflarini tushuntirib bering.
6. Zanjir elementlarining chastotaviy tavsiflarini sharhlab bering
7. Neper va Desibel qiymatlarini tushuntirib bering.

7-BOB. ELEKTR ZANJIRLARIDA O‘ZARO INDUKTIVLIK

7.1. O‘zaro induktiv bog‘langan elementli zanjirlar

Yuqorida tarkibida faqat *L, r* va *C* elementlari bo‘lgan zanjirlarning nazariy va amaliy masalalarini ko‘rilgan edi, bu esa ta’riflashni va o‘zlashtirishni ancha soddalashtirgan edi. Ushbu bobda boshqa elementlar bilan birga shoxobchalari va konturlari orasida o‘zaro induktiv bog‘lanishda bo‘lgan zanjirlar masalalari ko‘riladi. O‘zgaruvchan tok zanjirlari konturlari orasida induktiv bog‘lanishlarning mavjudligi alohida hususiyatli qurilmalar paydo bo‘lishiga sabab bo‘ldi. Bunday qurilmalar qatoriga, birinchi navbatda, transformatorlar kiradi. Elektr zanjiri elementlaridan biri bo‘lgan transformatorlar nazariyasiga § 7.3 bag‘ishlangan.

Yuqorida keltirilgan elektr zanjirlari nazariyasiga taalluqli bo‘lgan ko‘rsatmalarni o‘zaro induktiv bog‘langan zanjirlarga tadbiq etish masalasi biroz qo‘shimchalar kiritishni talab qiladi.

Biror elektr zanjirining ikki konturi [1 raqamli birinchi kontur (7.1,*a*-rasm) va 2 raqamli ikkinchi kontur] yetarli darajada yaqin joylashganda, bir konturning magnit maydoni ikkinchi konturga ta’sir etadi.

Natijada, faqat birinchi konturdan oqayotgan tokka ($i_1 \neq 0$; $i_2 = 0$) proporsional bo‘lgan magnit oqimiga ikkinchi kontur ham ilashadi

$$\psi_{21} = M_{21} \cdot i_1 \qquad (7.1)$$

Bunda, birinchi kontur bilan ilashgan magnit oqim Ψ_{11} qiymati shu kontur toki va chulg‘am induktivligi L_1 ning ko‘paytmasiga teng

$$\psi_{11} = L_1 \cdot i_1 . \qquad (7.2)$$

Shunga o‘xshash, faqat ikkinchi konturda i_2 tok mavjud bo‘lsa, birinchi kontur bilan ilashgan oqim

$$\psi_{12} = M_{12} \cdot i_2 \qquad (7.3)$$

ga teng bo‘ladi.

Ikkinchi konturning oqim ilashuvi

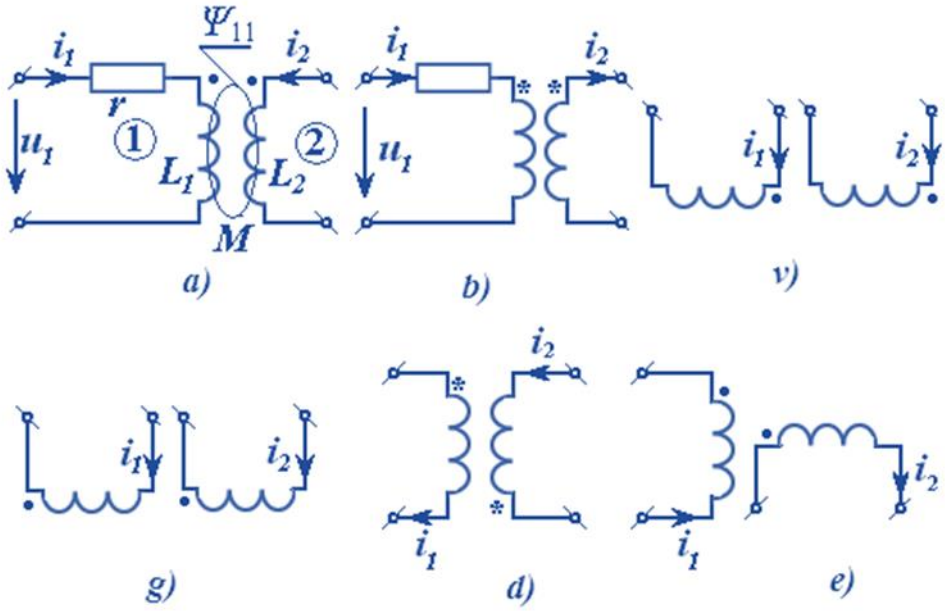
$$\psi_{22} = L_2 \cdot i_2 . \qquad (7.4)$$

Ushbu mavzu ikki konturning «yetarli darajada yaqin joylashganligi» haqida eslatish bilan boshlagan edi; buni qanday tushunmoq kerak?

Ikki konturning bir biridan uzoqlashishi natijasida ularning magnit bog‘langanligi kamayib, zanjirning tahlilida $M_{21} \cdot i_1$ va $M_{12} \cdot i_2$ tashkil etuvchilarni e’tiborga olmasa ham bo‘ladi; agar bu tashkil etuvchilarni e’tiborga olmaslik mumkin bo‘lmasa, demak konturlar yetarlik darajada yaqin joylashgan bo‘ladi.

Agar faqat birinchi konturda tok o‘zgarayotgan bo‘lsa, ikkinchi konturda induktivlanayotgan e.yu.k. quyidagiga teng bo‘ladi

$$e_2 = -d\psi_{21}/dt = -M_{21}di_1/dt. \qquad (7.5)$$



7.1-rasm. **O‘zaro induktiv bog‘langan zanjirlar**

Shunga o‘xshash, agar tok faqat ikkinchi konturda o‘zgarsa, birinchisida quyidagi e.yu.k. induktivlanadi

$$e_1 = -d\psi_{12}/dt = -M_{12}di_2/dt. \qquad (7.6)$$

Mana shu hodisa *o‘zaro induksiya hodisasi* deb ataladi, bunda proporsional-lik koeffisiyenti

$$M_{12} = M_{21} = M \qquad (7.7)$$

o‘zaro induksiya yoki *o‘zaro induktivlik koeffisiyenti* deyiladi. Ifoda (7.7)dagi

o‘zaro ta’sir, fizika kursidan ma’lum bo‘lib, induktiv bog‘langan konturlarning energiyalari bog‘lanishidan kelib chiqadi. O‘zaro induktivlik *M* xususiy induktivlik *L* ga o‘xshab genri (*G*) da o‘lchanadi.

Agar tok birinchi konturda ham, ikkinchi konturlarda ham (chulg‘amlarda, shoxobchalarda, g‘altaklarda) oqayotgan bo‘lsa, to‘la magnit ilashuvi hususiy induktivlik va o‘zaro induktivlik hosil qilgan magnit ilashuvlarining algebrik yig‘indisiga teng bo‘ladi

$$\left.\begin{aligned}\psi_1 &= \psi_{11} + \psi_{12} = L_1 \cdot i_1 + M_{12} i_2;\\ \psi_2 &= \psi_{22} + \psi_{21} = L_2 \cdot i_2 + M_{21} i_1\end{aligned}\right\} \qquad (7.8)$$

bunda ψ_1 va ψ_2 - birinchi va ikkinchi konturlarning to‘la magnit ilashuvlari.

Ushbu bog‘lanishlar yozilishida quyidagi farazlar qabul qilingan: har bir kontur musbat tokidan hosil bo‘lgan magnit ilashuvlari ikkinchi konturdagi musbat tok ortganda ortadi. Ushbu fikrlar toklar musbat yo‘nalishlarini tanlashda ma’lum talablar qo‘yilishiga sabab bo‘ladi.

Yuqorida bir necha marta ta’kidlanganidek, radiotexnik va elektrotexnik tizimni elektr zanjiri deb tan olish uchun, uning tugunlari orasidagi kuchlanishlar ular orasidagi potensiallar farqiga teng bo‘lishi zarur. Shuning uchun o‘zaro induksiyali zanjirlarda e.yu.k. ning hosil bo‘lishi ushbu shartni mutlaqo buzmaydi deb hisoblashimiz zarur; e.yu.k. zanjirning biror elementida masalan, induktivlik g‘altagida lokallashadi, xolos.

Tarkibida shunday tugunlari bo‘lgan zanjirlar mavjudki, keltirilgan fikirlar ular uchun mutloqo noo‘rindir. Bunday tugunlar bizning e’tiborimizni qaratmaydi.

Induktiv bog‘langan elementlar qutublarini belgilash. O‘zinduksiya magnit ilashuvi $L_1 \cdot i_1$(yoki $L_2 \cdot i_2$)ga o‘zaro induktivlik $M \cdot i_2$ (yoki $M \cdot i_1$) magnit ilashuvining algebraik qo‘shilishi ishorasini aniqlash uchun, induktiv bog‘langan elementlar klemmalarining boshi yoki ketini bilish zarur. Bunda L_1, L_2 va *M* koeffisiyentlari musbat ishorali deb hisoblanadi.

Odatda, o‘zaro induktiv bog‘langan elementlardan birining bir klemmasi ixtiyoriy ravishda «boshi» deb qabul qilinadi va sxemada uning oldiga

yulduzcha yoki harfli belgi, ko‘pincha qalin nuqta qo‘yiladi (7.1-rasmlar). Ikkinchi elementning boshiga belgi shunday joylashtiriladiki, unda i_1 va i_2 toklar ushbu belgilangan klemmalarga nisbatan bir hil yo‘naltirilganda, o‘zaro induksiya natijasida har bir induktiv bog‘langan elementning magnit ilashuvi ortsin (7.1,*a*,*v*,*g*-rasmlar).

Ushbu belgilashlarni hisobga olib, magnit ilashuv quyidagicha aniqlanadi

$$\psi_1 = L_1 \cdot i_1 + M \cdot i_2;\ \psi_2 = L_2 \cdot i_2 + M \cdot i_1. \qquad (7.9)$$

Agar ikki shoxobchalardagi toklar har xil yo‘nalishda belgilangan bo‘lsa (7.1,*b*,*d*,*ye*-rasmlar), har bir elementning magnit ilashuvi quyidagicha aniqlanadi

$$\psi_1 = L_1 \cdot i_1 - M \cdot i_2;\ \psi_2 = L_2 \cdot i_2 - M \cdot i_1. \qquad (7.10)$$

Magnit maydonlarning yo‘nalishlari haqidagi ma’lumot bo‘lmagan holda, belgilashni induktivlangan kuchlanishlarni o‘lchash yo‘li bilan aniqlash mumkin: belgilarga nisbatan toklar yo‘nalishlari bir xil bo‘lganda, o‘zinduksiya kuchlanishi

$$u_{L1} = L di_1/dt \quad \text{yoki} \quad \dot{U}_{L1} = L_1 j\omega \dot{I}_1, \qquad (7.11)$$

o‘zaro induksiya kuchlanishi Mdi_2/dt yoki Mdi_1/dt bilan qo‘shilishi zarur

$$\left.\begin{aligned} u_{(L,M)1} &= L_1 di_1/dt + Mdi_2/dt \\ u_{(L,M)2} &= L_2 di_2/dt + Mdi_1/dt \end{aligned}\right\} \qquad (7.12)$$

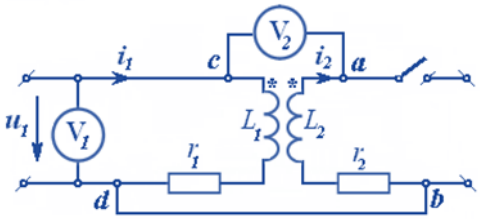
va shunga o‘xshash

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_{(L,M)1} &= L_1 j\omega \dot{I}_1 + Mj\omega \dot{I}_2 \\ \dot{U}_{(L,M)2} &= L_2 j\omega \dot{I}_2 + Mj\omega \dot{I}_1 \end{aligned}\right\} \qquad (7.13)$$

Yuqorida keltirilgan fikrlar (7.9) bog‘lanishdan kelib chiqadi, chunki toklarning muvofiq ravishda yo‘naltirilishida magnit ilashuvlar $L_1 di_1/dt$ va Mdi_2/dt o‘zgarishi natijasida bir xil yo‘nalgan e.yu.k.lar hosil bo‘ladi.

Aksincha, i_1 va i_2 toklarning berilgan klemmalarga nisbatan *yo‘nalishlari har xil bo‘lsa*, u holda kuchlanishlar quyidagicha aniqlanadi

$$\left.\begin{aligned} u_{(L,M)1} &= L_1 di_1/dt - M di_2/dt \\ u_{(L,M)2} &= L_2 di_2/dt + M di_1/dt \end{aligned}\right\} \qquad (7.14)$$



7.2-rasm. **Ikki induktiv bog‘langan shoxobcha**

7.1,*a* va *b*-rasmlardagi induktiv bog‘langan konturlarning birinchi shoxobchasida aktiv qarshilik ham keltirilgan. Shuning uchun 7.1,*a*-rasm kuchlanishlari quyidagicha aniqlanadi

$$u_1 = i_1 r + L_1 di_1/dt + M di_2/dt \qquad (7.15)$$

7.1,*b*-rasmda esa

$$u_1 = i_1 r + L_1 di_1/dt - M di_2/dt. \qquad (7.16)$$

Misol. 7.2-rasmda ikki induktiv bog‘langan shoxobcha keltirilgan. Ularning biridan $\dot{I}_1$ toki oqadi, ikkinchisidagi tok nolga teng ($\dot{I}_2$=0).

Birinchi elementning klemmalari orasidagi kuchlanish V_1 voltmetr bilan o‘lchanadi va uning ko‘rsatkichi 120*V* ga teng. Ikkinchi elementning klemmalaridan biri (*b*) o‘tkazgich yordamida birinchi elementning *d* klemmasi bilan ulangan. Ikkala elementning qolgan klemmalari (*a* va *s*) orasiga voltmetr V_2 ulangan va 175*V* qiymatni ko‘rsatmoqda. Birinchi elementning *s* klemmasiga «boshi» belgisi (yulduzcha) qo‘yilgan.

Ikkinchi elementning qaysi klemmasiga «boshi» belgisi (yulduzcha)ni qo‘yish zarur.

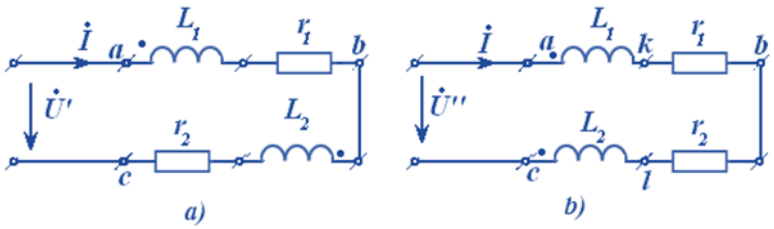
***Eslatma*:** Barcha *r*, *L*, *M* parametrlar musbat ishorali deb hisoblanadi.

***Yechish*.** Belgi (yulduzcha) «*b*» qisqichga qo‘yish kerak, chunki, *sdba* konturga «ko‘z yuritib» chiqqanimizda shuni ko‘ramizki, $\dot{\varphi}_C$ potensial $\dot{\varphi}_a$ potensialidan quyidagi qiymatga yuqoriroqdir

$$(jL_1 + r_1)\dot{I}_1 + j\omega M\dot{I}_1 = [j\omega(L_1 + M) + r_1]\dot{I}_1 = \dot{U}_{ca}$$

Birinchi elementdagi kuchlanishlar pasayuvi $j\omega L\dot{I}_1$ning ishorasi ikkinchi elementdagi $j\omega M\dot{I}_1$ kuchlanishlar pasayuvi ishorasi bilan bir xil, chunki ikkala holatda ham «ko‘z yurituvi» belgidan boshlangan, shuning uchun magnit ilashuvi $L\cdot\dot{I}_1$ va $M\cdot\dot{I}_1$ hamda ularning hosilalari bir hil ishoraga ega bo‘ladilar. Boshqacha fikr yuritish ham mumkin, masalan: $U_2 > U_1$ bo‘lgani uchun $L_1 + M > L_1$ bo‘ladi.

Ikki induktiv bog‘langan zanjirlarni ketma-ket ulash. Bu holda induktiv elementlarni «mos» (7.3,*a*-rasm) yoki «qarama-qarshi» (7.3,*b*-rasm) ulanganlik-larining farqini ko‘rish zarur.



7.3-rasm. **Ikki induktiv bog‘langan zanjirlarni ketma-ket ulashi**

Mos ulanish ko‘rilayotgan tok ikkala induktiv elementda belgilangan klemmalarga nisbatan bir xil yo‘nalgan (7.3,*a*-rasmdagi), ya’ni ikkala elementning belgilangan klemmalariga tok kiradi; «qarama-qarshi» ulanganda ikkala element belgilangan klemmalariga nisbatan tok har xil yo‘naltirilgan.

Shuning uchun, konturga «ko‘z yugurtirilgan»da shu ma’lum bo‘ladiki, mos ulanganda tenglama quyidagicha yoziladi

$$\dot{U}' = [j\omega(M + L_1) + r_1]\dot{I} + [j\omega(M + L_2) + r_2]\dot{I}. \qquad (7.17)$$

Bu tenglikda hadlar ataylab shunday ajratilganki, unda tokning birinchi kvadrat qavsdagi qiymatga ko‘paytmasi birinchi elementdagi kuchlanish $\dot{U}_{ab}$ ga teng; keyingi had - ikkinchi elementdagi kuchlanish $\dot{U}_{bc}$ ga teng bo‘lsin.

Qarama-qarshi ulangan konturlar uchun tenglama boshqacha yoziladi

$$\dot{U}'' = [j\omega(-M + L_1) + r_1]\dot{I} + [j\omega(-M + L_2) + r_2]\dot{I}. \qquad (7.18)$$

Oxirgi tenglamada ham yuqorida qayd qilingan hadlarga ajratish uslubi qo‘llanilgan. Zanjirning parametrlari $(\omega L_k, \omega M, r_k)$ va kirish kuchlanishi berilgan vaziyat uchun tokni aniqlash zarur bo‘lganda, tabiiyki, tokning barcha ko‘paytuvchilari birga guruhlangan bo‘lishi zarur

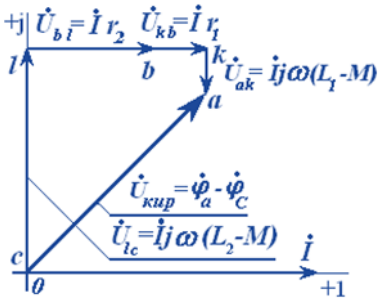
$$\dot{U}' = \dot{I} \cdot [j\omega(L_1 + L_2 + 2M) + r_1] + r_1 + r_2] \qquad (7.19)$$

va

$$\dot{U}'' = \dot{I} \cdot [j\omega(L_1 + L_2 - 2M) + r_1 + r_2] \qquad (7.20)$$

Kvadrat qavslar ichida zanjirning kompleks qarshiliklari joylashgan.

Ular kompleks qarshiliklarining ishoralari har xil ekanligini belgilash uchun asos bo‘lishi mumkin.



7.4-rasm. Topografik diagramma

Misol. 7.3,*b*-rasm sxemasi uchun *a, k, b; l, s* tugunlarning potensiallariga mos keladigan nuqtalarni kompleks maydonda ko‘rsatib, topografik diagrammasini quring.

***Berilgan*:** $\omega L_1 = 20\Omega$.; $\omega L_2 = 60\Omega$; $\omega M = 30\Omega$; $r_1 = 10\Omega$; $r_2 = 20\Omega$.

Yechish: Misolning shartlarida na kuchlanish va na tokning qiymatlari ko‘rsatilgan emas. Biroq, bu topografik diagramma qurish uchun to‘siq bo‘la olmaydi. Agar $\dot{U}''$ va $\dot{I}$ qiymatlari berilgan bo‘lsa, diagrammaning faqat masshtablari o‘zgaradi xolos.

Yuqorida eslatilganlardan shu ma’lum bo‘ladiki, diagrammani oxiridan boshlab qurish maqsadga muvofiq. Tok va *S* nuqta potensiali qiymatlarini ixtiyoriy tanlab (masalan, $\dot{I} = 1A$ va $\dot{\varphi}_C = 0$), ℓ nuqtaning potensialini aniqlaymiz

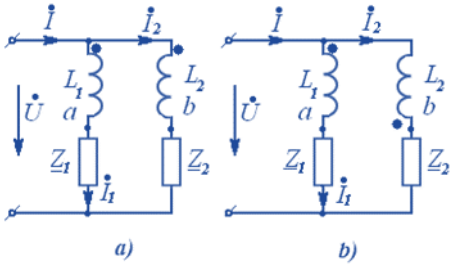
$$\dot{\varphi}_{\ell} = \dot{I}\ j\omega(L_2 - M) = j30\ \ V;$$

so‘ngra *b* nuqtaning potensialini aniqlaymiz

$$\dot{\varphi}_b = \dot{\varphi}_l + \dot{I}\, r_2 = j30 + 20\ V.$$

Shu usulni qo‘llab, 7.4-rasmda keltirilgan diagrammani quramiz (bunda misol ko‘rgazmali bo‘lishi uchun macshtabga rioya qilinmagan).

Ikki parallel induktiv bog‘langan shoxobchalar. Bu xolatda ham shoxobchalarni mos (7.5,*a*-rasm) va qarama-qarshi (7.5,*b*-rasm) ulash farqlarini e’tiborga olish zarur; mos ulanganda ikki shoxobchadagi toklar bir xil belgilangan klemmalarga kiradilar; qarama-qarshi ulanganda esa, bir shoxobchaga tok belgilan-gan klemma orqali kirsa, ikkinchi shoxobchada esa belgilangan klemmadan tok chiqadi. Soddalashtirilgan holda uchchala toklarning qiymatlarini aniqlash uchun uchta tenglamalar tizimining yechimi aniqlanadi



7.5-rasm. **Ikki parallel induktiv bog‘langan shoxobchalar**

$$\left.\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2; \\ \dot{U} &= \dot{I}_l\, \underline{Z}_{11} + \dot{I}\ j\omega M; \\ \dot{U} &= \dot{I}_l\ j\omega M + \dot{I}_2\, \underline{Z}_{22}, \end{aligned}\right\} \qquad (7.21)$$

Bunda $\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + j\omega L_1$ va $\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_2 + j\omega L_2$.

Tenglamalar tizimining keyingi ikkitasi induktiv bog‘lanishi bo‘lmagan shoxobchalar parallel ulanganidan shu bilan farq qiladiki, ularning xar birida ikkitadan toklar qatnashmoqda. Bu tenglamalarni yechib, quyidagilarni aniqlaymiz

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{U}(\underline{Z}_{22} - j\omega M)/\xi^2;\\ \dot{I}_2 &= \dot{U}(\underline{Z}_{11} - j\omega M)/\xi^2;\\ \dot{I} &= U\frac{(\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{22} - 2j\omega M)}{\xi^2},\end{aligned}\right\} \qquad (7.22)$$

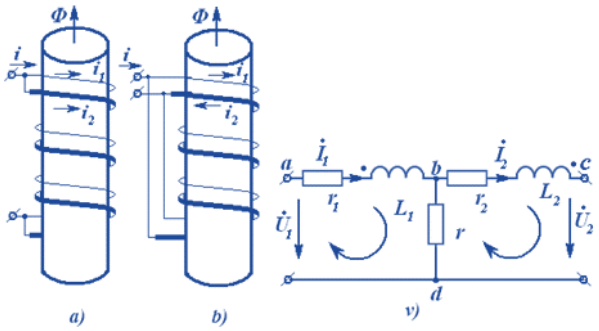
bunda $$\xi^2 = \underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22} - (j\omega M)^2. \qquad (7.23)$$

Ikki mos parallel ulangan shoxobchalarning kirish qarshiligi

$$\underline{Z}_{\text{kir}} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{\underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22} + (\omega M)^2}{\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{22} - 2j\omega M}. \qquad (7.24)$$

Konturlar orasida induktiv bog‘lanish mavjud bo‘lmasa, ilgari ma’lum bo‘lgan tenglik kelib chiqadi.

Qarama-qarshi ulanganda (7.5,*b*-rasm) faqat *M* oldidagi ishora o‘zgartiriladi, natijada kirish qarshiligining reaktiv tashkil etuvchisi kamayadi. 7.5-rasmda mos (*a*) va qarama-qarshi (*b*) parallel ulangan shoxobchalar keltirilgan; bunda tugun-larning belgilari aniq holatda keltirilmagan. Bundan shuni tushunsa bo‘ladiki, qarama-qarshi yo‘nalgan (ulangan) toklar umumiy *F* magnit maydonini kamaytiradi.



7.6-rasm. **Ikki elementli oddiy parallel-ketma-ket zanjirlar**

Ikki elementli oddiy parallel-ketma-ket zanjirlar. Bunday zanjirlar 7.6,*v*-rasmda keltirilgan. Kirxgofning qonunlariga muvofiq tenglamalar qurib, kuchlanishlar $\dot{U}_1$ va $\dot{U}_2$ berilgan deb hisoblab, ikki kontur toklari uchun ikki tenglamalar tizimini tuzamiz

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_l &= \underline{Z}_{11}\dot{I}_{11} + \underline{Z}_{12}\dot{I}_{22}; \\ -\dot{U}_2 &= \underline{Z}_{21}\dot{I}_{11} + \underline{Z}_{22}\dot{I}_{22}, \end{aligned}\right\} \qquad (7.25)$$

bunda

$$\underline{Z}_{11} = r_1 + r + j\omega L_1; \qquad \underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = -r - j\omega M; \qquad \underline{Z}_{22} = r_2 + r + j\omega L_2.$$

Umumiy shoxobcha qarshiligining ishorasi $(-r)$ manfiy tanlanishining sababi, unda oqib o‘tayotgan kontur toklari musbat yo‘nalishlarining qarama-qarshi ekanligidir; o‘zaro induktivlik qarshiligining ishorasi manfiy $(-M)$ olinganligining sababi esa, I_1 va I_2 toklarning belgili (nuqta bilan belgilangan) klemmalarga nisbatan har xil yo‘nalganliklaridir.

Misol. 7.5,*v*-rasmdagi zanjirda *r* va r_1 L_1 shoxobchalar o‘rinlarini almash-tiring; bunda *b* tugundagi har bir almashinayotgan shoxobchalarning ulanishlari ilgarigidek qoldirilsin; kiruvchi tok I_1 ilgarigidek *a* nuqtaga kiradi deb hisoblansin; tanlangan (o‘zaro induktiv bog‘langan) konturlar ilgarigidek qoldirilsin (*a*,*b*, *d* va *d*,*b*,*s*). (7.25) tenglamadagi Z_{11}, Z_{22}, Z_{12} qarshiliklarning yangi qiymatlari aniqlansin.

Yechish. Z_{11} qarshilik o‘zgarmaydi. Konturlarning o‘zaro qarshiligi Z_{12} endi yangi qiymat qabul qiladi

$$\underline{Z}_{12} = -r_1 - j\omega L_1 + j\omega M.$$

Bundan tashqari ikkala induktiv bog‘langan elementlardan har xil yo‘nalishda oqayotgan I_2 tokli ikkinchi konturning o‘zaro qarshiligi ham yangi qiymat qabul qiladi:

$$\underline{Z}_{22} = r_1 + r_2 + j\omega(L_1 + L_2 - 2M).$$

Ikki induktiv bog‘langan konturlar magnit maydoni energiyasi.

Boshlanish (t=0) onida $i_1 = i_2 = 0$ shart bajarilgandagi manbadan olinayotgan energiyani hisoblab, ikki induktiv bog‘langan konturlarning i_1 va i_2 toklari hosil qilgan magnit maydon energiyasini aniqlashimiz mumkin.

Vaqtning t=0 onida manba toki faqat birinchi kontur orqali o‘tadi, ikkinchi kontur uzilgan va tok o‘tmaydi (i_2=0) deb faraz qilamiz. Bu holatda, tokning noldan i_1 gacha bo‘lgan t_1 vaqt oralig‘ida o‘zgarishida birinchi

manbadan quyidagi miqdorda energiya uzatiladi

$$A_1 = \int_0^t i_1^2 r_1 dt + \int_0^t i_1 L_1 \frac{di_1}{dt} dt. \qquad (7.26)$$

A_1 dan r_1 qarshilikda isrof bo‘layotgan energiyani ajratib olsak (birinchi had), birinchi manba magnit maydoni hosil qilishi uchun sarflayotgan energiyani aniqlashimiz mumkin

$$w_1 = L_1 \cdot i_1^2 / 2.$$

Shunga o‘xshasi, t_1 onda yangi manba ikkinchi shoxobchaga ulansin va t_2 vaqtgacha bo‘lgan oraliqda undagi tok noldan i_2 gacha ortsin. Bunda agar i_1 tok o‘zgarmasdan qolsa, u holda ikkinchi manba magnit maydoni hosil qilish uchun quyidagi energiyani uzatishi zarur

$$w_2 = \int_{t_1}^{t_2} i_2 L_2 \frac{di_2}{dt} dt = L_2 i_2^2 / 2.$$

Biroq, birinchi shoxobchada i_2 ortish jarayonida e.yu.k. induktivlanadi; birinchi shoxobchadagi tok o‘zgarmay qolishi (i_1=const) uchun, na faqat birinchi shoxobchadagi kuchlanishlar pasayuvi ($i_1 r_1$)ni, balki undagi induktivlanayotgan e.yu.k.ni ham muvozanatlovchi birinchi manba U_1 kuchlanishini saqlab turish zarur

$$u_1 = i_1 r_1 + M_{12} di_2/dt,$$

shuning uchun i_2 toki ortishi oralig‘ida birinchi manbaning magnit maydoni hosil qilinishi uchun uzatayotgan energiyasi quyidagi tenglik bilan ifodalanadi

$$w_{12} = \int_{t_1}^{t_2} i_1 u_1 dt - \int_{t_1}^{t_2} i_1^2 r_1 dt = i_1 . \int_{t_1}^{t_2} M_{12} \frac{di_2}{dt} dt = M_{12} i_1 i_2. \qquad (7.27)$$

Natijada ikki induktiv bog‘langan shoxobchalarda i_1 va i_2 toklari bo‘lgandagi magnit maydonining to‘la energiyasi

$$w = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M_{12} i_1 \cdot i_2 \qquad (7.28)$$

ga teng bo‘ladi.

Yuqorida keltirilgan usulni qo‘llab, faqat avval ikkinchi shoxobchani manbaga ulab, so‘ngra birinchisini manbaga ulab, quyidagi bog‘lanishni hosil

qiishimiz mumkin

$$w=\frac{1}{2}L_1 i_1^{\,2}+\frac{1}{2}L_2 i_2^2+M_{21}i_1\cdot i_2\,. \qquad (7.29)$$

(7.28) va (7.29) tengliklarning yagona farqi shundan iborat bo‘ladiki, birinchisi tarkibida M_{12} koeffisiyenti (ikkinchi elementda birlik toki bo‘lgandagi birinchi elementning magnit ilashuvi koeffisiyentiga teng) bo‘lsa, ikkinchisi tarkibida M_{21} (birinchi elementda birlik toki bo‘lgandagi ikkinchi elementning magnit ilashuvi koeffisiyentiga teng) mavjud. Ikkala vaziyatda ham zanjirning natijaviy holati bir xil bo‘ladi: i_1 va i_2 tokli tizimda magnit maydoni mavjud bo‘ladi; uning qiymati faqat berilgan o‘tkazgichlarning tuzilishi bilan aniqlanadi.

Ushbu mulohazalar natijasida

$$M_{12}=M_{21}=M \qquad (7.30)$$

ekanligiga iqror bo‘lish mumkin.

Magnit bog‘langanlik koeffisiyenti. Keltirilgan xulosadan ma’lum bo‘ladi-ki, ikki induktiv bog‘langan shoxobchalar (elementlar) energiyasi quyidagicha aniqlanar ekan

$$w=\frac{1}{2}(L_1\cdot i_1^{\,2}+L_2\cdot i_2^2+2M_{21}i_1\cdot i_2). \qquad (7.31)$$

Ushbu qiymat toklar orasidagi bog‘lanish $i_2=x\cdot i_1$ ning qanday bo‘lishidan qatiy nazar musbat ishorali bo‘lishi zarur ekanligi hammaga ayondir. Cheklangan holatlarda energiya w nolga aylanishi mumkin.

Tizimning energiyasi minimal bo‘lgandagi holat uchun x qiymatni aniqlay-miz (u musbat yoki manfiy bo‘lishi mumkin). (7.31) dagi i_2 o‘rniga $x\cdot i_1$ ni qo‘yib, quyidagini aniqlaymiz

$$2w=F(t)=i_1^{\,2}(L_1+L_2+2M\cdot x).$$

$F(t)$ ni x bo‘yicha differensiallab va hosilani nolga tenglab, quyidagini aniqlaymiz

$$2L_2x+2M=0 \quad \text{yoki} \quad x=M/L_2.$$

Bunga mos keluvchi energiyaning minimal qiymati

$$w_{\min}=\frac{1}{2}i_1^2(L_1+\frac{M^2}{L_2}-2\frac{M^2}{L_2})=\frac{1}{2}i_1^2(L_1-\frac{M^2}{L_2}).$$

Ixtiyoriy L_1 va L_2 uchun energiyaning minimal qiymati noldan kichik bo‘la olmasligi ayondir, shuning uchun $M \le \sqrt{L_1 L_2}$, ya’ni o‘zaro induktivlikning moduli induktivlik L_1 va L_2 lar ko‘paytmasidan chiqarilgan kvadrat ildizdan har doim kichik bo‘ladi. Yoki chegaraviy holatda unga teng bo‘lishi mumkin.

Shuning uchun

$$k = M / \sqrt{L_1 L_2} \qquad (7.32)$$

nisbat *ikki elementning magnit bog‘lanish koeffisiyenti deyiladi*; uning qiymati har doim birdan kichik bo‘ladi, chegaraviy holatda birga teng bo‘lishi mumkin.

Agar ikki g‘altak (chulg‘am) katta magnit singdiruvchanlikka ega bo‘lgan o‘zakka o‘ralgan bo‘lsa, magnit bog‘lanish koeffisiyenti birga yaqin bo‘ladi. Bunday sharoitlarda ushbu koeffisiyent 0,9 dan ham ortadi.

Bir necha induktiv bog‘langan elementli zanjir. Ikki induktiv bog‘langan elementlar haqida aytilgan barcha fikrlarni uch va undan ko‘proq elementli bog‘-lanishlarga tadbiq etish oson. Masalan, agar barcha $i_1, i_2, i_3, \cdots$toklar o‘zlari-ning induktiv elementlari belgilangan klemmalariga nisbatan bir xil yo‘naltirilgan bo‘lsa, bu elementlar har birining magnit ilashuvini quyidagicha ifodalash mumkin

$$\left.\begin{aligned}\Psi_1 &= M_{11}i_1 + M_{12}i_2 + M_{13}i_3 + \cdots;\\ \Psi_2 &= M_{21}i_1 + M_{22}i_2 + M_{23}i_3 + \cdots;\\ \Psi_3 &= M_{31}i_1 + M_{32}i_2 + M_{33}i_3 + \cdots.\end{aligned}\right\} \qquad (7.33)$$

Agar toklardan birortasi boshqa yo‘nalishda bo‘lsa, unda ushbu hadning oldidagi ishora o‘rniga teskarisi ($M_{mn}i_n$ o‘rniga $-"M_{mn}i_n"$) qo‘yiladi.

Keltirilgan tenglamalar tizimida bir xil indeksli barcha koeffisiyentlar - mazkur elementlarning induktivligi, ya’ni $M_{11}=L_1$; $M_{22}=L_2$ va h.k, ikki har xil indeksli koeffisiyentlar - mazkur juft elementlar orasidagi o‘zaro induktivliklardir. Bunda, ularning barchasiga ilgari keltirib chiqarilgan tengliklar

tadbiq etilishi mumkin, masalan $M_{12}=M_{21}$; $M_{31}=M_{13}$ va h.k., ya'ni

$$M_{mn}=M_{nm}.$$

Musbat va manfiy o'zaro induktivliklar. Umumiy holda M_{12},M_{23} va h.k. o'zaro induktivliklar musbat yoki manfiy ishorali bo'lishi mumkin; algebra qoida-lariga binoan, bu ishoralar faqat mazkur son qiymatlarining o'rniga qo'yishda amalga oshishi mumkin, masalan M_{12}=- 0,14mHz.

Agar elementlar soni faqat ikkita bo'lsa (L_1 va L_2) va ular orasidagi bog'lanish faqat bitta o'zaro induktivlik M bilan ifodalansa, u holda element klemmalarini belgilaganda shunday qilinadiki, koeffisiyent M musbat ishorali bo'lsin. Umuman olganda, faqat ikki konturdan iborot boshqariluvchi o'zaro induktivlik bo'lganda ham koeffisiyent M musbat yoki manfiy ishora qabul qilishi mumkin. Masalan, bir chulg'am ikkinchisiga nisbatan 180^0 burchakka burila oladigan ikki xalqasimon chulg'amlarda o'zaro induktivlik qiymati berilgan M_0 dan -M_0 gacha o'zgarishi mumkin. Bunday holda ham klemmalarini belgilash zarurati yo'qolmaydi.

Bir necha induktiv bog'lanishlar bo'lganda, masalan uch elementi L_1, L_2, L_3 bo'lgan va M_{12}, M_{23}, M_{31} o'zinduksiya koeffisiyentlari bilan tavsiflangan bog'-lanishda, har bir element klemmalarining uchlarini belgilashda M_{kl} koeffisiyent-larning son qiymatlari yoki musbat, yoki manfiy bo'lishi mumkin. Buning sababi shundaki, ko'pgina hollarda har bir elementning klemmalarini belgilashda M_{kl} ning barcha qiymatlarini musbat bo'lishini ta'minlash mumkin bo'lmaydi.

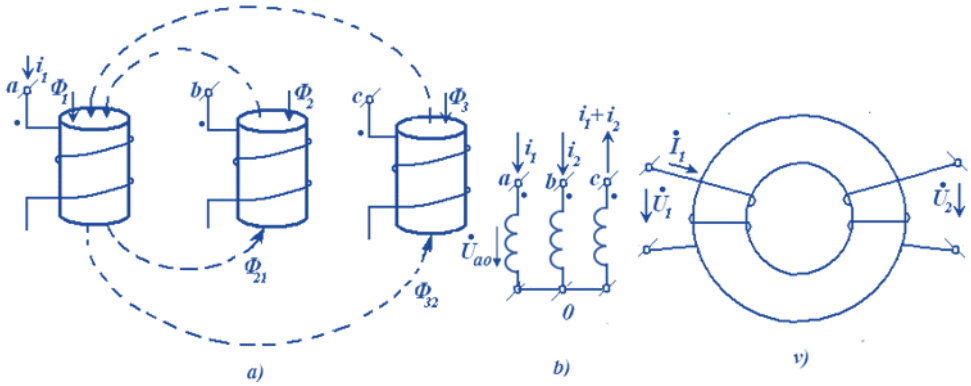
7.6,*a*-rasmda bir-biriga yaqin joylashgan g'altaklar sxemasi keltirilgan. Har bir g'altak uchun musbat yo'nalish deb qabul qilingan Φ_1, Φ_2 va Φ_3 magnit oqimlari keltirilgan. Har bir g'altak - reaktor tokning musbat yo'nalishida Φ_1, Φ_2 va Φ_3 magnit oqimlari aynan shunday yo'nalgan bo'ladi. Shu rasmda birinchi reaktorning toki hosil qilgan magnit oqim ikkinchi (Φ_{21}) va uchinchi (Φ_{31}) reaktorlardan oqib o'tayotgani ko'rsatilgan; Ushbu oqim birinchi reaktorning tokidan hosil bo'lganligi uchun Φ_{21} va Φ_2 oqimlar qarama - qarshi

yo‘nalgan; shunga o‘xshash Φ_{31} va Φ_3 ham qarama-qarshi yo‘nalgandir.

Har bir chulg‘amning boshi deb (7.7,*a*-rasm) uning yuqoridagi klemmasini qabul qilsak, hamda shu klemmalarga i_1, i_2 va i_3 toklar kirayapti, deb faraz qilsak, hamma reaktorlar uchun magnit ilashuvi bog‘lanishini quyidagicha yozishimiz mumkin

$$\begin{aligned}\psi_1 &= i_1 L_1 + i_2 M_{12} + i_3 M_{13};\\ \psi_2 &= i_1 M_{21} + i_2 L_2 + i_3 M_{23};\\ \psi_3 &= i_1 M_{31} + i_2 M_{32} + i_3 L_3,\end{aligned} \qquad (7.34)$$

bunda $M_{12} = M_{21}; M_{13} = M_{31}; M_{23} = M_{32}$.



7.7-rasm. **Musbat va manfiy o‘zaro induktivliklar**

Ushbu holatda *barcha o‘zaro induktivliklar manfiy ishoralidir*. Shunga e’tiborni qaratish zarurki, barcha M_{kl} koeffisiyentlarni musbat ishorali bo‘lishini ta’minlaydigan qilib uchchala g‘altakning hamma klemmalari «boshini» bir hil belgi (nuqta) bilan belgilash usuli mavjud emas.

Masalan, g‘altaklarning hamma pastdagi klemmalarini qisqa tutashtirib (7.7,*b*-rasm), (7.34)dan birinchi reaktor kuchlanishini aniqlash mumkin

$$\dot{U}_{a0} = \dot{I}_1\, j\omega(L_1 - M_{13}) + \dot{I}_2\, j\omega(M_{12} - M_{13}), \qquad (7.35)$$

bunda KTQga ko‘ra $\dot{I}_3 = -(\dot{I}_1 + \dot{I}_2)$ bo‘ladi. (7.35) tenglikdagi M_{kl} koeffisiyentlar qo‘shiluvchi yoki ayiruvchi bo‘lib kirishidan qat’iy nazar, manfiy ishoraga ega.

Misol. 7.7,*b*-rasmdagi zanjirning quyidagi qiymatlari uchun $\dot{U}_{a0}$ kuch-lanishini hisoblang: L_1=4,0 *mHn.*; M_{13}=- 0,1*mHn.*; M_{12}=- 0,2 *mHn.*;

$\dot{I}_1$=1000*A*; $\dot{I}_2$=1000$\angle$-120^0*A*; ω=314s^{-1}.

Yechish. Berilgan qiymatlarda kuchlanish quyidagicha bo‘ladi:

$$\dot{U}_{a0} = j314[4+0{,}1+(-0{,}2+0{,}1)\angle -120^0] = -27{,}7+j1300V.$$

Koeffisiyent M ning kompleks qiymati. Faraz qilaylik, 7.7,*v*-rasmda ko‘rsatilgan ferrit halqaga ikki chulg‘am o‘ralgan bo‘lsin. Agar tok faqat birinchi chulg‘amdan oqayotgan bo‘lsa, hamda $\dot{\Phi}$ magnit oqimi hosil qilinayotgan bo‘lsa, u holda har bir chulg‘amning kuchlanishlari quyidagi tengliklar bilan ifodalanadi

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + j\omega \cdot w_1 \cdot \dot{\Phi}; \qquad \dot{U}_2 = j\omega \cdot w_2 \cdot \dot{\Phi},$$

bunda $w_1$va w_2 chulg‘amlarning o‘ramlari soni; r_1-birlamchi chulg‘am aktiv qarshiligi; $w_1 \cdot \dot{\Phi} = \dot{\psi}_1$; $w_2 \cdot \dot{\Phi} = \dot{\psi}_2$ - magnit ilashuvlar.

Fizika kursidan ma’lumki, magnit oqimi *F* birlamchi chulg‘amning $\dot{I}_1$ tokiga proporsional

$$\Phi = \mu_0 \cdot \mu \cdot n \cdot \dot{I}_1 S / \ell,$$

bunda *l* - o‘zakdagi magnit kuch chiziqlarining o‘rtacha uzunligi; *S* - uning kesim yuzasi; μ - o‘zakning magnit singdiruvchanligi. Ammo qutublanish jarayonining biroz kechikishi (6.14,*b*-rasm) tufayli magnit singdiruvchanlikning kompleks xarakteri sababli *F* oqimi fazasa bilan *I* tokdan δ burchakka kechikadi, shu sababli μ singdiruvchanlik o‘rniga kompleks singdiruvchanlik $\tilde{\mu} = \mu \angle -\delta = \mu' - j\mu''$ qabul qilamiz.

Shuning uchun $\dot{U}_2$ ni o‘zaro induktivlik orqali ifodalash tabiiydir:

$$\dot{U}_2 = j\omega M \dot{I}_1 .$$

Yuqoridagilarni [ya’ni *F* magnit oqimi *I* tokdan δ burchakka kechiksa ham uning tokka proporsionalligi saqlanishini] e’tiborga olish, *M*ning qiymatini kompleks shaklda keltirishga majbur etadi; bunda μ va *M* ning yuqorisiga «tilda» belgisi (~) qo‘yiladi

$$\tilde{M} = M\angle -\delta = M' + jM''. \qquad (7.36)$$

7.2. Induktiv bog‘langan zanjirlarni xususiyatlari

O‘zaro induktiv bog‘langan zanjirlar tenglamalari. O‘zgaruvchan elektr zanjiridagi induktiv bog‘langanlik qo‘shimcha e.yu.k.larning paydo bo‘lishiga olib keladi. KKQ asosida tenglamalar tuzilganda ular e’tiborga olinishi zarur.

Bundagi asosiy murakkablik – ushbu $j\omega M\dot{I}$ qiymatning ishorasini to‘g‘ri tanlashdan hamda barcha induktiv bog‘langan konturlardagi induktivlanayotgan e.yu.k.larni e’tiborga olishdan iborat.

Induktiv bog‘lanishlar bo‘lganda tugun potensiallari usuliga qaraganda, *kontur toklar usulini qo‘llash* qulayroqdir; birinchi usulni qo‘llashda esa qo‘shimcha tushuntirishlar keltirishga majbur bo‘linadi.

Ushbu induktiv bog‘langan zanjirning kontur tenglamalarini tuzib, istalgan paytda uning o‘rniga induktiv bog‘lanishi bo‘lmagan *p*-konturli zanjir tenglamasi-ga o‘tish mumkin; bunda uning parametrlarini tanlashda ushbu zanjirning barcha $\underline{Z}_{mn}$ umumiy qarshiliklari berilgan tenglamalar tizimining $\underline{Z}_{mn}$ koeffisentlariga mos bo‘lishi zarurligini e’tiborga olish kerak. Induktiv bog‘lanishli zanjirlarni induktiv bog‘lanishi bo‘lmagan zanjir bilan almashtirish §7.3da batafsil keltiriladi.

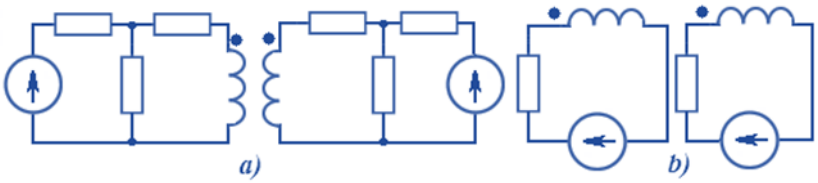
Kirxgof mustaqil tenglamalari soni. O‘zaro elektrik bog‘lanmagan zanjir tizimlari orasida *induktiv bog‘lanish mavjud* bo‘lishi mumkin. Faraz qilaylik, ikki elektrik bog‘lanmagan zanjir berilgan bo‘lsin; ya’ni ikki zanjir orasida o‘tkazuv-chanlik yoki sig‘im orqali bog‘lanish mavjud emas deb hisoblaylik (7.8-rasm).

Ilgari aniqlangan mustaqil tenglamalar soni qoidasidan foydalanib, har biri uchun Kirxgof qonunlari asosida tenglamalarni tuzish mumkin. Biroq, agar ular orasida induktiv bog‘lanish mavjud bo‘lsa, tenglamalar tizimi birgalikda barcha tenglamalar ishtirokida yechilishi lozim. Chunki bir zanjirning kontur tenglamalari tarkibida ikkinchi zanjirning toklari qatnashgan hadlari $j\omega M\dot{I}$

mavjud.

KTQ asosida har bir zanjir uchun tuziladigan tenglamalar soni quyidagicha aniqlanadi

$$K_1' = T_1 - 1; \quad K_2' = T_2 - 1. \tag{7.37}$$



7.8-rasm. **O‘zaro elektrik bog‘lanmagan zanjirlar**

Kirxogofning ikkinchi qonuni uchun esa quyidagicha bo‘ladi

$$K_1'' = B_1 + 1 - T_1; \quad K_2'' = B_2 + 1 - T_2. \tag{7.38}$$

Bu tenglamalarda shtrixlar KTQ va KKQga taaluqli ekanligini bildiradi; 1 va 2 indekslar esa qanday zanjirga muvofiqligini ko‘rsatadi. Shunday qilib, ikkala zanjir uchun tenglamalar sonini quyidagicha aniqlash mumkin

$$K' = T - V; \quad K'' = SH + V - T, \tag{7.39}$$

bunda *T*-tugunlar umumiy soni; *SH*-shoxobchalar soni; *V* - elektr bog‘lanmagan zanjirlar soni, ya’ni agar bog‘langan bo‘lsa ham, unda induktiv bog‘langan.

(7.39) ifodalar ixtiyoriy sondagi zanjirlar uchun qo‘llanilishi mumkin. Bunda shuni esda tutmoq lozimki, shartga ko‘ra bir konturli zanjirda faqat bitta tugun mavjud bo‘ladi.

Masalan, ikkita bir konturli zanjirda (7.8,*b*-rasm) $K'=2-2=0$ va $K''=2+2-2=2$, ya’ni to‘liq tenglamalar tizimi KKQ asosida tuzilgan ikkita tenglamadan iborat bo‘ladi.

Agar elektrik bog‘lanmagan zanjirlar soni *V* ga teng bo‘lsa, ularning har biridagi tugunlardan birining potensialini ixtiyoriy qiymatga teng deb qabul qilish mumkin.

O‘zaro induktiv bog‘langan zanjirda quvvat uzatish va vattmetrlarda o‘lchash. Potensial maydon ichida, ya’ni kuchlanishni potensiallar farqi deb qarash mumkin bo‘lgan zanjirda, o‘tkazgichlar orqali uzatilayotgan quvvat har doim kuchlanish va toklarning ko‘paytmasi deb qaralishi mumkin. Shuning

uchun, biror ikki qutblikka kelayotgan quvvat quyidagicha aniqlanadi:

$$p = u \cdot i \qquad \text{yoki} \qquad S = \dot{U} \cdot \overset{*}{I}.$$

Ammo, ushbu quvvat ikki qutblikning ichida iste'mol qilinayotgan quvvat-dan farqlanishi mumkin: iste'mol qilinayotgan quvvatning bir qismi ushbu ikki qutblik tarkibiga kirmagan elektr zanjiri bilan magnit bog'lanish orqali oqib kelishi mumkin. Bu quvvat $u \cdot i$ ko'paytma sifatida keltirilishi mumkin emas, chunki u ikki qutblikka boshqa elektr zanjiri orqali keltirilmoqda; bu quvvatni $u \cdot i$ ko'payt-maning o'rtacha qiymatini ko'rsatadigan vattmetr yordamida o'lchab bo'lmaydi.

Tushunish oson bo'lishi uchun konkret zanjirni ko'raylik (7.9,*a*-rasm). Zanjirda ikki induktiv bog'langan shoxobchalar mavjud bo'lib, ularning har biriga alohida vattmetr ulangan; vattmetrlarning ko'rsatishlarini shoxobchalarda istemol qilinayotgan quvvatlar bilan taqqoslab ko'raylik; zanjir o'zgaruvchan kuchlanish manbaidan ta'minlanmoqda. Zanjirning parametrlari quyidagicha

$$\dot{U} = 150 + j150V;\ r_1 = 5\Omega;\ r_2 = 10\Omega;\ \omega L_1 = 15\Omega;\ \omega L_2 - 1/(\omega C) = 0\Omega;$$

$$\omega M = 10\Omega.$$

Ushbu qiymatlar uchun (7.22) ifodalar orqali toklarning quyidagi qiymat-larini aniqlaymiz: $\dot{I}_1 = 10 - j10A$; $\dot{I}_2 = 5 + j5A$; $\dot{I} = 15 - j5A$. Ushbu toklarning vektor-lari diagrammasi 7.9,*b*-rasmda keltilgan.

Zanjirga *manbadan kelayotgan aktiv quvvat*ning hammasi *W* vattmetr yordamida o'lchanadi; uning qiymati $P = \mathrm{Re}(\dot{U}\,\overset{*}{I}) = 500W$.

Joul-Lens qonunini qo'llab, birinchi va ikkinchi shoxobchalardagi quvvat-larni hisoblaymiz: $P_1 = I_1^2 r_1 = 1000W$; $P_2 = I_2^2 r_2 = 500W$. Ular yig'indisi manba quvvatiga teng bo'lishini tekshirishimiz mumkin:

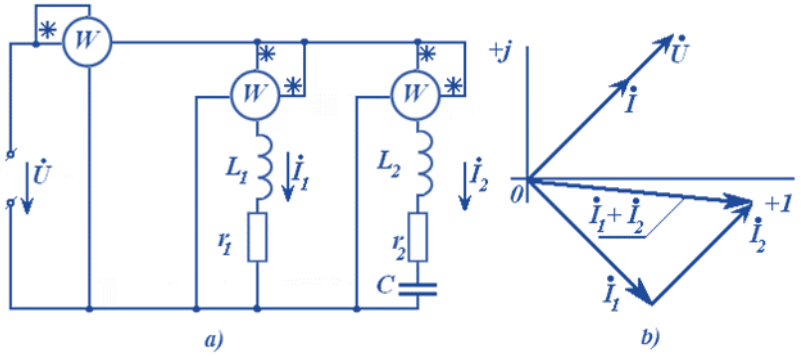
$$P = P_1 + P_2 = 1000 + 500 = 1500W.$$

Shoxobchalardagi istemol qilinayotgan quvvatlarni hisoblagandan so'ng, ulardagi vattmetrlar ko'rsatayotgan qiymatlarni yozib olamiz va tahlil qilamiz: W_1 vattmetr ko'rsatishi $P_{W1} = \mathrm{Re}(\dot{U}\,\overset{*}{I}_1) = 0$, chunki kuchlanish vektori va birinchi

shoxobcha toki vektori o‘zaro ortogonaldir; ikkinchi shoxobcha vattmetrining ko‘rsatishi esa

$$P_{W2} = \mathrm{Re}(\dot{U}\,\dot{I}_2^{*}) = 1500W.$$

Agar shoxobchalar orasida induktiv bog‘lanish bo‘lmaganda edi, vattmetr-larning ko‘rsatishlari tegishli shoxobchalarning r_1 va r_2 qarshiliklaridagi ajralib chiqayotgan quvvatlarga teng bo‘lar edi.



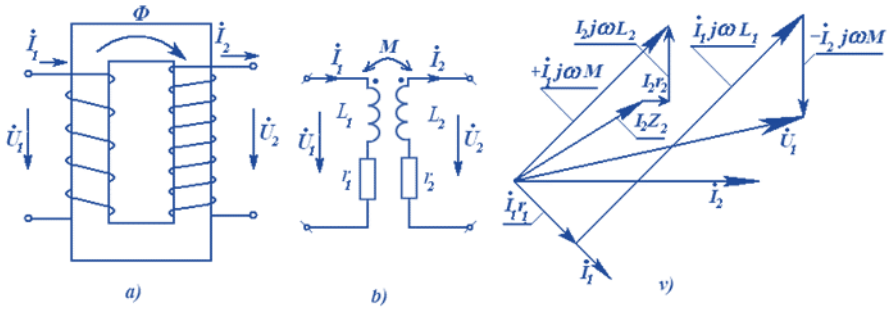
7.9-rasm. **Ikki induktiv bog‘langan shoxobchalar**

Biz ko‘rayotgan holatda esa, R_{w2} quvvat ikkinchi shoxobchaga manbadan uzatilib, qisman (R_2=500W.) unda iste’mol qilinayapti, qisman (R_1=1000W.) birinchi shoxobchaga magnit bog‘lanish orqali uzatilmoqda ($P_{W2} - P_2 = P_1$) deb qarash mumkin.

7.3. Chiziqli transformator

Soddalashtirilgan holatda transformator, agar chulg‘amlari ferromagnit o‘zakka o‘ralgan («kiygizilgan») bo‘lsa (7.10,*a*-rasm), kuchli induktiv bog‘langan ikki chulg‘amdan iborat bo‘ladi. Yuqori chastotalarda ferromagnit o‘zagi bo‘lmagan havo transformatori ham ishlatiladi. Transformatorning amaliyotda qo‘llanilishi, birinchi galda, kuchlanishni transformasiyalashga (kuchlanish va tokni kuchaytirish yoki pasaytirishga) qaratilgan. Chulg‘amlar orasida kuchli magnit bog‘lanish bo‘lganda, tahminan bir xil qiymatdagi F magnit oqimi barcha o‘ramlarni kesib o‘tadi, shuning uchun o‘ramlarda induktivlangan e.yu.k.lar o‘ramlar soni w ga proporsional

$$U_1 \approx U_2\, w_1 / w_2 \qquad (7.40)$$



7.10-rasm. **Chiziqli transformator**

Bundan tashqari transformatorlar bir zanjirni ikkinchisidan elektrik izolyat-siyalagan holda, ular orasida energiya va signallarni ayirboshlash imkonini beradi.

Ferromagnit o‘zakning mavjudligi magnit oqimining qiymati bilan o‘zakka «kiygizilgan» barcha chulg‘amlar to‘la magnitlovchi toklari orasida nochiziqli bog‘lanishga olib keladi. Bundan kelib chiqadigan xulosalarni ushbu darslikning 16 bobida ko‘riladi. Bu yerda biz faqat transformatorning barcha magnit ilashuvlarining toklarga to‘g‘ri proporsional bo‘lgan hamda o‘z qiymatlari toklarga bog‘liq bo‘lmagan induktivliklari va o‘zaro induktivliklari orqali ifodalash mumkin bo‘lgan chiziqli rejimni ko‘rib chiqamiz.

Shunga e’tiborni qaratish zarurki, signallarni uzatish, aloqa va o‘lchash tizimlaridagi transformatorlarning o‘zaklari, ko‘p holatlarda, chiziqli rejimda ishlashga mo‘ljallangan bo‘ladi. Energetika tizimlaridagi transformatorlar ishchi rejimlarining asosiy xususiyatlari va tavsiflari ham chiziqli deb tahminlab hisob-langanda namoyon bo‘ladi. Trasformatorlarning nochiziqli xususiyatlari faqat ularning yuksiz ishlash va ba’zi anomal rejimlaridagini o‘z ta’sirini ko‘rsatadi.

Asosiy tenglamalar, ular tahlili. Transformatorlarning chiziqli rejimi uchun kuchli (ferromagnit o‘zakli) yoki kuchsiz magnit bog‘lanishlari bo‘lgandagi uning to‘la tenglamalari tizimi birlamchi (birinchi) va ikkilamchi (ikkinchi) chulg‘amlari (konturlari)ning tenglamalari bilan ifodalanadi

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \underline{Z}_{11}\dot{I}_1 - \underline{Z}_{12}\dot{I}_2;\\ \dot{U}_2 &= \underline{Z}_{21}\dot{I}_1 - \underline{Z}_{22}\dot{I}_2,\end{aligned}\right\} \qquad (7.41)$$

bunda $\underline{Z}_{11} = r_1 + j\omega L_1$; $\underline{Z}_{22} = r_2 + j\omega L_2$; $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = j\omega M$ bo‘lib, r_1 va r_2 - birlamchi va ikkilamchi chulg‘amlar aktiv qarshillari; L_1; L_2 va M - ularning xususiy va o‘zaro induktivliklari. $\dot{U}_2$ – yukning kuchlanishiga teng bo‘lgan ikkilamchi chulg‘am kuchlanishi. Toklar musbat yo‘nalishlari nosimmetrik (7.10,*a*,*b*-rasmlar) deb qabul qilganligi sababli (7.41) tenglamalar nosimmetrikdir. Toklar-ning yo‘nalishini bunday tanlanishi tabiiydir, chunki ko‘rilayotgan tizim (xususan, transformator)ni birlamchi zanjirdan ikkilamchiga energiya uzatish zvenosi deb qaralmoqda.

Tokning $\dot{I}_2$ qiymatini tarmoq toki $\dot{I}'_{2(T)}$ bilan almashtirib tenglamalar simmetrik bo‘lishi ta’minlanadi

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \underline{Z}_{11}\dot{I}_1 + \underline{Z}_{12}\dot{I}'_{2(T)}; \\ \dot{U}_2 &= \underline{Z}_{21}\dot{I}_1 + \underline{Z}_{22}\dot{I}'_{2(T)}. \end{aligned}\right\}$$

Transformatorning birlamchi zanjiriga kiruvchi quvvat

$$\tilde{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \dot{U}_1 \dot{I}_1^*, \qquad (7.42)$$

ikkilamchi chulg‘amdan chiquvchi quvvat esa quyidagicha aniqlanadi

$$\tilde{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \dot{U}_2 \dot{I}_2^*. \qquad (7.43)$$

7.10,*v*-rasmda transformatorning induktiv-aktiv xarakterli yuklanishi $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \underline{Z}_{yk}$ bo‘lgandagi vektor diagrammasi keltirilgan. Buning uchun avval (7.41) tizimning ikkinchi tenglamasi hadlarini chap tomonga (albatta ishoralarini e’tiborga olib) o‘tkazilib, $\dot{U}_2$ kuchlanish o‘rniga $\dot{I}_2 \underline{Z}_{yk}$ qabul qilinib, o‘ng tomonda esa ikkilamchi chulg‘amdagi induktivlangan kuchlanish qoldirilib, quyidagi shaklga keltiramiz

$$\dot{I}_2 \underline{Z}_y + \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2\, j\omega L_2 = \dot{I}_1\, j\omega M,$$

so‘ngra shu tenglama yordamida vektor diagrammasini quramiz.

Vektor diagrammani qurishda $\dot{I}_2$ tokning yo‘nalishi ixtiyoriy tanlanadi; tok $\dot{I}_1$ induktiv xarakterda bo‘lgani uchun, albatta u $\dot{I}_1\, j\omega M$ kuchlanish

vektoridan $\pi/2$ burchakka kechikadi. $\dot{I}_1 j\omega M$ ning qiymati esa oxirgi tenglamada keltirilgan qiymatlar yig‘indisi sifatida aniqlanadi. Birlamchi kontur uchun vektor diagram-masi esa (7.41)ning birinchi tenglamasini quyidagicha o‘zgartirib, so‘ngra quriladi

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_2 + \dot{I}_1 j\omega L_1 - \dot{I}_2 j\omega M.$$

Tenglamalar (7.41)dan $\dot{I}_1$ tokni qisqartirib, transformatorning tashqi tavsifi $\dot{U}_2(\dot{I}_2)$ aniqlanadi

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \frac{j\omega M}{\underline{Z}_{11}} - \dot{I}_2 \frac{\underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22} - (j\omega M)^2}{\underline{Z}_{11}} \qquad (7.44)$$

Ushbu tenglamaning birinchi hadi - ekvivalent generatorning e.yu.k.i va $\dot{I}_2$ oldidagi ko‘paytma - uning ekvivalent ichki qarshiligi

$$\left.\begin{aligned} \dot{E}_\Gamma = \dot{U}_{2y} = \dot{U}_1 \frac{j\omega M}{\underline{Z}_{11}}; \\ \underline{Z}_i = \frac{\underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22} - (j\omega M)^2}{\underline{Z}_{11}}. \end{aligned}\right\} \qquad (7.45)$$

Mazkur tenglamalar tizimiga mos keluvchi ekvivalent sxema – E_g e.y.k. manbasiga ketma-ket ulangan qarshiliklardan iborat. Aktiv ikki qutubliklar nazariyasiga ko‘ra, ekvivalent e.yu.k.ning qiymati transformator yuksiz ishlagandagi ($I_2 = 0$) ikkilamchi kuchlanishga teng va (7.45)ga ko‘ra

$$j\omega M / \underline{Z}_1 = j\omega M / (r + j\omega L_1)$$

birlamchi kuchlanish ga ko‘paytirilganiga teng.

Aksariyat, transformatorlarda qarshiliklar quyidagi $r << \omega L$ tengsizlikda qabul qilinadi. Masalan, telekommunikasiya korxonasining elektr ta’minoti tizimida ishlatiladigan transformatorlarda (S_H=60000 *kVA.*,U_n=220 *kV.*) $r_1 \approx 0{,}02$ Ω va ωL_1=173 Ω. Shuning uchun, taxminiy hisoblashda $j\omega M / \underline{Z}_{11} \approx M / L_1$ deb qabul qilish mumkin.

Kuchli magnit bog‘lanishli transformatorlarda o‘zakning har qanday kesim yuzasida ham magnit oqimi *F* (7.10,*a* va 7.7,*v*-rasmlar) qiymati bir hil bo‘ladi, shuning uchun ham birlamchi, ham ikkilamchi chulg‘amlarning har bir

o‘ramlarini bir xil magnit oqimi kesib o‘tadi, deb faraz qilamiz. Bundan tashqari, *chiziqli deb tahmin qilinganda,* magnit oqimi chulg‘amlar toki va o‘ramlar soni ko‘paytmalari [magnitlovchi kuch(m.k.)]ga proporsional. Bunday sharoitda induktivlikni o‘ram-lar soni kvadratiga proporsional deb hisoblash mumkin

$$L_1 = w_1^2 L_0;\ L_2 = w_2^2 L_0, \tag{7.46}$$

o‘zaro induktivlik esa o‘ramlar sonlari ko‘paytmasi ($w_1 \cdot w_2$)ga proporsionaldir

$$M \approx w_1 w_2 L_0 = \sqrt{L_1 L_2}. \tag{7.47}$$

Umumiy holda

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}, \tag{7.48}$$

bunda *k* - magnit bog‘lanish koeffisenti.

Yuqori sifatli ferromagnit materiali va yuqori texnologiyani qo‘llab yig‘il-gan transformatorlarda magnit bog‘lanish koeffisenti birga yaqin ($k \approx 0{,}99$). Bunday holatlarda

$$M / L_1 \approx w_1 w_2 \tag{7.49}$$

va ekvivalent generator e.yu.k.ining qiymati transformator birlamchi chulg‘am kuchlanishidan w_2 / w_1 marta katta bo‘ladi:

$$\dot{E}_g = \dot{U}_{2y} \cdot w_1 / w_2. \tag{7.50}$$

Ekvivalent generatorning ichki qarshiligini tasvirlashga o‘tamiz. (7.45) Tenglikdagi $\underline{Z}_i$ tarkibida aktiv qarshilik reaktiv qarshilikka nisbatan juda kichik deb hisoblab, hamda *M* ni (7.48) tenglik orqali ifodalab, quyidagi bog‘lanishni aniqlaymiz

$$\underline{Z}_i = \frac{j\omega L_1 \cdot j\omega L_2 - (j\omega M)^2}{j\omega L_1} = j\omega L_2 (1 - k^2). \tag{7.51}$$

Yuqori kuchlanishli transformatorlarda ωL_2 reaktiv qarshilikning qiymati juda katta bo‘ladi.

Masalan, telekommunikasiya korxonalarining elektr energiyasi ta’minotida ishlatiluvchi kuchlanishi $220kV$ bo‘lgan transformatorning qarshiligi $\omega L_2 = 40\ \ k\Omega$. Tabiiyki, agar ωL_2 ning qiymati kichik bo‘lganda edi, transformator bunday katta kuchlanishga ulanganda uning chulg‘amlaridan juda katta tok oqib o‘tar edi.

Biroq, (7.51) bo‘yicha 1-k^2 juda kichik qiymat bo‘lgani uchun transformator-ning ekvivalent ichki qarshiligi nisbatan katta bo‘lmaydi (yuqorida parametrlari keltirilgan transformatorda 1-k^2 ≈ 0,0032, demak $\omega L_2 = 40\ \ k\Omega$ bo‘lganda $Z_i = 128\ \ \Omega$. Ayirma 1-k^2 magnit oqim tarqoqligi koeffisiyentini anglatadi

$$k_S{}^2 = 1 - k^2 = (L_1 L_2 - M^2)/L_1 L_2.$$

Transformatorning kirish qarshiligi. Transformatorning kirish qarshiligi deb kuchlanish $\dot{U}_1$ ning tok $\dot{I}_1$ ga nisbatiga aytiladi

$$Z_{kir} = \dot{U}_1/\dot{I}_1.$$

Uning qiymati ikkilamchi chulg‘amga ulangan yukning Z_Y qarshiligiga bog‘liq. Asosiy tenglamalar (7.41)ga murojaat qilib va ularga $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_Y$ ni kiritib kirish qarshiligini keltirib chiqaramiz

$$\underline{Z}_{kir} = \underline{Z}_{11} - \underline{Z}^2_{12}/(\underline{Z}_Y + \underline{Z}_{22}). \qquad (7.52)$$

Tenglikning ikkinchi hadini *kiritilgan (kompleks) qarshilik* deyiladi. U birinchi konturga ikkinchi kontur qarshiligi $(\underline{Z}_Y + \underline{Z}_{22})$ ning ta’siri darajasini ko‘rsatadi. Ikkilamchi chulg‘am uzilgan (yukka ulanmagan) bo‘lganda $(\underline{Z}_Y \to \infty)$, kirish qarshiligi faqat birlamchi kontur parametrlari bilan ifodalanadi.

Ilgari keltirilgan farazlarni e’tiborga olganda

$$\underline{Z}_{11} \approx j\omega w_1^2 L_0;\ \ \underline{Z}_{22} \approx j\omega w_2^2 L_0;\ \ \underline{Z}_{12} \approx j\omega w_1 w_2 L_0 k$$

va $|\underline{Z}_Y| << |\underline{Z}_{22}|$ sharti bajarilganda, kirish qarshiligining quyidagi taxminiy qiymatini aniqlaymiz:

$$\underline{Z}_{kir} \approx \frac{j\omega w_1^2 w_2^2 \left(1-k^2\right)+\underline{Z}_Y w_1^2}{w_2^2} \approx Z_Y \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2. \qquad (7.53)$$

Shunday qilib, transformatorning ulanishi natijasida yukning qarshiligi $\underline{Z}_Y$ o‘zgarar ekan. (7.52) tenglikdan foydalanib transformatorning yuksiz ishlaganda xam ($\underline{Z}_Y \to \infty$), qisqa tutashuvida xam ($\underline{Z}_Y \to \infty$) kirish qarshiligini aniqlash mumkin.

O‘zakning magnit holati. Magnit oqimining chulg‘amlar kuchlanishlari va toklariga bog‘liqligi. Ekvivalent kirish qarshiligi $\underline{Z}_i$ chulg‘am induktiv qarshiligi ωL_2 ga nisbatan keskin kamayishini o‘zakdagi magnit jarayonlarini o‘rganish natijasida tushuntirish oson. 7.10,*v*-rasmga murojaat etib, shuni ko‘ramizki, $\dot{I}_1$ va $\dot{I}_2$ toklar o‘zakdagi magnit oqimiga nisbatan har xil yo‘nalganlar. Shuning uchun, agar birinchi tok ($i_1 > 0$ bo‘lganda) magnit maydonini musbat yo‘nalish (F>0) bo‘yicha hosil qilishga harakat qilinsa, ikkinchi tok ($i_2 > 0$ bo‘lganda) shu oqimni susaytirishga harakat qiladi. Bu fikrlar, albatta, toklarning musbat yo‘nalishlarini ixtiyoriy tanlanganligidan emas, balki Lensning qonuni asosida kelib chiqadi.

O‘zakning magnit holati (to‘la tok qonuni asosida) o‘zak ichida o‘tkazilgan berk chiziq bilan ilashgan to‘la tok bilan belgilanadi, ya’ni kompleks shaklda quyidagicha yozilishi mumkin bo‘lgan qiymat orqali belgilanadi

$$\dot{F} = \dot{I}_1 w_1 - \dot{I}_2 w_2. \qquad (7.54)$$

To‘la tok $\dot{F}$ ni *magnitlovchi kuch* (m.k) yoki *magnit yurituvchi kuch* (m.y.k.) deb ataladi.

Ikkinchi tomondan, o‘zakning magnit holati chiziqli rejimda to‘la tokka proporsional bo‘lgan uning magnit oqimi $\dot{\Phi}$ orqali ifodalanadi

$$\dot{\Phi} = a\dot{F} = a(\dot{I}_1 w_1 - \dot{I}_2 w_2), \qquad (7.55)$$

bunda a-proporsionallik koeffisiyenti.

Magnit oqim va to‘la tok orasidagi bog‘lanishning mavjudligi shunday

fikrga olib keladiki, u bo‘yicha berilgan to‘la tokning qiymatiga magnit oqimining ma’lum qiymati mos keladi; bu, o‘z navbatida, ko‘plab qo‘llaniladigan - magnit «oqimini tok hosil qiladi» degan iboraga olib keladi. Biroq bunday ta’rifni aynan tushunish mumkin emas va har doim esda tutish zarurki, tok hamda magnit oqim (yoki magnit maydon) - bir hodisaning ikki o‘zaro bog‘langan integral jarayonidir yoki bir hodisaning ikki ko‘rinishidir.

Transformatorlar ekspluatasiyasida aksariyat, berilgan ishlash shartlarida magnit oqimi keltiriladi. O‘ramlari soni w_1 bo‘lgan chulg‘am U_1 kuchlanishli va ω chastotali tarmoqqa ulangan; ikkilamchi chulg‘am esa yukka ulanmagan, deb faraz qilaylik. Bunday holatda r_1 qarshilikdagi kuchlanish pasayuvini hisobga olmasdan bir o‘ramdagi e.yu.k.ni aniqlaymiz

$$e_0 = -d\Phi_0 / dt \quad \text{yoki} \quad \dot{E}_0 = -j\omega\dot{\Phi}_0 = -\dot{U}_1 / w_1,$$

bunda Φ_0 -yuksiz ishlash rejimidagi magnit oqim.

Kuchlanish $\dot{U}_1$ batamom e.yu.k. $\dot{E}_1 = w\dot{E}_0 = -\dot{U}_1$ bilan muvozanatlanadi; bunda ushbu e.yu.k.ning qiymati o‘ramlar soni w_1 ni bir o‘ramdagi e.yu.k. miqdoriga ko‘paytirilganiga teng. Shunday qilib, berilgan kuchlanish $\dot{U}_1$, o‘ramlar soni w_1 va chastota ω- faqat shulargina magnit oqimi

$$\dot{\Phi}_0 = \dot{U}_1 / (j\omega w_1) \tag{7.56}$$

ni hosil qiladilar.

Ushbu chulg‘amdan oqayotgan tokning qiymati magnit oqim va to‘la tokni bog‘lovchi tenglamadan aniqlanadi. Ushbu tok *yuksiz ishlash toki* yoki *magnit-lovchi tok* $\dot{I}_{01}$ deb ataladi

$$\dot{F} = w_1 \dot{I}_{01}. \tag{7.57}$$

Endi ikkilamchi chulg‘amga biror $\underline{Z}_Y$ qarshiligini ulaymiz. Undan quyidagi tok oqadi

$$\dot{I}_2 = \dot{U}_2 / \underline{Z}_Y = \dot{U}_{02} / (\underline{Z}_Y + \underline{Z}_i), \tag{7.58}$$

bunda $\dot{U}_{02}$-transformator yuksiz ishlagandagi ikkilamchi chulg‘am kuchlanishi.

Dastlabki tahminiy hisoblarda r_1 va r_2 qarshiliklardagi kuchlanishlar pasayuvini e’tiborga olmasa ham bo‘ladi; induktivlanayotgan e.yu.k.ning qiymati kuchlanish-ning teskari ishorali qiymatga teng $\dot{E}_1 = -\dot{U}_1$ va deyarli o‘zgarmaydi deb qarash mumkin. Bunday holatda magnit oqimi ham o‘zgarmasligi zarur $\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_0$, demak to‘la tok ham o‘z qiymatini saqlab qoladi va (7.54) tenglik yordamida aniqlanadi deyish mumkin. Shuning uchun (7.57) va (7.54) lardan aniqlanadi

$$\dot{F} = w_1 \dot{I}_{01} + \dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_1 w_1 - \dot{I}_2 w_2$$

yoki

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{01} + \dot{I}_2 \cdot w_2 / w_1 . \qquad (7.59)$$

Ikkilamchi chulg‘amdagi $\dot{I}_2$ tokning yuk ulanishi bilan paydo bo‘lishi natijasida (7.59)ga ko‘ra, birlamchi chulg‘amdagi $\dot{I}_2$ tokning $\dot{I}_{01}$ga nisbatan $(\dot{I}_2 \cdot w_2 / w_1)$ qiymatga proporsional ravishda ortishi ko‘riladi. Ikkilamchi tok go‘yo, birlamchi chulg‘am orqali oqib o‘tib w_2 / w_1 ko‘paytma marta ortgandek tuyuladi.

Normal yuklangan ferromagnit o‘zakli transformatorlarda yuksiz ishlash $\dot{I}_{01}$ toki yukli bo‘lgan $\dot{I}_1$ tokning $5 \div 10\%$dan ko‘p bo‘lmagan qiymatini tashkil etadi; o‘lchov transformatorlarida esa yuksiz ishlash toki undan ham kichik ulushni tashkil etadi. Shuning uchun, ko‘pgina hollarda, ayniqsa tahminiy hisoblashlarda, (7.59) tenglik o‘ng tomonidagi birinchi hadni nazarga olinmaydi va buning natijasida

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \cdot w_2 / w_1 , \qquad (7.60)$$

deb hisoblanadi.

Bundan tashqari (7.50)da ko‘rganimizdek, $\dot{U}_2 \approx \dot{U}_{02} = \dot{U}_1 \cdot w_2 / w_1$; shuning uchun transformatorga kiritilayotgan quvvatning deyarli hammasi yukka uzatiladi, deb hisoblanadi, ya’ni

$$\tilde{S} = \dot{U}_1 \overset{*}{\dot{I}}_1 = \tilde{S}_2 = U_2 \overset{*}{\dot{I}}_2 + \dot{U}_1 \frac{w_2}{w_1} \dot{I}_1 \frac{w_1}{w_2}. \qquad (7.61)$$

Transformasiyalash koeffisiyenti. Yuqorida keltirilgan ko‘pchilik tenglama-larda o‘ramlar sonlarining nisbati $w_2 / w_1 = k$ ni uchratish mumkin. Bu nisbat *transformasiyalash koeffisiyenti*ga juda yaqin

$$k = \dot{E}_2 / \dot{E}_1 \approx U_{20} / U_1 \approx k_{21} = w_2 / w_1.$$

Ideal transformator. Transformator ishlashining asosiy jarayonlarini o‘rganish uchun yuqoridagi ba’zi soddalashtirishlar natijasida hosil bo‘lgan tahminiy bog‘lanishlarni

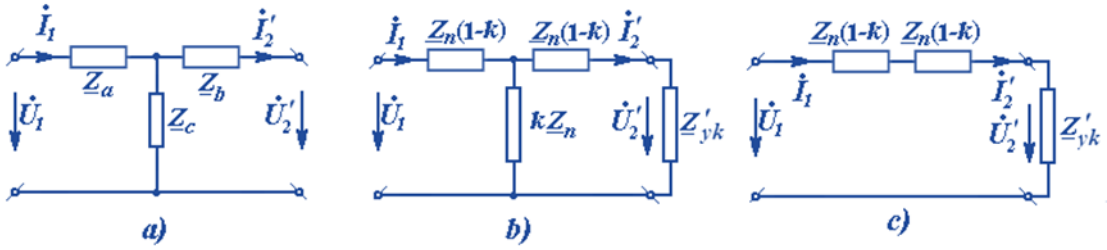
$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 k_{21}; \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_2 k_{21} \qquad (7.62)$$

(bunda $k_{21} = w_2 / w_1$) qabul qilamiz, ya’ni real transformatorning o‘rniga ideal transformatorni hosil qilamiz.

Transformator ideal deb tahmin qilinishida $\underline{Z}_{11} = j\omega L_1 \to \infty$; $\underline{Z}_{22} = j\omega L_2 \to \infty$ va $k = M / \sqrt{L_1 / L_2} \to 1$ deb hisoblanadi, ya’ni chulg‘amlar qarshiliklari sof reaktiv xarakterda va qiymatlari juda katta (∞ ga intiladi), bog‘lanish koeffisiyenti *k* esa birga intiladi, deb faraz qilinadi.

Induktiv bog‘lanishi qisqartirilgan ekvivalent zanjir. Tenglamalar (7.41) tizimini tahlil qilishga qaytamiz. Bu tenglamalarni konturlari va shoxobchalari orasida induktiv bog‘lanishi bo‘lmagan $\dot{I}_1$ va $\dot{I}_2$ tokli ikki konturli zanjirning tenglamalari deb qarash mumkin. Hosil bo‘lgan bunday zanjirning parametrlari (7.41) tenglamalar tizimidagi kontur qarshiliklari $\underline{Z}_{11}$ va $\underline{Z}_{22}$ va umumiy $\underline{Z}_{12}$ qarshilikka mos bo‘lishi uchun, yangi sxema kamida uchta $\underline{Z}_a$, $\underline{Z}_b$ va $\underline{Z}_c$ mustaqil parametrlarga ega bo‘lishi zarur. Buning uchun yangi sxemada (7.11,*a*-rasm) quyidagilar bajarilishi zarur

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_a + \underline{Z}_c; \quad \underline{Z}_{22} = \underline{Z}_b + \underline{Z}_c; \quad \underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = \underline{Z}_c.$$



7.11-rasm. **Ekvivalent zanjirlarga aylantirish**

Agar $\underline{Z}_{11}$, $\underline{Z}_{22}$, $\underline{Z}_{12}$ berilgan bo‘lsa, $\underline{Z}_a$, $\underline{Z}_b$ va $\underline{Z}_c$ larni aniqlash quyidagicha bajariladi

$$\left.\begin{aligned} \underline{Z}_a &= \underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{12} = r_1 + j\omega(L_1 - M); \\ \underline{Z}_b &= \underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12} = r_2 + j\omega(L_2 - M); \\ \underline{Z}_c &= \underline{Z}_{12} = j\omega M\,. \end{aligned}\right\} \qquad (7.63)$$

Agar 7.11,*a*-rasmdagi zanjir kuchaytiruvchi transformator $(U_{20}/U_1 = k_1 > 1)$ uchun almashtirish sxemasi bo‘lsa, unda $L_1 < M$ bo‘ladi, demak, birinchi qarshilik $\underline{Z}_a$ ning tarkibiga manfiy reaktiv qarshilik $\omega(L-M)$ kiradi, ya’ni almashtirish sxemasidagi bu shoxobcha tarkibida kondensator bordek tuyuladi. Ammo hosil bo‘lgan zanjir kirish kuchlanishini kuchaytirishdan tashqari hyech qanday kondensatorga xos bo‘lgan xususiyatlarga ega emas. Buni masalan, reaktiv qarshilik $\omega(L_1 - M)$ manfiy bo‘lsa ham, chastota ω ortishi bilan, kondensatorda ko‘rganimizdek $[jx_c = -j/(\omega C)]$ kamayishi o‘rniga, $\omega(L_1 - M)$ning ortishini ko‘rish mumkin; uni (aslida manfiy induktivlik tabiatda bo‘lmasa ham) manfiy induktivlikning reaktiv qarshiligiga mos keladi deb qaraymiz.

Shunga o‘xshash yo‘l bilan boshqa induktiv bog‘langan shoxobcha va konturlarni induktiv bog‘lanishsiz ekvivalent (fiktiv – hayoliy) zanjirlarga aylantirishimiz mumkin.

Transformatorlarning ayrim muxim almashtirish sxemalari. Ikkilamchi chulg‘amlarni birlamchi chulg‘amlariga *«keltirilgandagi»* transformatorning almashtirish sxemalari (ekvivalent zanjirlari) ularni hisoblashda soddalashtirish-

ning eng muhim usullaridan biridir. Bunda *keltirilgan tok* $\dot{I}'_2$ *va keltirilgan kuchlanish* $\dot{U}'_2$ quyidagicha aniqlanadi

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 \cdot m; \qquad \dot{U}'_2 = \dot{U}_2 / m. \tag{7.64}$$

Bu ifodalarda *m - keltirish koeffisenti*. U shunday tanlanadiki, bunda keltirilgan ikkilamchi kuchlanish birlamchi kuchlanishga teng yoki unga yaqin bo‘lsin; bunda ikkilamchi tokning qiymati ham birlamchi chulg‘amdagi tok qiymatiga yaqinlashadi. Shunga e’tiborni qaratish zarurki, ikkilamchi chulg‘amni birlamchi chulg‘amga keltirish usulini qo‘llamaganda chulg‘amlar o‘ramlari sonining farqi kattaligi sababli transformator vektor diagrammasini qurish imkoni mutlaqo bo‘lmaydi.

Ikkilamchi tok va kuchlanish uchun keltirish koeffisenti *m* ni tanlagandan so‘ng, qarshiliklar uchun ma’lum keltirish koeffisentini aniqlaymiz. Agar ikkilamchi zanjirning xaqiqiy toki va kuchlanishi $\dot{U}_2 = \underline{Z}_Y \dot{I}_2$ bo‘lsa, u holda keltirilgan tok va kuchlanishlar quyidagicha bo‘ladi

$$\dot{U}'_2 = \underline{Z}'_Y \dot{I}'_2 \tag{7.65}$$

undan esa $$\underline{Z}'_Y = \underline{Z}_Y / m^2 \tag{7.66}$$

ekanini aniqlanadi.

Keltirilgan qiymatlar uchun esa quvvatlar invariant (ya’ni, bir sxemadan ikkinchisiga o‘tganda quvvatlar o‘zgarmas) bo‘ladi

$$\dot{U}'_2 \overset{*}{I}'_2 = \dot{U}_2 \overset{*}{I}_2; \qquad I'^2_2 \underline{Z}_Y = (I'_2)^2 \underline{Z}'_Y. \tag{7.67}$$

Aksariyat, keltirish koeffisentining qiymatini transformasiyalash koeffisenti qiymatiga tenglashtirib olinadi.

T-simon almashtirish sxemasi. Berilgan tenglamalar tizimini *T*-simon sxemadagi (7.11,*a*-rasm) keltirilgan kontur toklari tenglamalari bilan taqqoslab ekvivalent parametrlar qiymatlarini aniqlash mumkin; ular qabul qilingan keltirish koeffisentiga bog‘liq

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_{11} - \underline{Z}_{12}/m; \quad \underline{Z}_b = \left(\underline{Z}_{22}/m^2\right) - \underline{Z}_{12}/m; \quad \underline{Z}_c = \underline{Z}_{12}/m \tag{7.68}$$

Keltirish koeffisentini $m=\sqrt{\underline{Z}_{22}/\underline{Z}_{11}}$ deb qabul qilib, juda sodda va simmetrik sxemaga (7.11,*b*-rasm) kelamiz; unda barcha parametrlar $\underline{Z}_{11}$ va umumlashtirilgan bog‘lanish koeffisenti orqali ifodalangan bo‘ladi

$$K=\underline{Z}_{12}\sqrt{\underline{Z}_{11}\cdot\underline{Z}_{22}}\,. \qquad (7.69)$$

Ko‘rsatilgan *m* ning qiymatlari va unga mos keluvchi sxema faqat $\underline{Z}_a=\underline{Z}_b$ deb qabul qilingan faraz natijasida kelib chiqadi. Agar $\underline{Z}_{nm}$ ni sof reaktiv xarakterdagi qarshilik deb qaralmasa, u holda bog‘lanish koeffisenti bilan keltirish koeffisenti kompleks sonlarga aylanadi.

Aksariyat, $K\cdot\underline{Z}_{11}$ning juda katta qiymatlarida (juda sifatli ferromagnit o‘zagi bo‘lgan transformator), 7.11,*b*-rasmdagi ko‘ndalang shoxobcha mavjudligi e’tiborga olinmaydi; natijada, sxema keskin soddalashadi (7.11,*v*-rasm).

Boshqa turdagi almashtirish sxemalari (masalan G-simon,) ham mavjud. Unda, ideal transformator sxemasiga qo‘shimcha qilib, yuksiz ishlashdagi tok va quvvat isrofini hisobga olish uchun birlamchi chulg‘am tomonidan ko‘ndalang shoxobcha kiritiladi, shu bilan birga, qisqa tutashuv quvvat isroflari va kuchlanishini hisobga oluvchi bo‘ylama shoxobcha ham kiritiladi.

Transfopmatorlarning muvofiqlashtiruvchi element sifatida ishlashi. Transformatorlar nafaqat zanjirning ikki qismini bir biridan elektrik izolyasiyalab, kuchlanish va toklar qiymatini o‘zgartirib, energiyaning uzatilishini ta’minlovchi vosita sifatida qo‘llaniladi, balki ular muvofiqlashtiruvchi element sifatida ham katta ahamiyatlidir.

Qarshiligi r_Y bo‘lgan iste’molchini berilgan e.yu.k.ga va berilgan ichki qarshilik r_i ga ega bo‘lgan manbaga ulanganda uzatilayotgan maksimal quvvat $r_Y=r_i$ shartiga mos keladi.

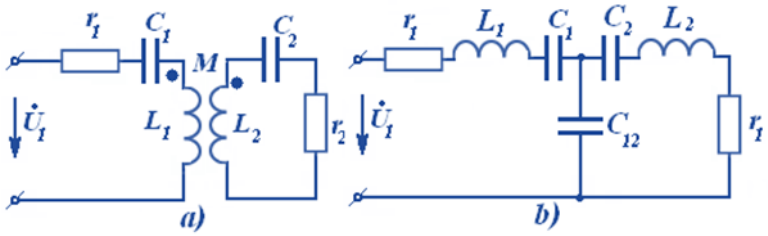
Manba bilan iste’molchi orasiga transformator ulanganda iste’molchining qarshiligi, (7.53) va (7.68)dan kelib chiqqanidek, manbaga ulangan quyidagi ekvivalent qarshilikka aylanadi

$$r'_Y = r_Y\left(w_1 / w_2\right)^2. \qquad (7.70)$$

Transformatorlar chulg‘amlarining o‘ramlari sonlari nisbati w_1/w_2 ni taxminan transformasiyalash koeffisenti k_T ga teng qilib shunday tanlash mumkinki, bunda $r_i = r'_Y$ sharti bajarilsin, hamda manba bilan iste’molchi muvofiqlashgan bo‘lsin. Qarshiliklarning reaktiv tashkil etuvchilari zanjirga qo‘shimcha reaktiv elimentlarni (aksariyat sig‘im *S*) qo‘shib kompensasiyalash mumkin.

7.4. Ikki magnit bog‘langan konturlarda rezonans

Signallarni uzatish va qayta o‘zgartirish uchun mo‘ljallangan sxemalar tarkibida parallel va ketma-ket ulangan rezonans konturlari mavjudligidan tashqari, ba’zan ikki bog‘langan konturlar ham bo‘ladi. Aksariyat, konturlar induktiv (magnit yoki transformatorli) bog‘langan (7.12,*a*-rasm), ba’zan esa sig‘imli bog‘-langan bo‘lishi ham mumkin (7.12,*b*-rasm).



7.12-rasm. **Ikki magnit bog‘langan kontur**

7.12,*a*-rasmdagi zanjirning birinchi konturi uchun bog‘lanish darajasi $k_1 = M/L_1$ qiymat bilan belgilanadi, ikkinchisi uchun esa $k_2 = M/L_2$ bo‘ladi. Konturlarning bog‘lanish koeffisenti k ularning o‘rtacha geometrik qiymatiga teng, ya’ni

$$k = \sqrt{k_1 k_2} = M/\sqrt{L_1 L_2}. \qquad (7.71)$$

Shunga o‘xshash, 7.12,*b*-rasmdagi zanjir uchun

$$k = \frac{1/C_{12}}{\sqrt{(1/C'_1)(1/C'_2)}}, \qquad (7.72)$$

bunda $C'_1 = C_1 C_{12}/(C_1 + C_{12})$ birinchi kontur sig‘imi; $C'_2 = C_2 C_{12}/(C_2 + C_{12})$ ikkinchi

kontur sig‘imi.

Bog‘langan konturlarni rezonansga rostlash har xil usullar bilan amalga oshirilishi mumkin.

Masalan, agar 7.12,*a*-rasmdagi zanjirda C_1 sig‘imni o‘zgartirsak, u holda

$$x_1 + x_{ich} = 0, \tag{7.73}$$

bo‘lganda (bunda $x_1 = \omega L_1 - 1/\omega C$; $x_{ich} = -x_2\omega^2 M^2 / z_2^{\,2}$ - kiritilayotgan reaktiv qarshilik; $x_2 = \omega L_2 - 1/\omega C_2$; $z_2^{\,2} = r_2^{\,2} + x_2^{\,2}$), tok I_1 o‘zining quyidagi maksimal qiymatiga erishadi

$$I_1 = U/(r_1 + r_{ich}), \tag{7.74}$$

bunda $r_{ich} = r_2\omega^2 M^2 / z_2^{\,2}$.

I_1 tok fazasi kirishdagi kuchlanish fazasi bilan mos keladi. Bunda I_2 tok ham maksimal qiymatga ega bo‘ladi

$$\dot{I}_2 = \dot{U}\,\omega M / z_2 (r_1 + r_{ich}). \tag{7.75}$$

Bunday rezonans xususiy rezonans deyiladi.

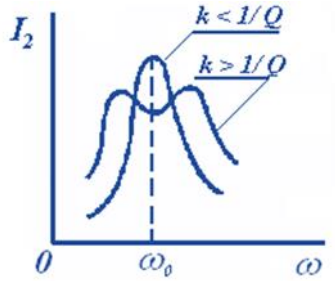
Ikkinchi konturdagi tokning maksimal qiymatiga ham C_2 sig‘imni o‘zgartirib (*ikkinchi xususiy rezonans*) erishish mumkin.

Agar sig‘im C_1 dan tashqari yana bog‘lanish koeffisiyenti k ni o‘zgartirib (7.73) shart bajarilsa, undan tashqari $r_1 - r_{IIq}$ va $\omega M = z_2\sqrt{r_1 / r_2}$ ga erishilsa, ikkilamchi kontur tokining qiymatini undan ham kattaroq bo‘lishiga erishish mumkin $I_2 = U/2\sqrt{r_1 r_2}$. Bunday rezonans *murakkab rezonans* deyiladi. Murakkab rezonans-ni hosil qilish uchun C_1 ning o‘rniga C_2 ning qiymatini o‘zgartirish mumkin.

Agar konturlarning har biri alohida rezonansga sozlansa $(x_1 = 0; x_2 = 0)$, so‘ngra optimal bog‘lanish ($\omega M = \sqrt{r_1 r_2}$) tanlansa, unda *to‘la rezonans* shartini hosil qilishimiz mumkin. Tok I_2 murakkab rezonansdagi kabi maksimal qiymatiga erishadi. Har bir konturni bir hil chastotali $\omega_1 = \omega_c = \omega_0$ rezonansga sozlab, k bog‘lanish koeffisiyentini tanlab, bir konturli rezonans uchun o‘tkazish

kengligini aniqlanganidek, ikki konturli tizimning o‘tkazish kengligini ham o‘zgartirish mumkin: o‘tkazish kengligining chegarasida tokning qiymati maksimal tokdan $\sqrt{2}$ marta kam bo‘ladi.

Agar bog‘lanish koeffisiyenti kritik qiymatidan kichik bo‘lsa $k<1/Q$, rezonans tavsifi ushbu holda ketma-ket konturning rezonans tavsifiga o‘xshash bo‘ladi (7.13-rasm); bunda $Q=Q_1=Q_2$ - har bir konturning asilligi. Bog‘lanish koeffisiyenti kritik qiymatdan katta bo‘lsa $(k>1/Q)$, «ikki o‘rkachli» rezonans tavsifi hosil bo‘ladi. Uning o‘tkazish kengligi bitta konturli rezonansga nisbatan kengroq lekin 3,1 martadan ko‘p emas) bo‘ladi.



7.13-rasm. **Ketma-ket konturning rezonans tavsifi**

Nazorat savollari

1. O‘zaro induktiv bog‘langan elementli zanjirlarni tushuntirib bering.

2. Induktiv bog‘langan elementlar qutublarini belgilashni tushuntirib bering.

3. Ikki induktiv bog‘langan zanjirlarni ketma-ket ulashni tushuntirib bering.

4. Ikki elementli oddiy parallel-ketma-ket zanjirlarni tushuntirib bering.

5. O‘zaro induktiv bog‘langan zanjirlar tenglamalarini tuzishni tushuntirib bering.

6. O‘zaro induktiv bog‘langan zanjirda quvvat uzatish va vattmetrlarda o‘lchashni tushuntirib bering.

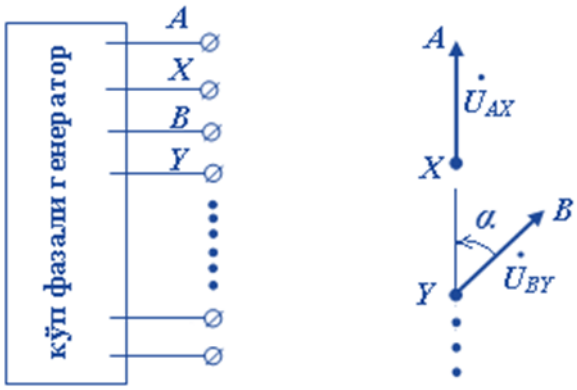
7. Chiziqli transformator asosiy tenglamalar, ular tahlilni izohlab bering.

8. Ikki magnit bog‘langan konturlarda rezonansni sharhlab bering.

8-BOB. UCH FAZALI ZANJIRLAR

8.1. Ko‘p fazali zanjirlar

Elektrotexnikada ko‘p fazali (aksariyat uch fazali) zanjirlar ko‘p uchraydi. Bunda chiqish qismida bir juft qisqichlari (qutblari) bo‘lgan bir fazali zanjirlardagi energiya manbai(generator)dan farqli ravishda, ko‘p fazali generatorning chiqish qismida bir necha juft qisqichlari mavjud bo‘ladi.



a) ***b)***

8.1-rasm. **Ko‘p fazali generator sxemasi**

Har bir juft qisqichlarda generasiya qilinayotgan energiyaning chastotasi tengdir. 8.1,*a*-rasmda *M* ta juft qisqichlari bo‘lgan ko‘p fazali generator sxemasi keltirilgan; har bir *A-X*, *V-U*, ..., *M-Z* juft qisqichlari orasida, yoki har bir *AX*, *VU*, ..., *MZ* fazalarida o‘zlarining kuchlanishlari mavjud bo‘lib, ixtiyoriy juftliklar bir-biri bilan elektrik bog‘lanmagan bo‘ladi; ularning orasiga voltmetr ulansa nolni ko‘rsatadi, masalan $U_{AB}=O; U_{BM}=O;$ fazalar orasidagi elektrik bog‘lanishni tashqaridagi qisqichlardagi ulanishlar yordamida amalga oshirish mumkin. Hamma fazalardagidek U_{AX}, U_{BY} va h.k kuchlanishlar, aksariyat hollarda, bir xil amplituda va chastotalarga ega bo‘lib, faqat fazalari siljigan bo‘ladi (8.1,*b*-rasm). Simmetrik *M*-fazali tizimlarda kuchlanishlar orasidagi burchak $\alpha=2\pi/M$ ga teng bo‘ladi.

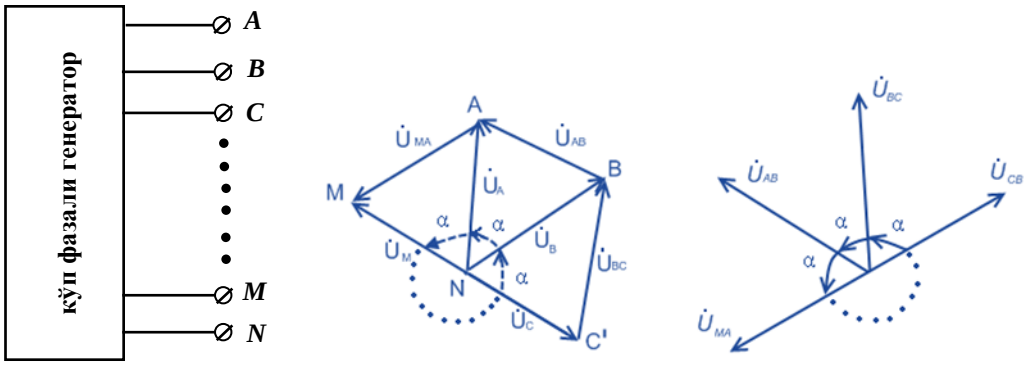
8.2.*a*-rasmda (*M+1*) qisqichli, *M* fazali tizimning qisqichlari keltirilgan; ularda *A*, *V*, ..., *M*-faza qisqichlari. *N* bilan belgilangan oxirgi qisqich (neytral

qisqich), umumiy nuqtani tasvirlaydi; unga barcha fazalarning *X*, *U*, ... «ketlari» qisqichlari (8.1,*a*-rasm) ulangan. Soddalashtirib nomlanganda fazalarning boshlari faqat «*faza*» deyiladi, neytral qisqich *esa neytral* deyiladi.

Simmetrik ko‘p fazali generatorda

$$U_A = U_B = U_c = ...; \quad \dot{U}_A = \dot{U}_B \cdot \alpha; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_c \cdot \alpha; ...., \tag{8.1}$$

bunda $\dot{U}_A = \dot{U}_{AN}$; $\dot{U}_B = U_{BN}$; ...– *faza kuchlanishlari*; $\alpha = e^{j\alpha}$ – *faza ko‘paytiruv-chisi*; demak, har bir faza va neytral orasidagi kuchlanishlar modullari teng va bir-biriga nisbatan $\alpha = 2\pi / M$ burchakka siljigan (8.2,*b*-rasm) bo‘ladi.



a) b) v)

8.2-rasm. **Simmetrik ko‘p fazali generator**

Ixtiyoriy bir juft yonma-yon fazalar, ya’ni *A* va *V*, va *S*, ..., (*M-1*) va *M*, *M* va *A* fazalar orasidagi kuchlanishlar qiymat (modul)lari bir xil, fazalari bo‘yicha siljigan bo‘ladi (8.2,*v*-rasm);

$$\left.\begin{aligned} &U_{AB} = U_{BC} = ...U_{MA}; \\ &\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{BC} \cdot \alpha; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{CD} \cdot \alpha ...; \end{aligned}\right\} \tag{8.2}$$

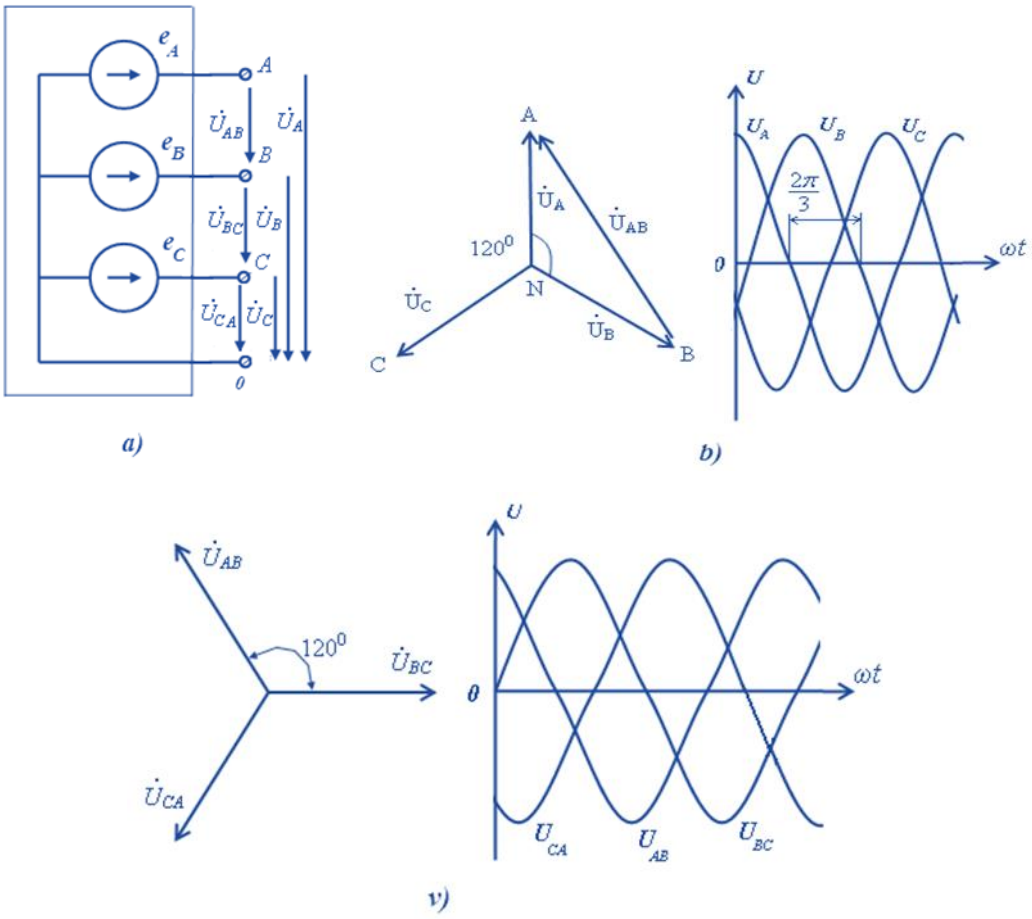
bunda $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$, $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C$,.... .

Shunga e’tiborni qaratish zarurki, 8.2,*v*-rasmdagi vektor diagramma 8.2,*b*-rasmdagidan farqli ravishda topografik emas.

Genratorning chiqish qisqichlarining shunday ulanishlari ham uchrashi mumkunki, unda generator chulg‘ami tashqarisiga faqat *M* ta fazaning *M* ta

boshi chiqarilib, faza ketlari generator ichkarisida bir *N* nuqtaga ulanadi va tashqariga chiqarilmaydi [masalan, 8.8 va 8.9-rasmlarda (MQ3) uch fazali tizim].

Ko‘p fazali, xususan, uch fazali (8.3, *a*-rasm) bitta generatorni, hamma vaqt ham, faza kuchlanishlari $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \ldots$ bo‘lgan har birining chulg‘amlari tegishli faza qisqichlari va neytral orasiga joylashtirilgan *M* ta mustaqil bir fazali generatorlar (8.3,*a*-rasm) sifatida ko‘rsatish mumkin. 8.3,*b*-rasmda simmetrik uch fazali generatorning (8.3,*a*-rasm) $U_A = U_B = U_c = U_\phi$ bo‘lgandagi topografik vektor diogram-masi hamda $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ va $\dot{U}_C$ faza kuchlanishlari oniy qiymatlarining grafigi keltiril-gan. Faza kuchlanishlarining har biri boshqasiga nisbatan $2\pi/3 = 120^0$ ga siljigan.

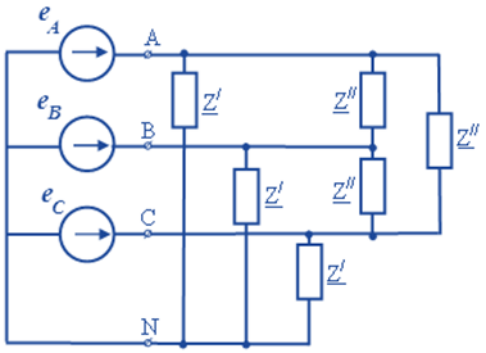


8.3-rasm. **Uch fazali generator**

Fazalararo (*fazalar orasidagi*) yoki *liniya kuchlanishlari*ning qiymatlari

(8.3,*b* va *v*-rasm) $\dot{U}_{AB}=\dot{U}_A-\dot{U}_B$; $\dot{U}_{BC}=\dot{U}_B-\dot{U}_c$; $\dot{U}_{CA}=\dot{U}_c-\dot{U}_A$ ham bir xil bo‘lib, faza kuchlanishlaridan $\sqrt{3}$ marta katta bo‘ladi: $U_{AB}=U_L=\sqrt{3}U_F$.

Liniya kuchlanishlarining oniy qiymatlari fazalari bo‘yicha biri biridan 120^0 ga siljigan bo‘ladi. Bunga topografik vektor diagrammasi yoki analitik bog‘lanish-larni tahlil qilib ishonch hosil qilish mumkin. 8.3,*v*-rasmda fazalaroro kuchlanish-larning vektorlari va tegishli oniy qiymatlari keltirilgan. Bu vektor diagramma esa topografik emas.



8.4-rasm. **Yukning faza shohobchalari**

Iste’molchi (yuk) ixtiyoriy fazalar jufti boshlarining orasiga yoki ixtiyoriy faza boshi bilan neytral orasiga ulanishi mumkin.

Xar bir faza bilan neytral orasiga ulangan yukning faza shohobchalari bir xil qarshiliklarga ega bo‘lsa (8.4-rasmdagi $\underline{Z}'$) iste’molchi yoki yuklama simmetrik deyiladi; xuddi shunga o‘xshash, agar har bir juft fazalar boshiga bir xil $\underline{Z}''$ qarshiliklar ulangan bo‘lsa (8.4-rasm) yuk simmetrik deyiladi. Ko‘p fazali generatorlari bo‘lgan zanjirlar *ko‘p fazali zanjirlar* deyiladi.

Hozirgi zamon uch fazali zanjirlar nazariyasiga M.O.Dolivo-Dobrovolskiy asos solgan (1862-1919 y.). U tomonidan kashf etilgan uch fazali asinxron motori barcha elektr motorlariga nisbatan eng sodda va ishonchli bo‘lib, xozirgi kunda ishlatilayotgan barcha elektr motorlarining 80-85%ini tashkil etadi. Bu esa uch fazali tizimlarning keng tarqalishiga asos bo‘ldi. Uch fazali tizimlarning, bundan tashqari, boshqa afzaliklari ham mavjud; energiyaning uch fazali tarqatilishi bir fazali enegriya uzatishga nisbatan

samarasi yuqoridir. Uch fazali zanjir bo‘lganda aylanuvchi magnit maydonini hosil qilish osonroq; o‘zgaruvchan tokni o‘zgarmas tokka aylantirish (to‘g‘rilash)da ko‘p fazali tizimni qo‘llash kuchlanish puls-lanishini keskin kamaytiradi, shuning uchun to‘g‘rilagichlar texnikasida, aksariyat, na faqat uch fazali manbalar qo‘llaniladi, balki, olti-, ba’zida esa, o‘n ikki fazali tizimlar ishlatiladi.

Simmetrik ko‘p fazali zanjir (simmetrik generator-yuk)ni hisoblash uchun uning bir fazasini hisoblash kifoya yoki, boshqacha qilib aytganda, uni bir fazali hisoblashga keltirish mumkin. Nosimmetrik zanjirlarni esa bir necha manbali zanjir deb qarash mumkin, (ya’ni har bir fazasi alohida olinadi); bunday zanjirlarni xisoblashni yengillashtirish uchun ularni bir necha simmetrik rejimlar bilan almashtirishga (simmetrik tashkil etuvchilar usuli) olib kelish mumkin.

8.2. Uch fazali simmetrik generator

Uch fazali elektr mashinasi (generatori) bir fazalikdan faqat shu bilan farqlanadiki, uning statorida bir chulg‘am emas, balki uch chulg‘am mavjuddir (8.5,*a*-rasm). Chulg‘amlar (8.5.a-rasm) statorda shunday joylashtiriladiki, ularda induktivlanayotgan e.yu.k.larning fazalari biri biriga nisbatan 120^0 ga siljigan bo‘ladi. Magnit maydonini hosil qilish uchun silindrsimon ferromagnit statorning ichida silindrik rotor aylanadi. Uning magnit maydoni kuch chiziqlari stator o‘zagi orqali oqib o‘tib tutashadi (berk konturni hosil qiladi). Statorning ichki silindrik yuzasida pazlar (ariqchalar) mavjud bo‘lib, ularga stator chulg‘amlarining o‘tkazgichlari yotqiziladi. Rotor aylanganda ularda e.yu.k. hosil bo‘ladi.

Rotor magnit maydoni shakli sinusoidal bo‘lganda ko‘rilayotgan chulg‘am-ning *A*-*X* fazasidagi e.yu.k.ining oniy qiymati quyidagicha bo‘ladi;

$$e_A = E_m Sin\omega t, \qquad (8.3)$$

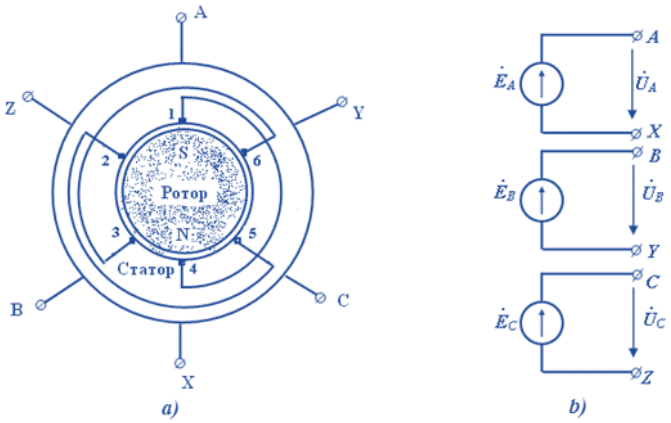
bunda $\omega = 2\pi / n -$ rotorning burchak tezligi; *n*-rotorning 1 sekunddagi aylanishlari soni.

Shunga o‘xshash *V* va *U* qutblari ta’siridagi *B*-*U* fazasi joylashgan o‘tkaz-

gichlarda xosil bo‘layotgan e.yu.k. ni aniqlash mumkin. Biroq, bu faza o‘tkazgich-lari *A-X* fazaga nisbatan fazoda 120^0ga surilganligi uchun uning e.yu.k.si xam $2\pi/3$ burchakka surilgan bo‘ladi

$$e_B = E_m Sin(\omega t - 2\pi/3). \qquad (8.4)$$

S-Z fazadagi e.yu.k.ni ham shunga o‘xshash aniqlash mumkin.



8.5-rasm. **Uch fazali elektr mashinasi**

$$e_C = E_m Sin(\omega t - 4\pi/3) = E_m Sin(\omega t - 240^0) = E_m Sin(\omega t + 120^0) \qquad (8.5)$$

Generatorning uchchala chulg‘amlari yoki uchchala fazalari e.yu.k larini kompleks shaklda quyidagicha yozish mumkin:

$$\dot{E}_A = \dot{E}, \quad \dot{E}_B = \dot{E}\cdot\alpha^{-1}; \quad \dot{E}_c = \dot{E}\cdot\alpha, \qquad (8.6)$$

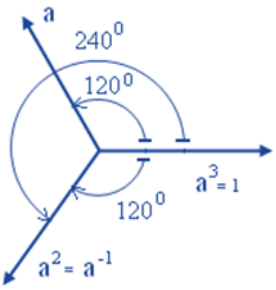
bunda uch fazali tizimning faza ko‘paytuvchisi quyidagiga teng:

$$\alpha = e^{j2\pi/3} = 1\angle 120^0 = -0{,}5 + j\sqrt{3}/2. \qquad (8.7)$$

Chulg‘amlarning qarshiliklaridagi ichki kuchlanishlar pasayuvini hisobga olmaslik mumkin bo‘lgan hollarda, generator qisqichlaridagi faza kuchlanishlarini faza e.yu.k.lariga teng deb olish mumkin;

$$\dot{U}_A \approx \dot{E}_A, \qquad \dot{U}_B \approx \dot{E}_B; \qquad \dot{U}_C \approx \dot{E}_C.$$

Haqiqiy generatorning tuzilishi yuqoridagi soddalashtirilgan generatorning tuzilishidan birmuncha murakkabdir, lekin ko‘rilgan fizik jarayonlar deyarli o‘zgarishsiz qoladi.



8.6-rasm. **Faza ko‘paytuvchisi**

Uch fazali tizimning faza ko‘paytuvchisi. Biror vektorni α ga ko‘paytirilsa, u $+120^0$ burchakka buriladi; shu vektor α^{-1} ga ko‘paytirilganda esa -120^0 ga, yoki $+240^0$ ga buriladi. Bundan tashqari, vektorni $+240^0$ ga burish uchun uni α^2 ga ko‘paytirish bilan xam amalga oshirish mumkin:

$$\alpha^2 = \alpha^{-1} = 1 \angle 240^0 = 1 \angle -120^0 = -0{,}5 - j\sqrt{3}/2. \qquad (8.8)$$

Demak, $\alpha^3=1$ ekan. Ushbu fikrlar 8.6-rasmda tasdiqlangan. Keltirilgan bog‘lanishlardan quyidagi sodda ifoda kelib chiqadi:

$$1+\alpha+\alpha^{2}=0 \qquad (8.9)$$

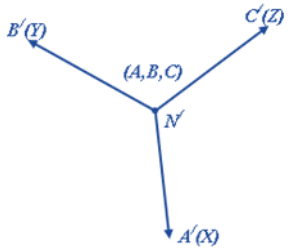
Generator chulg‘amlarini «yulduz» usulda ulash. 8.5,*a*-rasmda keltirilgan har bir faza chulg‘amlari juft qisqichlaridan bittadan, ya’ni *X, Y, Z* ketlarni birlashtirib umumiy nuqta-neytral *N* ga ulasak, *«yulduzcha»* ulangan chulg‘amli generatorni hosil qilamiz (8.3,*a* va 8.4-rasmlar).

Hosil bo‘lgan generatorning to‘rttala qisqichlariga to‘rtta o‘tkazgich ulanishi mumkin: uchta (*A, B, C*) faza va bitta neytral *N*; ular neytrali (nol liniyasi) bo‘lgan uch fazali liniyani tashkil etadilar. Fazalalararo kuchlanishlar yoki liniya kuchlanishlari qiymatlari faza (ixtiyoriy faza va neytral orasidagi) kuchlanishlari qiymatidan $\sqrt{3}$ marta katta.

8.5-rasmda keltirilgan chulg‘amlarni boshqacha usul bilan xam yulduz ulash mumkin. *A*, *B* va *C* qisqichlarni umumiy neytral N' ga ulab to‘rtta tashqi qisqich-lari *X, Y, Z* va N' bo‘lgan uch fazali generatorni hosil qilamiz. Bunda *X, Y* va *Z* nuqtalarni qayta belgilab (A', B', C') olish mumkin.

8.7-rasmda har bir faza va liniya kuchlanishlarini osonlik bilan aniqlash mumkin bo‘lgan topografik diagramma keltirilgan. Ushbu holatda, ilgari

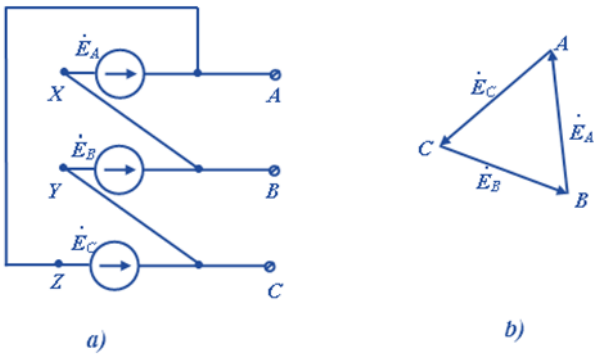
ko‘rilgan (8.3-rasm)ga nisbatan kuchlanishlar ishoralari bilan farqlanadilar.



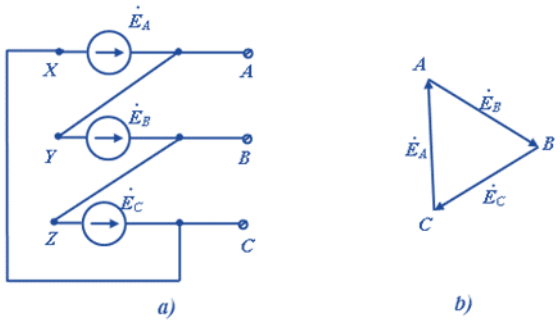
8.7-rasm. **Topografik diagramma**

Generator chulg‘amlarini “uchburchak” usulda ulash. Agar har bir faza chulg‘amining boshini keyingi fazaning keti bilan ulasak berk “uchburchak” hosil (8.8,a-rasm) qilamiz. Bunday ulash generatorning faza chulg‘amlari simmetrik bo‘lgan holat uchun mumkindir, chunki ketma-ket ulangan e.yu.k. ning yig‘indisi nolga teng (8.8,b-rasm):

$$\dot{E}_A+\dot{E}_B+\dot{E}_c=\dot{E}_a(1+a^{\,2}+a)=0 \qquad (8.10)$$



8.8-rasm. **Generator chulg‘amlarini chap “uchburchak” usulda ulash**



8.9-rasm. **Generator chulg‘amlarini o‘ng “uchburchak” usulda ulash**

Uchburchak usulda ulangan generatorning chiqish qismida faqat uchta qisqichlari (*A, V, S*) mavjuddir. Bunda liniya kuchlanishlari generatorning faza

kuchlanishlariga teng:

$$\dot{U}_{AB}=\dot{E}_A;\ \ \dot{U}_{BC}=\dot{E}_B;\ \ \dot{U}_{CA}=\dot{E}_c.$$

Chulg‘amlarni uchburchak usulda ulash uchun boshqa usuldan xam foydalanish mumkin (8.9,*a*-rasm). Bunda liniya kuchlanishi ilgarigi uchburchak ulanishdan fazasi bilan farqlanadi. 8.8-rasmdagi ulanishni, ba’zan-chap ulanishli, 8.9-rasmdagini – o‘ng ulanishli uchburchak usuli deyladi.

8.3. Simmetrik uch fazali zanjir

Yulduz-yulduz. “Yulduz” ulangan generatorning har bir fazasi va neytrali orasiga bir xil iste’molchi *Z* larni ulab simmetrik yuk ulashning eng sodda-lashtirilgan sxemasini hosil qilish mumkin. Bunday zanjir toklarning musbat deb tanlangan yo‘nalishlari bilan 8.10-rasmda keltirilgan. Bunda Z_L – liniya simlarini qarshiliklari qarshiliklari; *N* va *N’* – generator va yukning neytral nuqtalari; Z_n– neytrallarni birlashtiruvchi o‘tkazgichning qarshiligi.

Simmetriya shartiga ko‘ra generator faza chulg‘amlaridagi $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$, $\dot{I}_C$ toklar qiymatlari teng va

$$\dot{I}_B=\dot{I}_A a^2;\ \ \dot{I}_c=\dot{I}_A\cdot\alpha \qquad (8.11)$$

fazalari o‘zaro 120^0 ga siljigan deb tahmin qilish mumkin.

Neytral o‘tkazgichdagi tok $\dot{I}_N$ Kirxgofning birinchi qonuniga asosan uchala faza toklarining yig‘indisiga teng:

$$\dot{I}_N=\dot{I}_A+\dot{I}_B+\dot{I}_c\ . \qquad (8.12)$$

Oxirigi ikki ifodalarni taqqoslash natijasida shuni aniqlash mumkinki, simmetriyada neytral o‘tkazgichdagi tok nolga teng bo‘ladi:

$$\dot{I}_N=\dot{I}_A(1+\alpha^2+\alpha)=0,$$

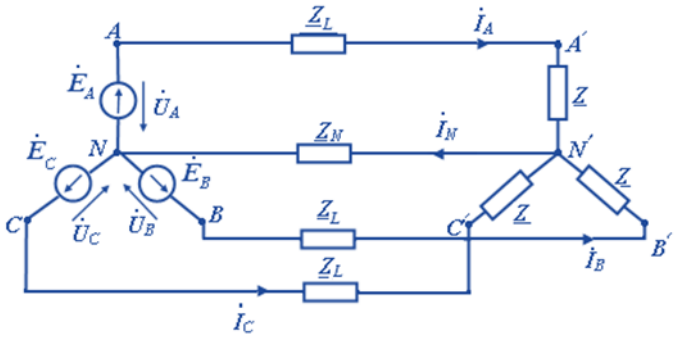
chunki (8.9)ga ko‘ra $1+\alpha+\alpha^2=0$. Agar shunday ekan (ya’ni $\dot{I}_N=0$), u holda *N* va *N’* nuqtalarning potensiallari mos keladi. Demak, generatorning to‘la faza kuchlanishi ketma-ket ulangan qarshiliklar Z_L va *Z* ga uzatiladi va Om qonuniga

binoan faza toklari quyidagicha aniqlanadi:

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{U}_A/(\underline{Z}_L + \underline{Z}); \\ \dot{I}_B &= \dot{U}_B/(\underline{Z}_L + \underline{Z}); \\ \dot{I}_c &= \dot{U}_c/(\underline{Z}_L + \underline{Z}), \end{aligned}\right\} \qquad (8.13)$$

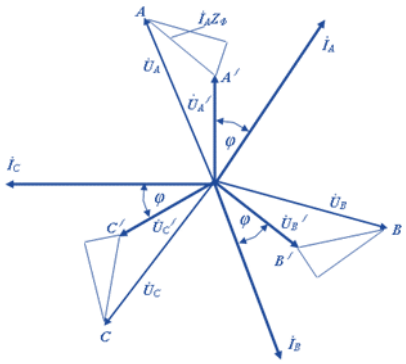
fazadagi kuchlanishlar esa quyidagiga aniqlanadi;

$$\dot{U}_A = \dot{I}_A \underline{Z}; \dot{U}_B = \dot{I}_B \underline{Z}; \dot{U}_c = \dot{I}_c \underline{Z} \qquad (8.14)$$



8.10-rasm. **Yulduz-yulduz ulash**

Shunday qilib, uch fazali simmetrik tizimlarda neytral o‘tkazgichning mav-judligi ortiqga ekan. Biroq, tok simmetriyasining buzilishi (masalan, fazalardan birida yukning uzilishi) natijasida tokning ayrim fazalaridagi toklarning qiymati tubdan farqlanishi mumkin. Neytral o‘tkazgich mavjudligi ayrim fazalardagi kuchlanishning uchala fazalardagi toklarning o‘zaro nisbatiga bog‘likligidan ma’lum darajada saqlaydi.



8.11-rasm. **Zanjirning topografik diagrammasi**

Ushbu tahlil qilingan zanjirning topografik diagrammasi 8.11-rasmda

keltirilgan. *A* va *A'*, *B* va *B'*, *C* va *C'* nuqtalarni tutashtiruvchi gipotenuzalarning uchburchaklari faza o‘tkazgichlaridagi kuchlanishlar pasayuvini tasvirlaydilar, masalan:

$$\dot{U}_A - \dot{U}'_A = \dot{I}_A Z_f = \dot{I}_A (r_f + jx_f).$$

Oddiy bir fazali zanjirlardagi kabi (5.72), faza kuchlanishning pasayuvi quyidagiga aniqlanadi:

$$U_A - U'_A \approx I_A (r_f \cos\varphi + x_f \sin\varphi) \qquad (8.16)$$

bunda φ - yuk qarshiligi (Z) ning faza burchagi; uning qiymati faza tokining faza kuchlanishidan kechikish burchagiga teng. Diagramma (8.11-rasm)da liniya kuchlanishlari vektorlari $\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{A'B'}$, $\dot{U}_{BC}$, $\cdots$ keltirilmagan; chunki generatorning liniya kuchlanishi $\dot{U}_{AB}$, V va A nuqtalarni birlashtiruvchi vektor bilan tasvirlanadi, iste’molchining liniya kuchlanishi $\dot{U}_{A'B'}$ B' va A' nuqtalarni birlashtiruvchi vektor bilan tasvirlanadi va h.k.

(8.16) bog‘lanish va topografik diagrammani solishtirish natijasida aniqlash mumkinki, liniya kuchlanishining pasayuvi quyidagiga teng bo‘ladi

$$U_{AB} - U_{A^1B^1} \approx \sqrt{3} I_A (r_f \cos\varphi + x_f \sin\varphi) \qquad (8.17)$$

Yulduz-Uchburchak. 8.12,*a*-rasmda chulg‘amlari “yulduz” shaklida ulangan generatorga “uchburchak” shaklida ulangan yukning ulanish sxemasi keltirilgan.

Tahlilning boshlanishida faza o‘tkazgichlarining qarshiliklarini (Z_f=0) hisob-ga olmaymiz. Ushbu vaziyatda uchburchakning xar bir tomoni kuchlanishlari faza kuchlanishlaridan $\sqrt{3}$ marta katta bo‘lgan fazalararo (liniya) kuchlanishlariga ulan-gan bo‘ladi. Shunga o‘xshash, uchburchakning tomonlaridan oqayotgan toklarning qiymatlari xam faza toklaridan $\sqrt{3}$ marta katta bo‘ladi:

$$\dot{I}_{AB} = \dot{U}_{AB} / \underline{Z}; \quad \dot{I}_{BC} = \dot{U}_{BC} / \underline{Z}; \quad \dot{I}_{CA} = \dot{U}_{CA} / \underline{Z}. \qquad (8.18)$$

Simmetrik tizimlarda ushbu toklar o‘zaro 120^0 ga (8.12,b-rasm) siljigan

bo‘lib, ular o‘zlarining kuchlanishlaridan φ burchakka kechikadilar.

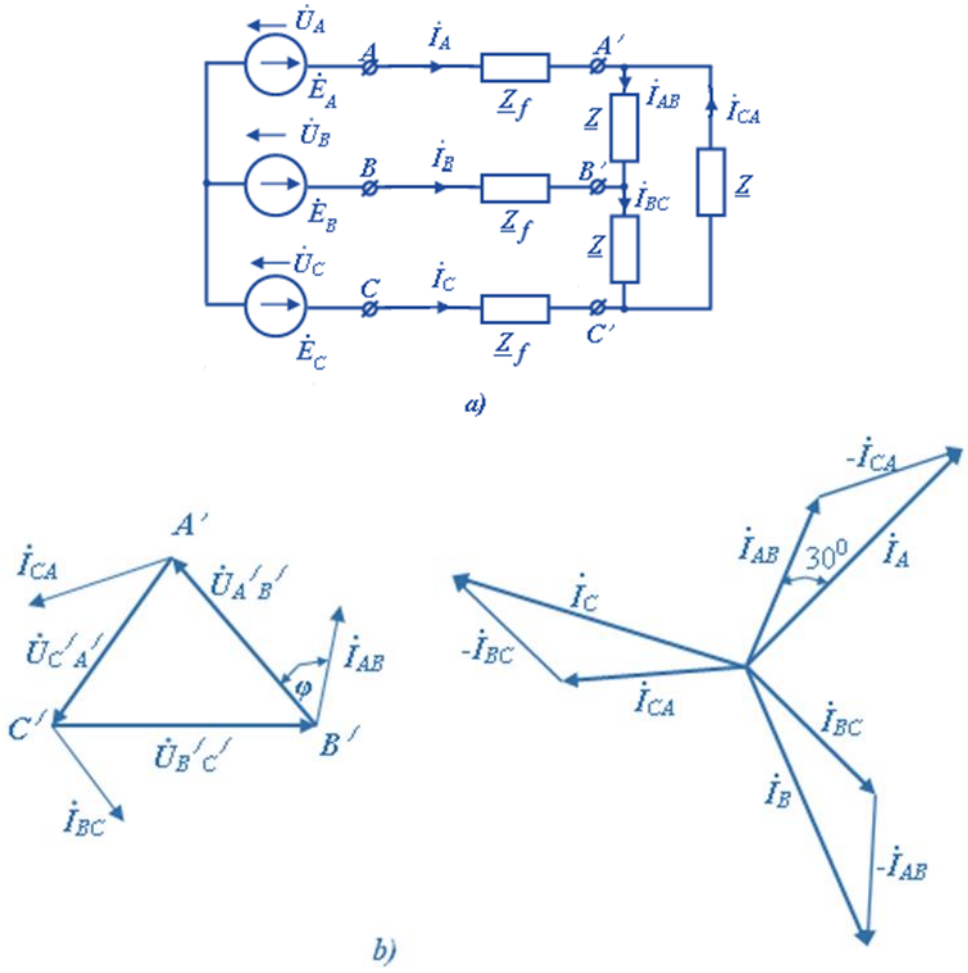
Faza o‘tkazgichlaridagi toklarning yoki liniyadagi toklarning qiymatlarini Kirxgofning birinchi qonuni asosida aniqlash mumkin:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA};\quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB};\qquad \dot{I}_c = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \tag{8.19}$$

Absolyut qiymatlari bo‘yicha liniya toklari uchburchak tomonlaridagi toklar-dan $\sqrt{3}$ marta katta. Liniya toklari generatorning “yulduz” ulangan chulg‘am-larining faza toklari bilan mos keladi.

“Yulduz”-“uchburchak” ulash tizimidan «yulduz» - «yulduz» ulash tizimiga o‘tish oson; buning uchun yukning “uchburchak” ulanishini ekvivalent “yulduz” ga aylantiriladi. Simmetrik uchburchak shoxobchalari qarshiligi Z_Δ dan ekvivalent yulduz shoxobchalarining Z_Y qarshilgi 3 marta kichikdir:

$$\underline{Z}_Y = \frac{1}{3}\underline{Z}_\Delta \tag{8.20}$$



8.12-rasm. **Yulduz-uchburchak ulanish**

Agar $\underline{Z}_f$ qarshilikning qiymatini e’tiborga olish zarur bo‘lsa, u xolda uning qiymatlarini ekvivalent yulduz qarshiliklariga qo‘yish kerak. Ushbu tahlillar 8.12,*b*-rasmda keltirilgan vektor diagrammasidan kelib chiqadi, yoki analitik ifodalar yordamida aniqlanishi mumkin.

8.1-misol. 8.1,*a*-rasmda keltirilgan zanjirda iste’molchi olayotgan quvvat *P*=30 kVt, *cosφ*=0,8 (*φ*>0).

Iste’molchining liniya kuchlanishi $U_{A^1B^1} = U_{B^1C^1} = U_{C^1A^1} = 380\ V$.

Har bir faza o‘tkazgichining qarshiligi $Z_f = 0{,}1 + j0{,}2\ \Omega$.

Generatorning kuchlanishi va istemolchini manba bilan ulaydigan o‘tkazgichlar qarshiliklari $\underline{Z}_f$ da isrof bo‘layotgan quvvat aniqlansin.

Yechish. Iste’molchining bir fazasidagi quvvat qiymati $S = 10 + j7{,}5\ kVA$. Demak, uchburchak tomonlarining qarshiliklari:

$$\underline{Z}_\Delta = U^2_{A^1B^1} / S^* = 11{,}5 \angle 36^0 50'\ \ \Omega .$$

Ekvivalent yulduz shohobchalarining qarshiliklari $\underline{Z}_人 = \underline{Z}_\Delta / 3$ ni $\dot{U}'_A = 380/\sqrt{3} = 219\ V$ bo‘lganda A faza o‘tkazgichlaridagi tokning qiymati

$$\dot{I}_A = \dot{U}_{A^1} / \underline{Z}_人 = 3\dot{U}'_A / \underline{Z}_\Delta = 57{,}2 \angle -36^0 50' A.$$

Generatorning faza kuchlanishi

$$U_A \approx U'_A + I_A(r_f \cos\varphi - x_f \sin\varphi) = 219 + 57{,}2(0{,}1 \cdot 0{,}8 + 0{,}2 \cdot 0{,}6) = 230\ V$$

Generatorning liniya (fazalararo) kuchlanishi

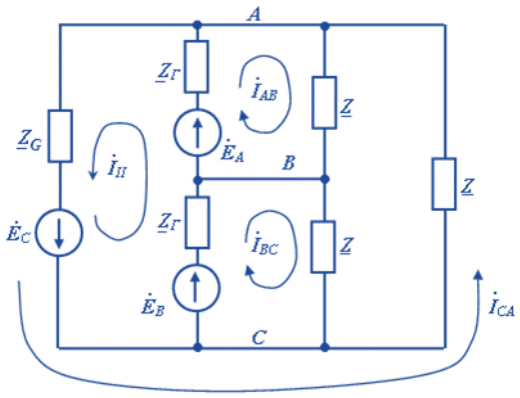
$$U_{AB} = \sqrt{3} U_A = 398 B.$$

Faza o‘tkazgichlarida yo‘qotilayotgan quvvat isrofi

$$\Delta P = 3 I_A^2 r_f = 980\ W.$$

«Uchburchak»-«uchburchak». Ko‘rilayotgan (8.13-rasmda) zanjirdagi generator va iste’molchi «uchburchak» ulangan hamda ularni ulaydigan o‘tkazgichlar qarshiligi ($Z_f = 0$) nolga teng bo‘lsin. Bunday holda iste’molchining uchburchagidagi toklarning qiymatlari berilgan (8.18) liniya kuchlanishlari yordamida aniqlanadi. Generator shohobchalaridagi toklar iste’molchining

parallel ulangan mazkur shohobchalaridagi toklarga teng; $\dot{I}_{AB}$ toki $\dot{E}_A$ e.yu.k.li shohobchaning tokiga teng; $\dot{I}_{BC}$ toki - $\dot{E}_B$ li shohobcha tokiga; $\dot{I}_{CA}$ toki esa e.yu.k $\dot{E}_C$ ga teng bo‘lgan shohobcha tokiga teng.



8.13-rasm. **Uchburchak -uchburchak ulanish**

Ushbu fikrlarni isbotlash uchun generatorning fazalari qarshiliklari Z_G ni e’tiborga olib tuzilgan kontur tenglamalariga murojat etish zarur.

Har xil sxemalarning ekvivalentligi. «Uchburchak» turdagi ulanishdan ekvivalent «yulduz» turiga o‘tish yoki «yulduz»dan ekvivalent «uchburchak»ka o‘tish, ixtiyoriy simmetrik zanjirni aksariyat, tahil qiiilish uchun qulay bo‘lgan oddiy «yulduz»-«yulduz» ulanishga o‘tkazishga imkon beradi; shunga o‘xshash ixtiyoriy zanjir ulanishini «uchburchak»-«uchburchak» ulashga o‘tkazish xam mumkin. Ayniqsa, yukning uchburchagi va generatorning orasida o‘tkazgichlar qarshiliklari (Z_f) mavjud bo‘lib ularni hisobga olish zarur bo‘lganda ekvivalent «yulduz» shohobchalariga ushbu qarshilik oddiy qo‘shilishini e’tiborga olsak, «uchburchak»ni ekvivalent «yulduz»ga o‘zgartirish qanchalar muhimligini ko‘rish mumkin.

8.4. Uch fazali simmetrik zanjirlar quvvati

Simmetrik yukning yulduz ulangan holatdagi bir faza quvvati quyidagicha aniqlanadi:

$$\tilde{S}_A = \dot{U}_A \overset{*}{\dot{I}}_A = U_A I_A (cos\varphi + jsin\varphi).$$

Uchala fazaning to‘liq iste’mol qiluvchi quvvati undan 3 marta kattadir;

$$\tilde{S} = P + jQ = 3S_A = 3U_A I_A(\cos\varphi + j\sin\varphi). \qquad (8.21)$$

Ushbu ifodalar simmetrik uch fazali tizimning ham aktiv, ham reaktiv quvvatlarini aniqlaydi. Yulduz ulanganda liniya toki I_L faza toki I_f ga teng; liniya kuchlanishi U_L esa faza kuchlanishi U_f dan $\sqrt{3}$ marta kattadir. Shuning uchun (8.21)dagi quvvat liniya kuchlanishi va toki orqali ifodalanishi mumkin;

$$\tilde{S} = \sqrt{3}U_L I_L(\cos\varphi + j\sin\varphi). \qquad (8.22)$$

Shunga e’tiborni kuchaytirish zarurki, tengliklardagi $\varphi = \angle\dot{U}_A, \dot{I}_A$ fazaning kuchlanishi va toki orasidagi faza siljish burchagidir.

Yukning simmetrik uchburchak bo‘lgandagi quvvatini hisoblash yo‘li ham ushbu (8.22) tenglikka olib keladi. Uchburchakning barcha shohobchalari iste’mol qilayotgan quvvati

$$\tilde{S} = 3\tilde{S}_{AB} = 3U_{AB} I_{AB}(\cos\varphi + j\sin\varphi). \qquad (8.23)$$

Bunday holatda liniya kuchlanishi U_L faza kuchlanishi U_f ga teng, liniya toki I_L esa uchburchakning ixtiyoriy tomoni faza toki I_{AB} dan $\sqrt{3}$ marta katta. (8.23) tenglikdagi faza kuchlanishlari va toklarini liniya kuchlanishi va toklariga almashtirsak avvalgi (8.22) tenglikni hosil qilamiz. Bu holda ham φ-faza toki va kuchlanishi (uchburchak shohobchalari) orasidagi faza siljish burchagidir.

Uch fazali simmetrik tizim *quvvatining oniy qiymati* o‘zgarmas bo‘ladi. Bunga iqror bo‘lish uchun uchala fazalar quvvatlarining oniy qiymatlarini qo‘shish yetarlidir. *Masalan*, yulduz ulanganda *A* fazasidagi kuchlanish $u_A = \sqrt{2}\cdot U_A Sin\omega t$ va tok $i_A = \sqrt{2}\cdot I_A Sin(\omega t - \varphi)$ bo‘lsa, shu fazaning oniy quvvati quyidagicha aniqlanadi:

$$p_A = u_A \cdot i_A = U_A I_A\left[\cos\varphi - \cos(2\omega t - \varphi)\right].$$

Biroq, *V* fazasidagi kuchlanish va tok *A* fazadagiga nisbatan $2\pi/3$ burchakka kechikadi, ya’ni $u_B = \sqrt{2}\cdot U_B \sin(\omega t - 2\pi/3)$ va $i_B = \sqrt{2} I_B \sin(\omega t - 2\pi/3 - \varphi)$ bo‘ladi. Shuning uchun

$$p_B = U_B I_B[\cos\varphi - \cos(2\omega t - \varphi - 4\pi/3)].$$

S fazasi uchun ham shunga o‘xshash aniqlanadi:

$$p_C = U_C I_C[\cos\varphi - \cos(2\omega t - \varphi + 4\pi/3)].$$

Simmetrik tizimning uchala fazalari quvvatlarining oniy qiymatlarini qo‘shib, ularning o‘zgaruvchan tashkil etuvchilarining yig‘indisi nolga teng ekanini ko‘ramiz, chunki

$$\cos\alpha + \cos(\alpha + 4\pi/3) + \cos(\alpha - 4\pi/3) = 0.$$

Cimmetrik tizimda (yulduz bo‘lganda)

$$U_A = U_B = U_c = U_L/\sqrt{3}\ ; \qquad I_A = I_B = I_C = I_L\ ; \qquad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi_f.$$

Shuning uchun aktiv quvvatning qiymati

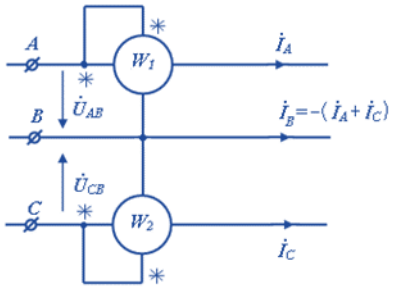
$$P_{人} = P_A + P_B + P_C = = 3\frac{U_{Л}}{\sqrt{3}} I_{Л} cos\varphi = 3U_f I_f cos\varphi$$

o‘rtacha yoki aktiv quvatga teng bo‘ladi;

$$p = P = \sqrt{3} U_L I_L Cos\varphi. \qquad (8.24)$$

Keltirib chiqarilgan natija shu bilan muximki, simmetrik tizimda generator-dan olinayotgan quvvat o‘zgamas ekan. Iste’molchining motorlaridagi aylantiruv-chi moment ham o‘zgarmas qiymatda bo‘lar ekan. Bir fazali generator bilan solishtirganimizda ular tafovuti oydinlashadi. Bir fazali generatordan olinayotgan quvvat esa pulslanuvchi edi.

Quvvatni o‘lchash. Generator va iste’molchini ulaydigan uch fazali *uch o‘tkazgichli* zanjirlarni, bitta umumiy o‘tkazgichi bo‘lgan ikkita ikki o‘tkazgichli zanjirlar deb ko‘rish mumkin. *Masalan*, 8.14-rasmdagi uch o‘tkazgichli zanjirni umumiy o‘tkazgichi *V* va toki $\dot{I}_B = -(\dot{I}_A + \dot{I}_c)$ bo‘lgan ikki *AV* va *SV* liniyalar deb qarash mumkin. Bunda birinchi liniyada kuchlanish $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$ bo‘lganda $\dot{I}_A$ toki, ikkinchi liniyada $\dot{U}_{CB} = \dot{U}_C - \dot{U}_B$ da $\dot{I}_C$ toki oqadi.



8.14-rasm. **Quvvatni o‘lchash**

Birinchi liniyadan uzatilayotgan quvvatning qiymati:

$$\tilde{S}_1 = \dot{U}_{AB}\overset{*}{I}_A, \tag{8.25}$$

ikkinchi liniyadan esa quyidagi quvvat uzatiladi:

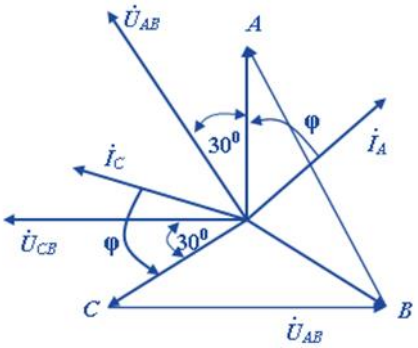
$$\tilde{S}_2 = \dot{U}_{CB}\cdot\overset{*}{I}_c. \tag{8.26}$$

Uchala liniyadan uzatilayotgan to‘la quvvat

$$\tilde{S} = \tilde{S}_1 + \tilde{S}_2 \tag{8.27}$$

Tahlil qilingan vaziyatdan shuni ko‘rish mumkinki, uchta o‘tkazgichli uch fazali uzatish tizimlarida uchchala fazadagi quvvatlarni ikki vattmetr yordamida o‘lchash mumkin ekan. Vattmetrlarning har bir ikki o‘tkazgichli ikki zanjirlardan birining quvvatini o‘lchaydi. Vattmetrlarning bunday ulanishi (Aron sxemasi) 8.14-rasmda keltirilgan.

Ushbu isbotda uch fazali tizimning simmetrikligi haqida hech qanday taxmin qililmadi, shuning uchun quvvatni ikki vattmetr yordamida o‘lchash taklif qilingan usulni uch fazali tizimning simmetrik yoki nosimmetrik bo‘lganida ham qo‘llash mumkin.



8.15-rasm. **Kuchlanish va toklarning vektor diagrammalari**

Yuqoridagi (8.14-rasm) zanjirning simmetrik holati uchun kuchlanish va toklarning vektor diagrammalari 8.15-rasmda keltirilgan. Qalinroq chiziqlar bilan vattmetrlarning tok va kuchlanishlari ifodalangan. Birinchi vattmetrning $\dot{I}_A$ toki faza kuchlanishi $\dot{U}_A$ dan φ (yukning xarakteriga bog‘liq bo‘lgan) burchakka kechikadi. Birinchi vattmetrga ulangan liniya kuchlanishi $\dot{U}_{AB}$ faza kuchlanishi U_A dan 30^0 ga burchakdan oldinda bo‘ladi. Shuning uchun W_1 vattmetrning kuchlanishi $\dot{U}_{AB}$ va toki $\dot{I}_A$ orasidagi burchak $\varphi+30^0$ ga teng bo‘ladi. Ikkinchi vattmetr W_2 dagi kuchlanish $\dot{U}_{CB}$ esa $\dot{I}_c$ tokni diagrammada ko‘rinishicha φ-30^0 burchakka o‘zib ketgan. Shuning uchun 8.14-rasmda keltirilgandek ulangan har bir vattmetrlarning ko‘rsatishi quyidagiga bo‘ladi:

$$P_1 = \mathrm{Re}(\dot{U}_{AB}\overset{*}{I}_A) = U_f I_f Cos(30^0 + \varphi);$$

$$P_2 = \mathrm{Re}(\dot{U}_{BC}\cdot\overset{*}{I}_c) = U_f I_f Cos(30^0 - \varphi).$$

Iste’molchi yuki faqat aktiv bo‘lsa ($\varphi = 0$), ikkala vattmetrning ko‘rsatishi bir xil bo‘ladi. Uzatilayotgan hamma aktiv quvvat ikki vatmetr ko‘rsatishining algebrin yig‘indisiga teng bo‘ladi. Keyingi tahlillar asosida ikki vattmetrning ko‘rsatishlari asosida φ burchagining qiymatini aniqlash mumkin:

$$tg\varphi = \sqrt{3}\frac{P_2 - P_1}{P_2 + P_1} \qquad (8.28)$$

Bu tenglikdan ikki vatmetr ko‘rsatishi bo‘yicha simmetrik tizimlarning reaktiv quvvatlarini xam aniqlash mumkin:

$$Q = P \cdot tg\varphi = \sqrt{3}(P_2 - P_1). \qquad (8.29)$$

8.5. Uch fazali liniyalarda energiya uzatish

Quyida $S = P + jQ$ quvvatni iste’molchiga uzatish zarur bo‘lgan (8.16-rasm) zanjirni ko‘raylik. Har bir faza o‘tkazgichining qarshiligi $\underline{Z}_f \approx r_f + jx_f$. Shu bilan birga liniya kuchlanishi ham mavjud bo‘lsin.

O‘tkazgichlardagi quvvat isrofi hamda kuchlanishlar pasayuvini aniqlash

uchun liniya tokini bilish zarur. Uni esa, yuk simmetrik bo‘lganda berilgan quvvat va liniya kuchlanishlari yordamida aniqlish mumkin. Bunda iste’molchining qanday ulanish usulining farqi yo‘q

$$P = \sqrt{3}UICos\varphi, \tag{8.30}$$

bu yerda U va I - liniya kuchlanishi va toki.

Kuchlanishlar pasayuvi quyidagi taqribiy ifoda yordamida aniqlanadi:

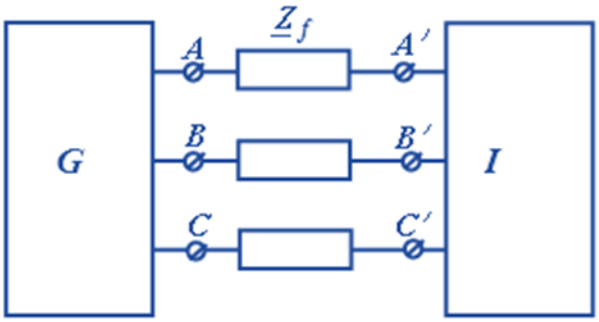
$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3}I(r_f Cos\varphi + x_f \cdot Sin\varphi)}{U} \cdot 100. \tag{8.31}$$

Hamma o‘tkazgichlarda ajralayotgan (isroflanayotgan) quvvatning qiymatini Joul-Leniya qonuni bo‘yicha aniqlanishi hammaga ma’lum:

$$\Delta P = 3I^2 r_f \tag{8.32}$$

Oxirgi tenglikka (8.30)dan tokni qo‘yib, quvvat isrofini aniqlash uchun ifodani hosil qilamiz:

$$\Delta P = \frac{P^2}{U^2 cos^2\varphi} \cdot r_f. \tag{8.33}$$



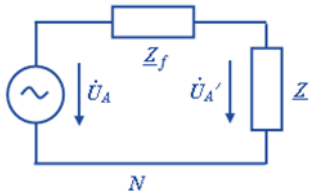
8.16-rasm. **Quvvatni iste’molchiga uzatish**

Natijada, uch fazali liniyalarning foydali ish koeffisentini aniqlash mumkin:

$$\eta_{3f} = \frac{P}{P + \Delta P} = \frac{1}{1 + \frac{P}{U^2 cos^2\varphi} r_f}. \tag{8.34}$$

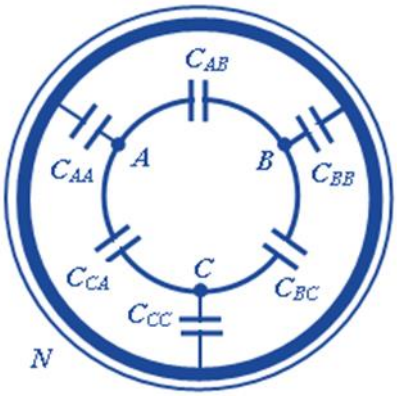
$cos\varphi$ ning ta’siri va uning qiymatini boshqarish (rostlash), berilgan kesim yuzali o‘tkazgichlarning joizli yuklanishi va boshqa shunga o‘xshash masalalar bir fazali tizimlardagi kabi hal qilinadi.

Bir fazani hisoblash. 8.16-rasmdagi zanjirlar tizimida ixtiyoriy vaziyatda, generatorni ham, iste'molchini ham yulduz ulangan deb hisoblash mumkin. Yuklanish simmetrik bo‘lganda esa ushbu yulduzlarning neytral nuqtalari (N va N') orasidagi potensiallar farqi nolga teng. Shuning uchun hisobni faqat, boshqa fazalar xolatidan qatiy nazar bir faza uchun olib borish mumkin. Boshqacha aytganda hisoblashni 8.17-rasmdagi zanjir uchun amalga oshiriladi.



9.17-rasm. **Bir fazani hisoblash**

Liniyalarni hisoblashda sig‘imni e'tiborga olish. Simmetrik uzun tarmoqlarni tahlil qilganimizda, ayniqsa, faza o‘tkazgichlari orasida katta sig‘imga ega bo‘lgan kabel tarmoqlarini ko‘rganda, bir fazaga keltirilgan parametirlar bilan hisob olib borish qulay.



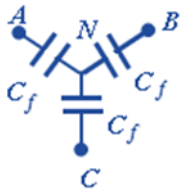
8.18-rasm. **Kabelning har bir faza o‘tkazgichlari.**

8.18-rasmda kabelning har bir faza o‘tkazgichlari C_{AB}, C_{BC} va C_{CA} orasida sig‘imlari hamda har bir faza o‘tkazgichining kabel qobig‘i orasidagi sig‘imlari sxematik ravishda ko‘rsatilgan. Ushbu sig‘imlar xususiy sig‘imlar deb ataladi. Simmetrik liniya (kabel) uchun

$$C_{AB} = C_{BC} = C_{CA} \quad \text{va} \quad C_{AA} = C_{BB} = C_{CC}..$$

Faza o‘tkazgichlari orasidagi C_{AB}, C_{BC}, C_{CA} sig‘imlar «uchburchak» ulanishini tashkil qiladilar; faza o‘tkazgichlari va qobiq orasidagi sig‘imlar – «yulduz». Simmetrik uchburchakni o‘zgartirib ekvivalent yulduz ulangan sig‘im-larni hosil qilamiz (8.19-rasm)

$$C_{\phi} = C_{AA} + 3C_{AB.} \qquad (8.35)$$



8.19-rasm. **Ekvivalent yulduz ulangan sig‘imlar**

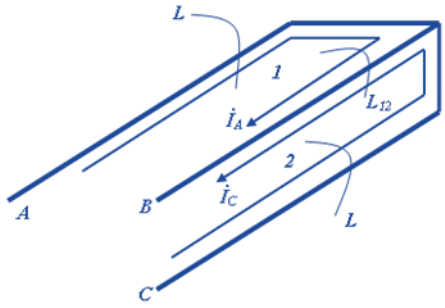
Ushbu tenglikdagi uch marta oshirilgan (ZC_{AB}) sig‘imlarga e’tiborni qaratib shuni ta’kidlash zarurki, simmetrik uch burchakdan ekvivalent yulduzga o‘tishda shoxobchalarning qarshiliklari uchburchak tomonlari qarshiliklariga nisbatan 3 marta kamaytirilishi zarur. Biroq qarshiliklarning kamayishi sig‘imlarning ortishi-ga olib keladi). Nisbatan uzun bo‘lmagan liniyalarni hisoblash jarayonidagi bir faza hisobiga o‘tishda barcha faza sig‘imlarini liniyaning uzunligi bo‘ylab taqsim-langan emas, balki liniyaning o‘rta uzunligida ulangan, yoki sig‘im C_f ning yarmisi liniyaning boshida, qolgan yarmi esa liniyaning oxirida ulangan deb faraz qilinadi.

8.6. Uch fazali liniya induktivligi

Umumiy holda, uch fazali liniya zanjiridagi induktiv bog‘langanlik mavjud-ligini isbotlash uchun ushbu uch o‘tkazgichli liniyani umumiy o‘tkazgichi bo‘lgan ikki sirtmoqdan iborat, deb hisoblamoq maqsadga muvofiqdir (8.20-rasm).

Bu holda, ikki sirtmoqdan har biri o‘zining xususiy induktivligi L_1 va L_2 ga ega bo‘lib, ikki sirtmoq orasida o‘zaro induktivlik $M = L_{12}$ (8.20-rasm) mavjud. Faraz qilaylik, A, B, C o‘tkazgichlari bo‘lgan uch fazali liniyada

quvvat isrofi mavjud emas (r_f) hamda o‘tkazgichning oxirida u qisqa tutashgan. AB va CB o‘tkazgichli ikki sirtmoq umumiy o‘tkazgich B ga ega.



8.20-rasm. **Ikki sirtmoq orasida o‘zaro induktivlik**

Ma’lumki, 1-sirtmoqning kirish qismidagi kuchlanish quyidagiga teng:

$$\dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{I}_A \cdot jx_1 + \dot{I}_C \cdot jx_{12} \qquad (8.36)$$

bunda $x_1 = \omega L_1,\ \ x_{12} = \omega L_{12}.$

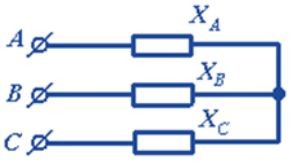
Shunga o‘xshash, sirtmoq 2 ning ham kirish kuchlanishi quyidagicha aniqlanadi:

$$\dot{U}_C - \dot{U}_B = \dot{I}_C \cdot jx_2 + \dot{I}_A \cdot jx_{21} \qquad (8.37)$$

bunda $x_2 = \omega L_2,\quad x_{21} = x_{12} = \omega L_{12}.$

Uch o‘tkazgichli tizim bo‘lganida $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, shuning uchun (8.36) tenglikda $\dot{I}_C$ ni $\dot{I}_A$ va $\dot{I}_B$ orqali ifodalansa, (8.37)da esa $\dot{I}_A$ ni $\dot{I}_B$ va $\dot{I}_C$ bilan ifodalansa, quyidagi tenglamalarni hosil qilamiz:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_A - \dot{U}_B &= \dot{I}_A\, j(x_1 - x_{12}) - \dot{I}_B\, jx_{12}; \\ \dot{U}_C - \dot{U}_B &= \dot{I}_C\, j(x_2 - x_{12}) - I_B jx_{12}. \end{aligned}\right\} \qquad (8.38)$$



8.21-rasm. **Ketma-ket ulangan reaktiv qarshiliklar**

Ushbu tengliklar shu bilan xususiyatlik ekanki, ular har bir *A, V, S*

o‘tkazgichlari 8.21-rasmda tasvir etilgandek faqat o‘zlarining ketma-ket ulangan reaktiv qarshiliklariga ega:

$$x_A = x_1 - x_{12};\ x_B = x_{12};\ x_C = x_2 - x_{12}. \qquad (8.39)$$

Bunday zanjirda qo‘shimcha induktiv bog‘lanishlar bo‘lmaydi. 8.21-rasmdagi ekvivalent sxema, har qanday vaziyatda ham, kirishdagi kuchlanishlar ($\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{BC}$, $\dot{U}_{CA}$) va toklar ($\dot{I}_A$, $\dot{I}_C$, $\dot{I}_B = -(\dot{I}_A + \dot{I}_C)$) orasidagi bog‘lanishni aniqlashga imkon beradi. Ammo, nosimmetrik tizim bo‘lganda 8.21-rasmdan foydalanib biror kirish qutblar (A,B,C) bilan zanjirning oxiridagi biror nuqta orasidagi kuchlanishni aniqlab bo‘lmaydi.

Simmetrik liniyada

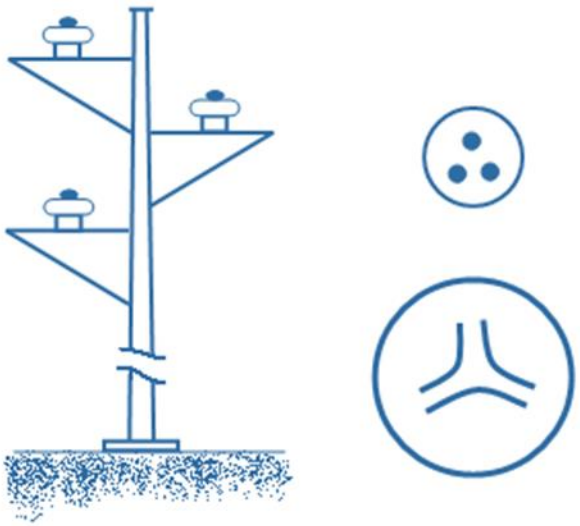
$$x_A = x_B = x_C \qquad (8.40)$$

Ushbu tenglik tizimning simmetrik ekanligi anglatadi. Agar shu tenglik bajarilmasa, u holda nosimmetrikdir.

(8.39) va (8.40) tengliklarni taqqoslash natijasida simmetrik liniyalar uchun juda muhim, biroq tez ilg‘ab bo‘lmaydigan tenglik kelib chiqadi.

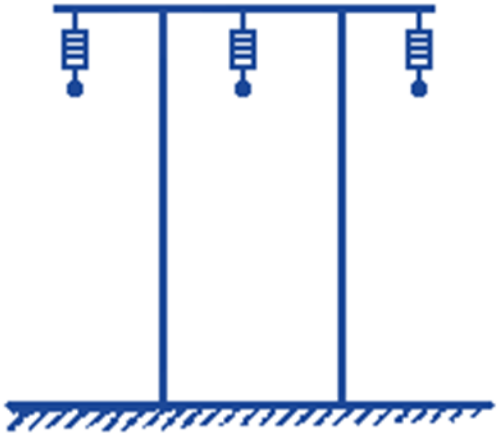
$$L = L_1 = L_2 = 2L_{12} = 2M \qquad (8.41)$$

Ixtiyoriy ikki o‘tkazgichli sirtmoqning *xususiy induktivligi* ixtiyoriy juft ikki o‘tkazgichli sirtmoq deb qabul qilingan simmetrik uch fazali tarmoqning o‘zaro induktivligidan *ikki marta kattadir*.



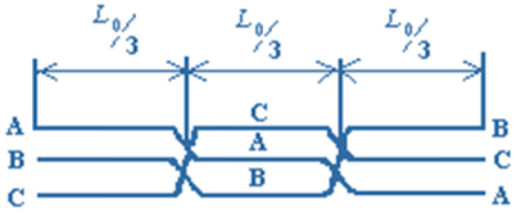
8.22-rasm. **Uch dumaloq tomirli o‘tkazgichi bo‘lgan uch fazali simmetrik kabel**

Ucho‘tkazchigli liniyaning simmetriyasi ushbu o‘tkazchichlarni o‘ziga yarasha simmetrik joylashtirish yo‘li bilan amalga oshiriladi. 8.22-rasmda uch dumalok tomirli o‘tkazgichi bo‘lgan uch fazali simmetrik kabel, simmetrik uch o‘tkazgichli liniya (zaminning o‘tkazgicha nisbatan har xil ta’sirlarini e’tiborga olmasak, u simmetrikdir) va o‘nminglab amper tok qiymatiga mo‘ljallangan shina o‘tkazchigi (unda ma’lum shaklda egilgan mis shinalari aylana qobiqqa joylashtirilgan) keltirilgan.



8.23-rasm. **Nosimmetrik uch fazali havo liniyasi**

8.23-rasmda nosimmetrik uch fazali havo liniyasi ko‘rsatilgan. U simmetrik holatga transpozisiya (o‘rin almashtirish) yo‘li bilan (8.24-rasm) keltirilishi mumkin. Liniyaning l_0 qismida har bir o‘tkazgich galma-galdan bir-biriga nisbatan uch har xil holatda joylashadi.

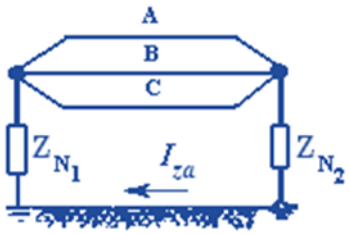


8.24-rasm. **Simmetrik holatga transpozisiya qilish**

Agar tok zamin orqali oqib o‘tsa (8.25-rasm) hamda uchchala *A, V, S* o‘tkazgichlardagi toklar nolga teng bo‘lmasa, vaziyat murakkabrok kechadi;

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \qquad (8.42)$$

Ushbu tok o‘zining oqib o‘chish yo‘lida ikki neytral $\dot{Z}_{N1}$ va $\dot{Z}_{N2}$ zaminlash zanjiridagi qarshiliklarni uchratadi. Bundan tashqari bu tok “uch o‘tkazgich-zamin” sirtmog‘ida kuchlanish pasayuvini xosil qiladi. Uchchala o‘tkazgichlar bir xil bo‘lganda uchchala parallel o‘tkazgichlardagi tok uchratayotgan aktiv qarshilik $r_0/3$ ga teng bo‘ladi, bunda r_0 - uchchala o‘tkazgichdan birining aktiv qarshiligi.



8.25-rasm. **Tok zamin orqali oqib o‘tishi**

Tokning zamin qa’ridan oqishida ham aktiv qarshilikka uchraydi. Uning qiymati tuproqning solishtirma o‘tkazuvganligiga deyarli bog‘liq emas va chastota 50 Gs bo‘lganida 0,05 Om/km ni tashkil etadi. Tuproqning solishtirma o‘tkazuv-chanligiga bog‘liq bo‘lmaslik quyidagicha tushintiriladi - tuproqning o‘tkazuv-ganligi ortsa, tok zaminga chuqur singmaydi, balki yer yuzida kichik kesimdan o‘tadi (elektromagnit maydoni nazariyasiga qarang). Sirtmoq o‘tkazgichlarining reaktiv qarshiligi qiyidagiga yoziladi:

$$x_{zo'} = 0{,}388 \ln(D / a_{o'}),$$

bunda $a_{o'}$-o‘tkazgich radiusi; D-tuproqning solishtirma qarshiligi (ρ) ga bog‘liq bo‘lgan shartli ekvivalent o‘tkazgichning joylashish chukurligi. O‘rtacha namlik-dagi tuproq uchun ($\rho = 10^2$Om.m) chuqurlik D=940 m; toshsimon tuproq uchun ($\rho = 10^4$Om.m) chuqurlik D=9,4 km.

Demak, 8.25-rasmda tasvirlangan sirtmoqdagi I_Z tok uchun to‘liq kuchlanish pasayuvi quyidagicha aniqlanadi:

$$\dot{U} = \{\underline{Z}_{N1} + \underline{Z}_{N2} + [r_0 / 3 + 0{,}05 + \mathrm{j}0{,}338 \ln(D / a_{ý})]l\}\dot{I}_3, \qquad (8.43)$$

bunda l-liniyaning uzunligi kilometrda.

Zamin toki I_Z ning yo‘qligida x va r larning qiymatlariga zaminning

ta’siri e’tiborga olinmaydi.

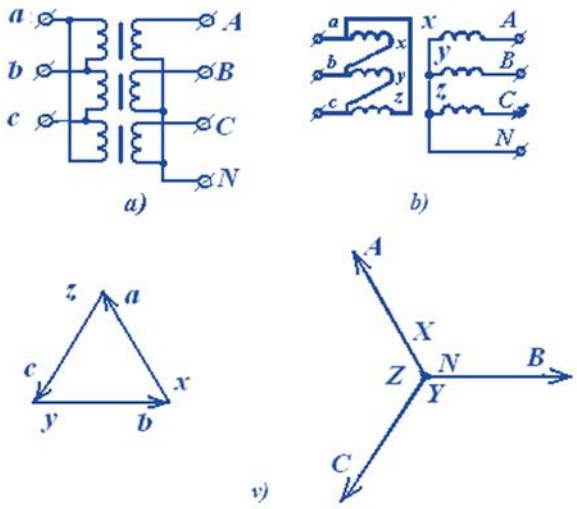
8.7. Uch fazali transformator

Uch fazali tizimlarning kuchlanishlarini uchta bir xil bir fazali transformatorlar yordamida o‘zgartirish (transformasiyalash) mumkin. Ularning chulg‘amlari yulduz yoki uch burchak usulda ulanadi. Aksariyat, uchraydigan ulanishlar – quyi kuchlanish tomonida uchburchak va yuqori kuchlanish tomonida yulduz. Transfor-matorlarning bunday ulanishi 8.26-rasmda tasvirlangan. 8.26,*a*-rasmda sxematik ravishda transformator magnit o‘zagi va chulg‘amlari, 8.26,*b*-rasmda esa chul-g‘amlarning ulanish sxemalari keltirilgan. Bunda bir faza chulg‘amining «boshi» va «keti» a, x va A, X; ikkinchi fazaniki – b, y va B, Y; uchinchi fazani c, z va C, Z qilib belgilangan; kichik xarflar – quyi kuchlanishli chulg‘amlarga, bosh xarflar – yuqori kuchlanishli chulg‘amlarga taaluqlidir. Chulg‘amlarning ulanish usuliga bog‘liq ravishda faza va liniya kuchlanishlarining u yoki bu joylanishlari xosil qilinadi. 8.26,*v*-rasmda chulg‘amlarning 8.26,*b*-rasmda keltirilgn ulanishlari uchun vektorlarning joylashganligi ko‘rsatilgan.

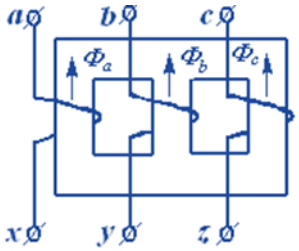
Uch fazali tizimlarda bir fazali transformatorlar qo‘llanilsa ham (asosan yuqori quvvatlar va yuqori kuchlanishlarda), uch fazali transformatorlar kengroq tarqalgan. Soddalashtirilgan holatda bunday transformatorning magnit o‘zagining yuqori va past qismlarida ko‘ndalang ferromagnit o‘zak bilan tutashtirilgan uchta ferromagnit serjendan iborat. Har bir fazaga bir sterjen mos keladi (8.27-rasm). Sterjenlardagi magnit oqimlari mazkur faza kuchlanishlari bilan oddiy ifodalar bilan bog‘langan

$$\dot{U}_{ax} = j\omega N\dot{\Phi}_a;\ \ \dot{U}_{by} = j\omega N\dot{\Phi}_b;$$

$$\dot{U}_{cz} = j\omega N\dot{\Phi}_c\,. \qquad (8.44)$$



8.26-rasm. **Uchta bir xil bir fazali transformatorlar**



8.27-rasm. **Transformatorning magnit o‘zagi**

Ushbu tenglamalarni keltirishda ko‘rgazmali bo‘lishi uchun induksiyalangan e.yu.k.lar kuchlanishlarga tenglashtirilgan, chulg‘am bilan ilashgan magnit oqimining hammasi sterjendagi oqim sifatida ko‘rsatilgan.

Uchala faza kuchlanishlarining yig‘indisi nolga teng bo‘lsa,

$$\dot{U}_{AX}+\dot{U}_{by}+\dot{U}_{cz}=0, \tag{8.45}$$

u holda sterjen oqimlari yig‘indisi ham nolga teng bo‘ladi

$$\dot{\Phi}_A+\dot{\Phi}_B+\dot{\Phi}_c=0, \tag{8.46}$$

demak, har bir sterjenning magnit oqimi qolgan ikki sterjenlar orqali tutashar ekan, masalan

$$\dot{\Phi}_A=-\dot{\Phi}_B-\dot{\Phi}_c.$$

Chulg‘amlar uchburchak shaklda ulanganda (8.45) shart so‘zsiz bajarilishi lozim. Bu shart chulg‘amlar neytral o‘tkazgichsiz yulduz ulaganda ham bajarilishi lozim. Transformatorning ikkilamgi chulg‘amlari birlamchi

chulg‘amga bog‘liq bo‘lmagan holda ulanadi. Transformatorlarning bundan mufassal tahlili darslik chegarasidan chiqadi.

8.8. Aylanuvchi magnit maydon, asinxron va sinxron motorlar

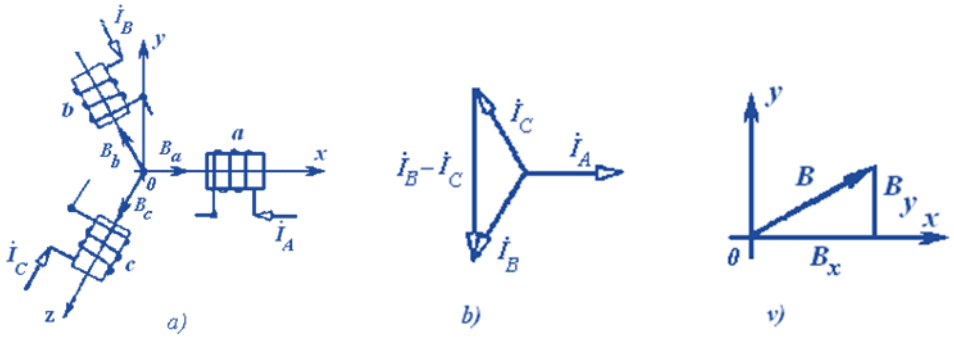
O‘qlari umumiy markaz (0) dan o‘tgan (8.28,a-rasm) va biri-biridan 120^0 ga siljitilgan uchta g‘altakni ko‘rib chiqaylik. Bunda birinchi *a* g‘altakdan *A* faza toki, ya’ni $i_a = I_m \sin\omega t,$ ikkinchisi *b* dan *V* faza toki $i_b = I_m \sin(\omega t - 120^0)$ va uchinchi *s* orqali *S* faza toki $i_c = I_m \sin(\omega t + 120^0)$ oqadi. Har bir g‘altak o‘z o‘qi yo‘nalishida o‘zining magnit maydonini tashkil etuvchisini hosil qiladi. Uning induksiyasi tokka priporsional

$$B = ki \qquad (8.47)$$

va u ham g‘altak (8.28,*a*-rasmda) o‘qi bo‘ylab (V_a, V_v va V_s vektorlari) yo‘naladi.

Koordinata o‘qlari *x* va *u* ni shunday o‘tkazaylikki, unda *x* o‘qi *a* g‘altakning o‘qi bilan mos kelsin. Shubhasiz, to‘la magnit induksiyasining *x* o‘qi bo‘ylab tashkil etuvchisi barcha uchta g‘altaklarning ushbu o‘q bo‘ylab tashkil etuvchi-larining yig‘indisiga teng:

$$B_x = B_{xa} + B_{xb} + B_{xc}. \qquad (8.48)$$



8.28-rasm. **O‘qlari umumiy markazli uchta g‘altak**

Shunga o‘xshash, *y* o‘qi bo‘ylab tashkil etuvchilar

$$B_y = B_{ya} + B_{yb} + B_{yc}. \qquad (8.49)$$

G‘altaklarning geometrik joylashganligidan quyidagilarni aniqlash mumkin:

$$B_{xa} = ki_a; \;\; B_{ya} = 0;$$

$$B_{xb} = -k i_b \cdot cos60^0; \;\; B_{yb} = k i_b \cdot cos30^0;$$

$$B_{xc} = -k i_c Cos60^0; \;\; B_{yc} = -k i_c Cos30^0.$$

Bu holatda

$$B_x = k[i_a - (i_b + i_c)cos60^0] = k i_a (1 + \cos 60^0) = \frac{3}{2} k I_m \sin\omega t, \qquad (8.50)$$

bu yerda $i_b + i_c = -i_a$ ekanligi e'tiborga olingan.

Endi induksiya vektorining ikkinchi tashkil etuvchisini aniqlaymiz:

$$B_y = k(i_b - i_c)\cos 30^0.$$

Toklarning vektor diagrammalaridan (8.28,*b*-rasm)

$$\dot{I}_b - \dot{I}_c = -j\sqrt{3}\dot{I}_a \quad \text{yoki} \quad i_b - i_c = \sqrt{3} I_m \sin(\omega t - 90^0)$$

ekanligi ko‘rinadi. U holda

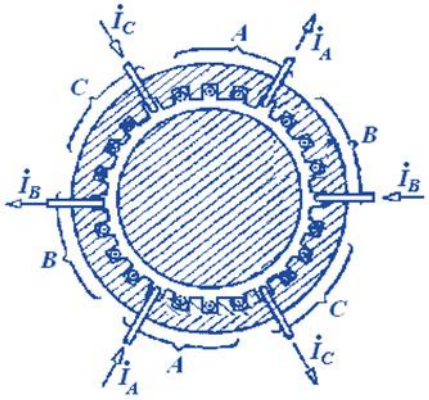
$$B_y = k\sqrt{3} I_m \cos 30^0 \sin(\omega t - 90^0) = \frac{3}{2} k I_m \sin(\omega t - 90^0). \qquad (8.51)$$

Hosil qilingan (8.50) va (8.51) bog‘lanishlardan ko‘rinadiki, magnit induk-siyasining vektori o‘z absolyut qiymatini o‘rgartirmaydi

$$B = \frac{3}{2} k I_m \qquad (8.52)$$

va fazoda ω tezlik bilan aylanadi. Ushbu fikrlar 8.28,*v*-rasmda keltirilgan, chunki magnit induksiyasi vektorining qiymati quyidagi umumlashtirilgan tenglikdan aniqlandi

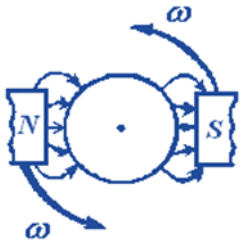
$$B = e_x B_x + e_y B_y = \frac{3}{2} k I_m \left[e_x sin\omega t + e_y \sin(\omega t - 90^0) \right].$$



8.29-rasm. **Silindrik o‘zak pazlari**

Agar chulg‘amlar geometrik joylashganligini o‘zgartirmay qoldirib, ikki chulg‘amlardagi toklarning fazasini almashtirsak, masalan *b* chulg‘amiga *S* faza toki ulansa va *s* chulg‘amga esa *V* faza tokini ulansa, u xolda magnit maydon aylanish yo‘nalishi teskari tomonga o‘zgaradi.

Agar uchchala g‘altakning o‘ramlarini ichi bo‘sh ferromagnit silindrik o‘zak pazlariga joylashtirib, uning ichki silindrik bo‘shlig‘iga silindrik ferromagnitni kiritsak (8.29-rasm), hosil bo‘lgan tizimda ham aylanuvchi magnit maydoni hosil bo‘ladi. Bu magnit maydoni kuchaytirilgan bo‘ladi, chunki u magnit maydoni oqib o‘tish yo‘lining ko‘p qismi magnit singdiruvganligi katta bo‘lgan materialga to‘g‘ri keladi. Ichki silindr hamda havo oralig‘idagi magnit maydoni $N-S$ magnitlar-ning hosil qilayotgan maydoniga o‘xshash bo‘lib, ω tezlik bilan aylanadi (8.30-rasm).



8.30-rasm. **Silindr hamda havo oralig‘idagi magnit maydon**

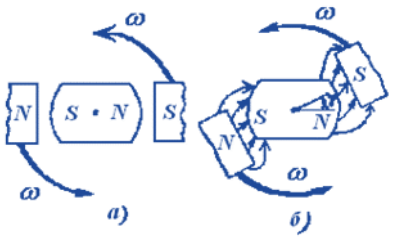
Asinxron motorning ishlash prinsipi. Yuqorida keltirilgan 8.29-rasmni asinxron motorining sxematik tasviri deb hisoblash mumkin. Tashqi qo‘zg‘olmas halqa-stator, uning chulg‘amlari aylanuvchi maydonni hosil qiladi. Aylanuvchi magnit maydoniga ergashuvchi ichki silindr-rotor. Ushbu asinxrom motori tuzilishi, ishlab chiqarilishi va ekspluatasiyasining juda sodda ekanligi, aynan shu xossalari, uch fazali tizimlarning keng tarqalishiga sabab bo‘lgan motordir.

Mashhur fransuz olimi Arago o‘tkazgan tajribaga ko‘ra, 8.30-rasmda keltirilgan $N-S$ magnit qutublari aylantirilsa, u holda qutblar orasiga joylashtiril-gan rotor (silindr yoki disk) ham unga ergashib aylanishiga ishonish mumkin. Bu hodisa shunday tushintiriladi: magnit maydoni ω_C tezlik bilan aylantirilganda o‘tkazuvchan rotorda uyurma toklar hosil bo‘ladi; bu toklar

magnit maydoni bilan o‘zaro tavsiri natijasida, ular rotorni ω_p tezlik bilan aylanishga yoki aylanuvchi magnit maydoniga ergashga olib keladi. Ular tezliklarining farqi $S = \omega_{CT} - \omega_{POT}$ sirpanish deyiladi.

Agar rotor stator bilan bir xil tezlikda aylansa (S=0) rotorda hech qanday tok hosil bo‘lmaydi, chunki bunda magnit maydon va rotor bir biriga nisbatan qo‘zg‘olmas bo‘ladi.

Sinxron motorning ishlash prinsipi. 8.29 va 8.30-rasmlarda keltirilgan tizimlardan sinxron motorning farqi, uning rotori tuzilishidadir. Sinxron mashina-ning rotori $N-S$ qutublari mavjudligi bilan farqlanadi. Bu qutblar o‘zgarmas magnit (kichik quvvatli mashinalarda) yoki elektromagnit shaklida bajarilishi mumkin. Elektromagnitli bo‘lganda, halqa-shchetka tizimi orqali o‘zgarmas tok manbaiga ulanadigan rotor chulg‘ami mavjud.



8.31-rasm. **Mashinaning rotori**

Sinxron motori ishlashini tushuntirish uchun aylanuvchi magnit maydonini aylanayotgan magnitlarning maydoni sifatida tassavur qilaylik. Mashinaning rotori ham magnit qutblari sifatida tasvirlanishi mumkin (8.31,*a*-rasm). Tashqi maydon (stator maydoni) o‘qi rotor magnit maydoni o‘qi bilan mos kelganda, rotor hech qanday aylantiruvchi moment ta’sirini sezmaydi. Agar magnit maydonlarning o‘qlari mos kelmasa (brortasi γ burchakka surilgan bo‘lsa), u holda rotorga aylantiruvchi moment ta’sir etadi: u maydon o‘qlarni mos holiga keltirishga intiladi va rotorni eng qisqa yo‘l bilan burishga intiladi. Kuloning magnit qonuni (har xil kutblar, tortilishi) va Faradey qoidasini magnit maydoni tasviriga tatbiq etish asosida tushuntirilishi mumkin. Sxematik tasviri 8.31,*b*-rasmda keltirilgan: magnit kuch chiziqlarining uzunliklari qiskarishga intiladi (ularni tarqoq va tarang tartilgan iplarga qiyos qilish mumkin).

Bu motorlarning aylanish yo‘nalishi stator chulg‘amlarini ta’minlayotgan manba fazalari ketma-ketligigi bog‘lik.

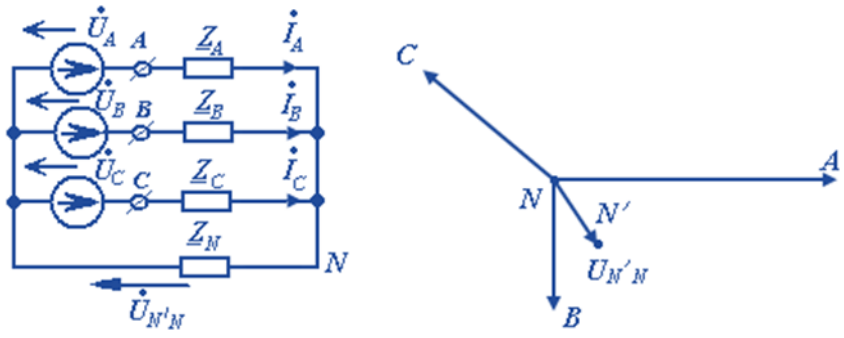
8.9. Statik yuklangan uch fazali nosimmetrik zanjir

Nosimmetrik yuk va nosimmetrik manba bo‘lgandagi uchfazali zanjirlarni tahlil qilganda ularni birnechta manbai bo‘lgan tarqoq zanjir deb qarab, ularga hisoblashning umumiy usullarini qo‘llash mumkin. Ushbu tasdiqni aylanuvchi mashinasi bo‘lgan zanjirlarga tatbiq etib bo‘lmaydi. Chunki ularning ekvivalent qarshiliklari berilgan kuchlanishning nosimmetriya darajasiga bog‘liq.

Ba’zi holatlarda uch fazali transformatori bo‘lgan zanjirlarga xam tatbiq etilishi mumkin emas. Ushbu masala nosimmetrik tizimlarni hisoblashning maxsus usullari (§8.10) bo‘limida kengroq ko‘riladi.

Bunda biz generatorning berilgan kuchlanishida (uning ichki qarshiligini hisobga olmay) statik yuklari bo‘lgan (aylanuvchi mashinasiz) zanjirlarni ko‘rish bilan cheklanamiz. Nosimmetrik uch fazali tizimlarning ba’zi xarakterli misollarini ko‘ramiz.

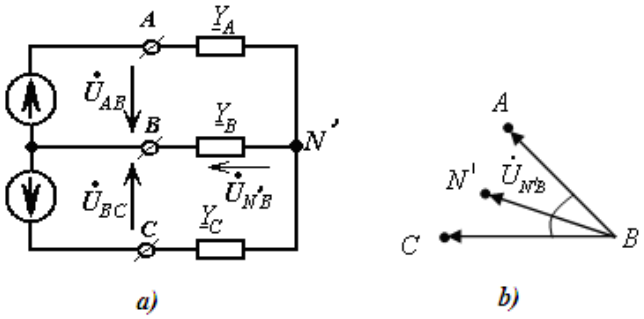
Yulduz-yulduz. Ushbu zanjirlarni (8.32-rasm) faza kuchlanish $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$ larning ixtiyoriy qiymatlarida, yuk yulduzi shohobchalari $\underline{Z}_A$, $\underline{Z}_B$, $\underline{Z}_C$ va neytral o‘tkazgich $\underline{Z}_N$ qarshiliklarining ixtiyoriy qiymatlarida ikki tugunli zanjir sifatida hisoblash maqsadga muvofiqdir. Bunda, birinchi galda, neytralning siljishini ikki tugun zanjiri bog‘lanishi (3.73) dan aniqlash zarur:



8.32-rasm. **Yulduz-yulduz ulanish**

$$\dot{U}_{N'N} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}. \qquad (8.54)$$

Bu kuchlanish ma’lum bo‘lsa, topografik diagrammada (8.33,*b*-rasm) N' nuqtaning joylanganligini aniqlash oson. Hisoblashning keyingi tartibi aniq. Oxirgi tenglikdan foydalanib, faqat *V* shohobchadagi qarshilik o‘zgargandagi $\dot{U}_{N^1B}$ vektorning geometrik o‘rnini aniqlash oson. Aytaylik, $y_B = \text{var}$ da hamda $\varphi_B = const$ bo‘lgandagi faza o‘tkazuvganligi $\underline{Y}_B = y_B \angle -\varphi$ bo‘lsin.



8.33-rasm. **Yulduz-yulduz ulanish va topografik diagramma**

Unda $\dot{U}_{N^1B}$ uchun aylana diagrammasining tenglamasini xosil qilamiz:

$$\dot{U}_{N^1B} = \frac{C}{1 + x\angle -\delta}, \qquad (8.55)$$

bunda $C = (\dot{U}_{AB} \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_{CA} \underline{Y}_c)/(\underline{Y}_A + \underline{Y}_C)$ va $x = y_B / |(\underline{Y}_A + \underline{Y}_C)|$.

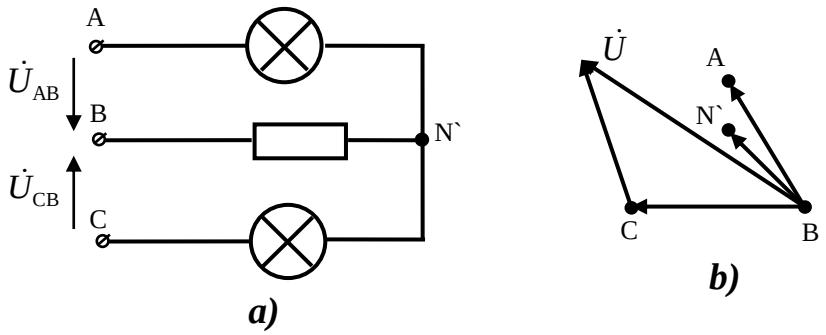
Burchak $\delta = const$ ning qiymatini ham aniqlash mumkin.

Fazalar ketma-ketligini aniqlash uchun zanjir. Fazalardan biriga, masalan *V* fazasiga, sof reaktiv element (sig‘im yoki induktivlik) ulab, qolgan ikki fazaga bir xildagi qizish lampasini (8.34 a-rasm) ulanadi. Nosimmetriya natijasida neytral nuqta *N* ning siljishi sababli ikki lampadan birining yoruqligi katta, ikkinchisi esa sust bo‘ladi. Agar *V* fazaga kondensator ulangan bo‘lsa, u holda yorug‘ligi ko‘p lampa *S* kechikuvchi fazada bo‘ladi.

Darhaqiqat, (8.54) tenglikka ko‘ra

$$\dot{U}_{N^1B} = \dot{U} \frac{d}{2g + j\omega C},$$

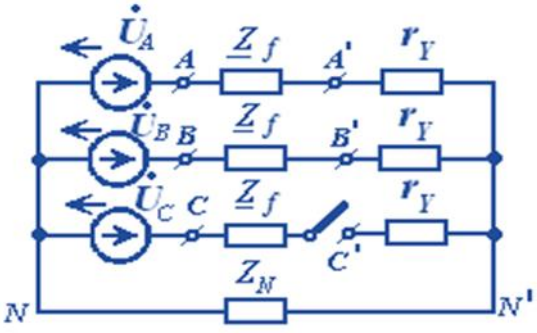
bunda $\dot{U} = \dot{U}_{AB} + \dot{U}_{CB}$ (8.34,*b*-rasm); $g = 1/r$.



8.34-rasm. **Fazalar ketma-ketligini aniqlash**

Agar *V* fazada induktivlik ulangan bo‘lsa, u holda *A* o‘zuvchi fazada yorug‘lik ko‘p lampa bo‘ladi.

8.2-misol. Faza o‘tkazgichlari qarshiliklari $Z_f = r_f = 0{,}051$ Om va to‘rtinchi neytral sim qarshiligi $Z_N = r_N = 0{,}14$ Om bo‘lgan kabel (sim kesim yuzasi 35 mm^2, uzunligi 100 m) liniyasi orqali xar birining quvvati 10 kVt, kuchlanishi 127 V bo‘lgan va har biri faza va neytralga ulangan uch guruh yuk ta’minlanadi. Kabelning kirish qismidagi kuchlanish $U_f = 130B.$



8.35-rasm. **Nosimmetriya hosil etish**

Har bir yuk guruhining karshiliklari $r_H = 1{,}61$Om ga teng va kuchlanishga bog‘liq bo‘lmasa, quyidagi shartlarda kabel chiqishidagi $\dot{U}_f'$ faza kuchlanishini aniqlang: 1) normal yuklanish bo‘laganda va 2) bir guruh lampalarni o‘chirib (tok faqat ikki fazada mavjud) (8.35-rasmga qarang).

Yechish: 1) Normal yuklanish bo‘lganda (hamma fazalarida yuk simmetrik ulanganda) $U_{N^1N} = 0$ bo‘ladi, shuning uchun $I = U_f / (r_f + r_Y)$ va

$U'_{\Phi} = Ir_H = 126B.$

2) Bir faza uzilganda, 8.35-rasmdagi zanjir hisoblanadi. Uning uchun

$$\dot{U}_{N^1N} = \dot{U}_A Y_A \frac{1+a^{-1}}{2\underline{Y}_A + \underline{Y}_N} = 4{,}66 - j8{,}12B,$$

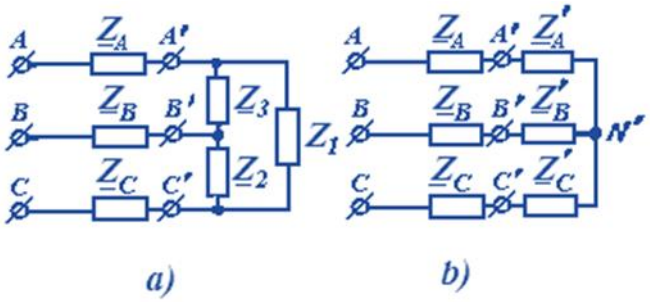
bunda $\dot{U}_A = U_A = 130B;\ Y_A = 1/(r_f + r_Y);\ Y_N = 1/Z_N.$

A va V fazalardagi toklar:

$$\dot{I}_A = (\dot{U}_A - \dot{U}_{N^1N})Y_A = 75{,}5\angle 3^0 40' A; \qquad \dot{I}_B = (\dot{U}_B - \dot{U}_{N^1N})Y_A = 75{,}5\angle -123^0 40' A.$$

Bunda lampalar ulangan guruxlardagi kuchlanishlar quyidagicha bo‘ladi:

$$\dot{U}'_A = I_A r_Y = U'_B = I_B r_Y = 122B.$$



8.36-rasm. **Aralash ulashnishlar**

Aralash ulashnishlar. Agar yuk uchburchak ulansa va liniya kuchlanishlari ma’lum bo‘lsa, har bir shoxobchadagi tok *Om* qonuni asosida aniqlanadi. Biroq, kuchlanishlari ma’lum bo‘lgan manbaning *A*, *B*, *C* qutblari bilan uchburchak ulangan yukning orasida liniyaning faza qarshiliklari (8.36,*a*-rasmdagi $\underline{Z}_A$, $\underline{Z}_B$, $\underline{Z}_c$) ulangan bo‘lsa, masalaning yochimi murakkablashadi. Bu holda uchburchak qarshiliklari ($\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_3$)ni ekvivalent yulduzga aylantirish tavsiya etiladi: bu yangi yulduzning shohobchalari qarshiliklari ($\underline{Z}'_A$, $\underline{Z}'_B$, $\underline{Z}'_C$) liniyaning faza qarshiliklariga ketma-ket ulangan bo‘lib qoladi va endi ilgari ma’lum bo‘lgan zanjir hisoblanadi. Ushbu zanjirda A', B', C' tugunlari potensiallarini aniqlanib, uchburchak shohobchalaridagi toklarni aniqlash oson.

Agar A', B', C' tugunlarga uchburchakdan tashqari yulduz ulangan yuk qo‘shilsa, masala yanada murakkablashadi.

Bu holatda quyidagilar tavsiya etiladi;

1) yulduzni uchburchakka o‘zgartirish;

2) ikki uchburchaklarning mazkur parallel shohobchalarini qo‘shish;

3) yangi hosil bo‘lgan umumiy uchburchakni ekvivalent yulduzga aylantirish va 8.36, *b*-rasmdagi zanjirga keltirib hisoblash.

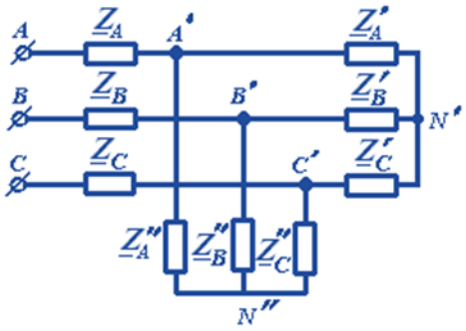
Avval uchburchakni yulduzga aylantirsak, 8.37-rasmda keltirilgandek, A', B', C' tugunlarga ulangan ikki yulduzli zanjir hosil qilgan bo‘lar edik. Biroq, bunday kichik «3» V yulduzlarning shohobchalarini parallel ulangan deb bo‘lmas edi, chunki ularning N' va N'' neytralari har xil potensialli bo‘lishi mumkin.

8.37-rasmdagi zanjirni hisoblashda quyidagiga amal qilish zarur:

1) avvalo har bir yulduzni uchburchakka aylantirish zarur;

2) ikki uchburchakning parallel shohobchalarini qo‘shib, bir ekvivalent uchburchakka keltirish;

3) bu bitta ekvivalent uchburchakni ekvivalent yulduzchaga aylantirish.



8.37-rasm. **Ikki yulduzli zanjir**

Oxirgi amaldan so‘ng nosimmetrik uch fazali zanjirlarni (8.36,*b*-rasmdagi-dek) hisoblashga o‘tiladi. Ushbu aylantirish usulining ko‘rgazmali va unversal ekanligini usulni amerikalik muhandis Kennelining aynan uch fazali nosimmetrik zanjirlarni xisoblash uchun taklif etganligidan ko‘rish mumkin. Bu usul boshqa turdagi murakkab zanjirlarni hisoblashda ham keng qo‘laniladi. Real uch fazali zanjirlarning nosimmetrik rejimlarga ta’sirining ko‘pgina xususiyatlari 8.10 bo‘limda ko‘riladigan maxsus usulga o‘tish zaruratiga olib keladi.

8.10. Nosimmetrik uch fazali zanjirlarning simmetrik tashkil etuvchilari

Nosmmetrik vektorlar tizimini uchta simmetrik vektorlarga ajratish. Garmonik o‘zgarayotgan qiymatlarni tasvirlovchi uch vektorlarni (yoki kompleks-larni) *A, B, C* harflari bilan belgilaymiz. Uch vektor to‘g‘ri ketma-ketlik simmetrik tizimini tashkil etadi va "1" indeks bilan belgilanadi. Bunda

$$\left.\begin{aligned} A_1 = aB_1 = a^2C_1, \quad \text{yoki} \\ B_1 = a^2A_1, C_1 = aA_1, \end{aligned}\right\} \tag{8.56}$$

bunda *a*-avvaldan ma’lum uch fazali tizimning faza ko‘paytirgichi (8.6-rasm). To‘g‘ri ketma-ketlikning uch vektori 8.38,*a*-rasmning chapida tasvirlangan.

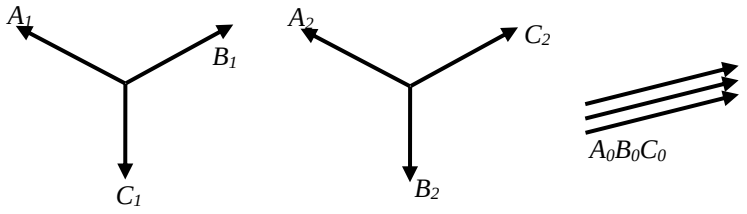
Yana uch vektorlar boshqa simmetrik tizimni - *teskari ketma-ketlik* deb nomlangan *tizimni hosil qilaishi mumkin*. Teskari ketma-ketlik vektorlari "2" indeks bilan belgilanadi.

Teskari ketma-ketlik simmetrik tizimida B_2 vektori A_2 vektoridan $2\pi/3$ fazali burchagiga ilgarilab ketadi va C_2 vektordan $2\pi/3$ burchakka kechikadi (8.38,a-rasmning o‘rtasida). Demak, teskari ketma-ketlikni hosil qiluvchi ushbu vektorlar tizimi uchun quyidagilarni yozish mumkin:

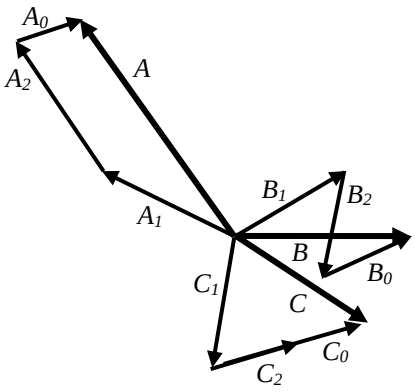
$$B_2 = aA_2, \quad C_2 = a^2A_2. \tag{8.57}$$

Uchta vektorlar uchinchi simmetrik tizimni ham hosil qilishi mumkin. Uni nol ketma-ketlik tizimi deb ataladi va mazkur vektorlarni «0» indeks bilan belgi-lanadi. Uchta nol ketma-ketligi vektorlari bir-birlariga teng (8.38,*a*-rasmda o‘ngda)

$$A_0 = B_0 = C_0. \tag{8.58}$$



a)



b)

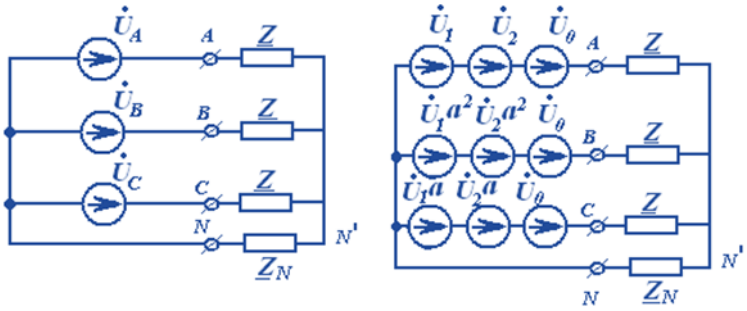
8.38-rasm. **Simmetrik vektorlarga ajratish.**

Uchchala ketma-ketliklarning bir xil nomli vektorlarini o‘zaro qo‘shib nosimmetrik tizimni (8.38,*b*-rasm) hosil qilamiz.

$$A = A_0 + A_1 + A_2;$$
$$B = B_0 + B_1 + B_2;$$
$$C = C_0 = C_1 + C_2.$$

Har bir simmetrik tashkil etuvchilarni vektorlar A_0, A_1, A_2 orqali (8.56)-(8.58) tengliklar bilan ifodalasak, yuqoridagi tengliklar tizimini quyidagicha yozish mumkin:

$$\begin{aligned} A &= A_0 + A_1 + A_2; \\ B &= A_0 + a^2 A_1 + a A_2; \\ C &= A_0 + a A_1 + a^2 A_2. \end{aligned} \qquad (8.59)$$



a) b)

8.39-rasm. **Yulduz ulangan generator faza kuchlanishlari**

Ushbu tenglamalar tizimining aniqlovchisi noldan farqlidir. Shuning uchun, ushbu tenglamalar tizimi berilgan A, B, C larda A_0, A_1, A_2 larga nisbatan

yechilishi mumkin;

$$\left.\begin{aligned} A_0 &= (A + B + C)/3; \\ A_1 &= (A + aB + a^2C)/3; \\ A_2 &= (A + a^2B + aC)/3 \end{aligned}\right\} \qquad (8.60)$$

Agar $a^3 = 1$ va $1 + a + a^2 = 0$ ekanligini nazarda tutsak, u holda ushbu tenglamalar tizmini yechish oson. Masalan, yulduz ulangan generatorning faza kuchlanishlari nosimetrik va $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_c$ ga teng bo‘lsin (8.39,*a*-rasm). Ushbu generator quyidagi shart bilan

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0; \\ \dot{U}_B &= a^2\dot{U}_1 + a\dot{U}_2 + \dot{U}_0; \\ \dot{U}_c &= a\dot{U}_1 + a^2\dot{U}_2 + U_0. \end{aligned}\right\} \qquad (8.61)$$

Har bir fazasida uchta kuchlanish manbai bo‘lgan holatga keltirilish mumkin. Shuning uchun

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_0 &= (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_c)/3; \\ \dot{U}_1 &= (\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C)/3; \\ \dot{U}_2 &= (U_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C)/3. \end{aligned}\right\} \qquad (8.62)$$

Har xil ketma-ketlik tashkil etuvchilari simmetrik zanjirlari qarshiliklari-ning fizik farqlari. Nosimmetrik manbali zanjirni hisoblashda hamma parametrlar chiziqli bo‘lganda superpazisiya usulini qo‘llashi mumkin. Bunda simmetrik parametrlar hisoblash uch bosqichdan iborat bo‘ladi;

1) simmetrik manbaning to‘g‘ri ketma-ketligi ta’sir etayotganda to‘g‘ri ketma-ketlikning simmetrik toki aniqlanadi;

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_1 / \underline{Z}_1;$$

2) o‘sha A fazasi uchun teskari ketma-ketlik toki aniqlanadi;

$$\dot{I}_2 = \dot{U}_2 / \underline{Z}_2;$$

3) nol ketma-ketlik toki aniqlanadi;

$$\dot{I}_0 = \dot{U}_0 / \underline{Z}_0.$$

Tokning barcha simmetrik tashkil etuvchilari aniqlangandan so‘ng *A, B, C* fazalardagi toklarni (8.59)dan foydalanib aniqlanadi;

$$\dot{I}_A = \dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_0 + a^2 \dot{I}_1 + a\dot{I}_2; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_0 + a\dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2.$$

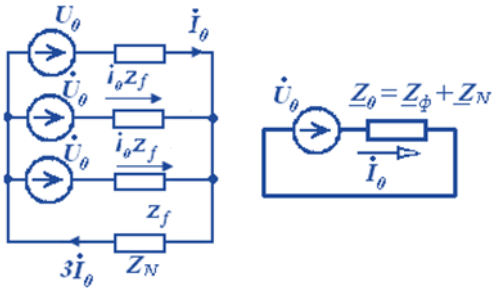
Ushbu hisoblashni amalga oshirish uchun faza qarshiligining to‘g‘ri ($\underline{Z}_1$), teskari ($\underline{Z}_2$) va nul ($\underline{Z}_0$) tashkil etuvchilarini bilish zarur. Umumiy holda bu qarshiliklar har xil.

Nol ketma-ketlik toki uchun qarshilik. Neytrali bo‘lgan simmetrik yulduz ulangan zanjirga nol ketma-ketlik manbai ta’sir etganda (8.40-rasm) har bir faza o‘tkazgichlaridagi toklar bir xil ($\dot{I}_0$), neytral o‘tkazgichda esa $\dot{I}_N = 3\dot{I}_0$. Shuning uchun, agar har bir faza qarshiligi $\underline{Z}_f$, neytral o‘tkazgich qarshiligi $\underline{Z}_N$ bo‘lsa, u holda Kirxgofning ikkinchi qonuni asosida

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_0 \underline{Z}_f + 3\dot{I}_0 \underline{Z}_N = \dot{I}_0 \underline{Z}_0, \qquad (8.63)$$

bundan bir fazadagi nol ketma-ketlik toki uchun qarshilik quyidagiga teng;

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_f + 3\underline{Z}_N \qquad (8.64)$$

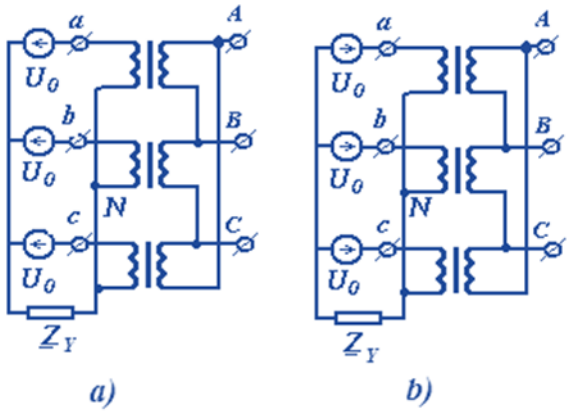


8.40-rasm. **Nol ketma-ketlik toki uchun qarshilik**

Nol ketma-ketlik toki zanjirda neytral o‘tkazgichi bo‘lganda yoki liniya boshi va oxirida zaminlangan neytral bo‘lganda oqishi mumkin. Keyingi holatda Z_0 ning qiymati, asosan, «o‘tkazgich-zamin» tizimining qarshiligi bilan, (8.64) va (8.43) tengliklar yordamida ifodalanadi;

$$\underline{Z}_0 = 3(\underline{Z}_{N1} + \underline{Z}_{N2}) + [r_0 + 0{,}15 + \mathrm{j}1{,}01\ln(D/a_{o't})]l\,. \qquad (8.65)$$

Zanjirga transformator yoki aylanuvchi mashina ulanganda vaziyat butkul boshqacha bo‘ladi.



8.41-rasm. **Transformatorning ikkilamchi chulg‘amlari**

8.41-rasmda bir fazali transformatorlar uch fazali zanjir sifatida ulangan. Ularning birlamchi chulg‘amlari yulduz ulangan. Neytrallari esa generator neytral-lari bilan ulangan. Transformatorlarning ikkilamchi chulg‘amlari tashqi zanjirdan uzilgan (yuksiz ishlash rejimi.) 8.41,*a*-rasmda ikkilamchi chulg‘am yulduz ulangan, 8.41,*b*-rasmda esa uchburchak. Ikkala transformatorlarning xam barcha boshqa parametrlari bir xildir. Ushbu ikki holatda transformatorlarning chulg‘am-lari nol ketma-ketlik tokiga bir xildagi $\underline{Z}_0$ qarshilikni ko‘rsatadimi?

Yulduz-yulduz ulangan transformatorlarning ikkilamchi chulg‘amlarida tok bo‘lmaydi, transformatorning har bir fazasidagi qarshilik juda katta. U transforma-torning *yuksiz ishlagandagi* kirish qarshiligiga teng $\underline{Z}_{0m} = \underline{Z}_{1Y}$. Bunda ikkilamchi chulg‘amlarda e.y.k. induksiyalanadi, biroq, ular axamiyatli emas, chunki ikki-lamchi chulg‘am yulduz ulanib, tashqi yuk uzilgan (ikkilamchi chulg‘amdan tok o‘tmaydi).

Ikkilamchi chulg‘amlari uchburchak ulangan transformatorda nol ketma-ketligi ta’sirida shunday tok xosil bo‘ladiki, uning qiymati qisqa tutashuvdagidek katta bo‘ladi. Darhaqiqat, nol ketma-ketlik toki uchchala fazalarda qiymatlari teng va fazalari mos keladi. Bu xolatda, transformatorning birlamchi chulg‘ami tomoni-dan bir faza qarshiligi, ikkilamchi chulg‘amning $\underline{Z}_{1q}$ *qisqa tutashuvidagi* transfor-matorning kirish qarshiligiga teng $\underline{Z}_{0m} = \underline{Z}_{1q}$.

Transformatorlarda $\underline{Z}_{1Y}$ ning qiymati $\underline{Z}_{1q}$ ning qiymatidan 100 va undan ko‘p marta ortiqdir.

Agar uch fazali tizimda uch sterjenli magnit o‘zagi bo‘lgan (8.27-rasm) va chulg‘amlari yulduz-yulduz ulangan transformator ulangan bo‘lsa $\underline{Z}_{0m}$ ning qiymati $\underline{Z}_{1Y}$ qiymatidan ancha kichik, chunki uchchala sterjendagi F_0 oqim bir xil bo‘ladi. Shu tufayli, F_0 ning xammasi to‘laligicha ferromagnit o‘zak orqali oqib o‘ta olmaydi. Shuning uchun chulg‘amlar induktivligi anchagacha kamayadi.

Transformatorning aniqlangan nol ketma-ketlik qarshiliklari $\underline{Z}_{0m}$ yuqorida ko‘rilgan umumiy qo‘shiluvchilar bilan birgalikda $\underline{Z}_0$ ning tarkibiga kiradi. Bundan tashqari uning tarkibida generatorning ham nol ketma-ketlik qarshiligi hamda, albatta, yuqorida keltirilganidek, zamin va liniyaning qarshiliklari ham kiradi.

To‘g‘ri va teskari ketma-ketlik qarshiliklari. Aylanuvchi mashinalar bo‘lmagan simmetrik zanjirlarda to‘g‘ri va teskari ketma-ketlik qarshiliklari o‘zaro mos bo‘ladi;

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_f \tag{8.66}$$

Aylanuvchi mashinalar bo‘lgan elektr zanjirlarida esa vaziyat butkul boshqa-dir; ularda uchchala ketma-ketliklarning qarshiliklari har xil bo‘ladi.

Simmetrik tashkil etuvchilar orqali ifodalangan quvvat. Zanjirda kuch-lanish va tokning $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$, $\dot{U}_0$ va $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$ simmetrik tashkil etuvchilari ma’lum bo‘lsin. Bunday tizimning uzatayotgan quvvati

$$\tilde{S} = \dot{U}_A \overset{*}{\dot{I}}_A + \dot{U}_B \overset{*}{\dot{I}}_B + \dot{U}_C \overset{*}{\dot{I}}_C \ ,$$

to‘g‘ri $\tilde{S}_1 = \dot{U}_1 \overset{*}{\dot{I}}_1$, teskari $\tilde{S}_2 = \dot{U}_2 \overset{*}{\dot{I}}_2$ va nol $\tilde{S}_0 = \dot{U}_0 \overset{*}{\dot{I}}_0$ ketma-ketliklarning uzatayotgan quvvatlari yig‘indisiga teng. Boshqacha qilib aytganda, tokning bir ketma-ketligi va kuchlanishning boshqa ketma-ketligi o‘zaro ta’siridagi quvvat nolga teng. Simmetrik tashkil etuvchilar ajratilishining ortogonalligi ham shuning uchundir.

Ushbu qiymat

$$\widetilde{S} = \widetilde{S}_1 + \widetilde{S}_2 + \widetilde{S}_0 \qquad (8.67)$$

ekanligi isbotlash oson, masalan, nol ketma-ketlik toki va kuchlanishning to‘g‘ri ketma-ketligi uchun

$$\dot{U}_1 \overset{*}{\dot{I}}_0 + a^2 \dot{U}_1 \overset{*}{\dot{I}}_0 + a\dot{U}_1 \overset{*}{\dot{I}}_0 = \dot{U}_1 \overset{*}{\dot{I}}_0 (1 + a^2 + a) \equiv 0.$$

Shunga o‘xshash ifodalar tokning to‘g‘ri ketma-ketligi va kuchlanishning teskari ketma-ketligi uchun ham aniqlanadi.

Nosimmetrik tizimning umumiy holati. Agar manba va zanjirning parametr-lari nosimmetrik bo‘lsa, ixtiyoriy simmetrik tashkil etuvchining e.y.k.i tokning barcha uchchala tashkil etuvchilarini hosil qilishi mumkin. Bunday zanjirlarning tenglamalarini quyidagi shaklga keltirish mumkin;

$$\dot{E}_k = \underline{Z}_{k\ell}\, \dot{I}_\ell \quad \text{va} \quad \dot{I}_\ell = \underline{Y}_{\ell k} \cdot \dot{E}_k.$$

Bu ifodalardagi $\underline{Z}_{k\ell}$ va $\underline{Y}_{\ell k}$ -bir simmetrik tashkil etuvchining boshqasiga nisbatan uzatish qarshiligi va uzatish o‘tkazuvchanligidir.

Murakkab elektr zanjirlarini hisoblashda va tahlil qilishda simmetrik tashkil etuvchilar usuli juda muhimdir. Yuqorida ushbu usulning faqat prinsipal asoslari berildi. Usulning kengaytirilgan tartibdagi o‘zlashtirilishi esa boshqa fanlarda maxsus ko‘riladi.

Nazorat savollari

1. Ko‘p fazali generator sxemasini tushuntirib bering.
2. Generator chulg‘amlarini «yulduz» va «uchburchak» usulda ulashni tushuntirib bering.
3. Simmetrik va nosimmetrik uch fazali zanjirni sharhlab bering.
4. Uch fazali zanjirlar quvvatini o‘lchashni tushuntirib bering.
5. Liniyalarni hisoblashda sig‘imni e’tiborga olish nima uchun kerak?

GLOSSARIY

Elektr zanjiri – elektr toki oqib o‘tishini ta’minlaydigan elementlar jamlamasi.

Elektr energiya manbalari – energiyani boshqa turlarini elektr energiyasiga aylantiruvchi elektr zanjir elementi.

***Elektr zanjirida* tarmoq** - elektr zanjirining ma’lum bir qismi bo’lib, ketma-ket birlashtirilgan qarshiliklar (rezistorlar), energiya manbalari va hokazolardan iborat.

***Tugun* -** elektr zanjirining uchta va undan ortiq tarmoqlarining birlashgan joyi.

Kontur- zanjirining bir necha tarmoqlaridan iborat yopiq yo’l.

Kontur toki – alohida olingan konturdan o‘tayotgan tokning qiymati.

O‘zgaruvchan tok – vaqt birligi ichida qiymat va yo‘nalishi o‘zgaradigan tok.

Sinusoidal tok – sinus qonuniyati bilan o‘zgaruvchan tok.

Effektiv (ta’sir etuvchi) ***qiymat*** – teng vaqt davomida o‘zgarmas va o‘zgaruvchan tokda ajralib chiqadigan energiya qiymatlarini o‘zaro tengligini ta’minlaydigan o‘zgarmas tokning qiymati o‘zgaruvchan tokning effektiv qiymati deb ataladi.

Davr – sinusoidal tokni bir to‘la o‘zgarishi uchun ketgan vaqt.

Chastota – o‘zgaruvchan tokni bir sekunddagi o‘zgarishlar soni.

Boshlang‘ich faza - vaqt nolga tengligida sinusoidal tokning o‘qiymatini belgilovchi burchak.

Aktiv element – elektr energiyasini issiqlik energiyasiga aylantiruvchi elektr zanjir elementi.

Induktiv element – magnit maydon energiyasini jamlash xususiyatiga ega bo‘lgan elektr zanjir elementi.

Sig‘im elementi – elektr maydon energiyasini jamlash xususiyatiga ega bo‘lgan elektr zanjiri elementi.

Aktiv quvvat – elektr zanjirida foydali ish uchun sarf bo‘ladigan quvvat.

Reaktiv quvvat – elektr zanjirini elementlarida magnit maydon va elektr maydon xosil qilish uchun sarf bo‘ladigan quvvat

Uch fazali sinxron generator- mexanik energiyani uch fazali o‘zgaruvchan tok

elektr energiyasiga aylantirib beruvchi elektr mashinasi.

Faza toki – iste'molchi faza qarshiligidan o‘tuvchi tok.

Faza qarshiligi – uch fazali iste'molchini sinxron generatorni faza cho‘lg‘amlariga ulanuvchi qarshilik.

Faza kuchlanishi – istemolchining faza qarshiligidagi kuchlanish pasayishi yoki istemolchini neytral nuqtasi bilan ixtiyoriy liniya simi orasidagi kuchlanish.

Liniya kuchlanishi – ixtiyoriy ikkita liniya simlari orasidagi kuchlanish.

Neytral (nolinchi) sim – elektr energiya manbasini hamda uch fazali istemolchini neytral (nulinchi) nuqtalarni o‘zaro birlashtiruvchi sim.

Neytral tok – neytral sim orqali o‘tuvchi tok.

Simmetrik uch fazali istemolchi – faza qarshiligini qiymatlari o‘zaro teng bo‘lgan istemolchilar.

Nosimmetrik uch fazali istemolchi – faza qarshiligini qiymatlari turlicha bo‘lgan istemolchilar.

Transformatorni magnit o‘zagi – elektrotexnik po‘lat tunkachalardan yig‘ilgan o‘zak.

Birlamchi cho‘lg‘am – elektr energiya manbasiga ulanuvchi miss cho‘lg‘am.

Ikkilamchi cho‘lg‘am – elektr energiya istemolchilari ulanuvchi miss cho‘lg‘am.

Past kuchlanishli cho‘lg‘am – ikkilamchi cho‘lg‘am.

Transformator moyi – transformatorni sovutish tizimida ishlatiladigan, maxsus tarkibga ega bo‘lgan moy.

Transformator – o‘zgaruvchan tokni chastotasini o‘zgartirmagan xolda kuchlanishini o‘zgartiruvchi statik apparat.

Salt ishlash toki – pulat uzakni magnitlash uchun maydon xosil qiluvchi tok.

Transformatordagi quvvat nobudgarchiliklari – transformatorlarni pulat uzagini hamda miss simdagi quvvat isrofgarchiligi.

Kuchlanish pasayishi – transfarmator ikkilamchi chulg‘amida yuklama oshishi bilan kuchlanish qiymatini pasayishi (kamayishi).

Uch fazali transformator – yagona uzakka ega bo‘lgan, uch fazali birlamchi va

ikkilamchi chulg‘amlardan iborat bo‘lgan transformator.

Avtotransformator – ikkilamchi chulg‘ami birlamchi chulg‘amni bir qismini tashkil etuvchi hamda chqish kuchlanishini oxista o‘zgartirish imkoniyatiga ega bo‘lgan transformator.

Ulchash transformatori – elektr ulchov asboblarini shkalalarini «kengaytirish» imkoniyatiga ega bo‘lgan transformatorlar.

Payvandlash transformatori – metallni payvandlash uchun «qisqa tutashuv» rejimida ishlashga muljallangan transformator.

O‘zgarmas tok generatori – mexanik energiyani o ‘zgarmas tok elektr energiyasiga aylantiruvchi elektr mashinasi.

Magnit qutblari – o‘zgarmas tok mashinasini asosiy magnit maydonini xosil qiluvchi o‘zgarmas tok elektromagniti.

Yakor – birlamchi motor yordamida xarakatga keltiruvchi, chulg‘amlarida o‘zgaruvchan E.Yu.K. xosil bo‘luvchi generator qismi.

Kollektor sho‘tka qurilmasi – o‘zgaruvchan E.Yu.K.ni o‘zgarmas (pulsatsiya-lanuvchi) E.Yu.K.ga aylantirib beruvchi generator qismi.

Sho‘tka – tashqi elektr energiya istemolchisini generator ulashda kontakt xosil qiluvchi element.

O‘zgarmas tok motori – o‘zgarmas tok elektr energiyasini mexanik energiyaga aylantiruvchi elektr mashinasi.

Magnit qutblari – o‘zgarmas tok mashinasini asosiy magnit maydonini xosil qiluvchi o‘zgarmas tok elektromagniti.

Asinxron motor – o‘zgaruvchan tok elektr energiyasini mexanik energiyaga aylantiruvchi elektr mashinasi.

Asinxron generator – mexanik xarakatni (energiyani) o‘zgaruvchan tok elektr energiyasiga aylantiruvchi elektr mashinasi.

Aylanuvchi magnit maydoni – uch fazali o‘zgaruvchan tok xosil qilgan va sinxron tezlik bilan aylanuvchi magnit maydoni.

Qisqa tutashgan chulg‘amli rotor – rator chulg‘amli uzaro berk kontur xosil qiluvchi aluminiy sterjenlardan iborat bo‘lgan rotor.

Faza chulg‘amli rotor – rotor chulg‘ami uch fazali mis chulg‘amlardan iborat bulib unga ketma-ket uch fazali aktiv qarshilik ulangan rotor chulg‘ami.

Sirpanish – aylanuvchi magnit maydon tezligi bilan rotorni aylanish tezligi orasidagi nisbiy farq.

Yurgizish momenti – asinxron motorni ishga tushirish paytida xosil qiladigan aylantiruvchi moment.

Maksimal (kritik) moment – asinxron motor xosil qilishi mumkin bo‘lgan eng kata aylantiruvchi moment qiymat.

Diod – ikki elektrodli yarim o‘tkazgichli asbob.

Triod – uch elektrodli yarim o‘tkazgichli asbob.

Tiristor – uch elektrodli boshqariladigan elektron asbob.

Tranzistor – uch elektrodli to‘liq boshqariladigan va kuchaytirish xususiyatiga ega bo‘lgan elektron asbob.

To‘g‘rlangan kuchlanish – to‘g‘irlagich sxemasini chiqish qismlaridagi kuchlanishni qiymati.

Filtr – to‘g‘irlangan kuchlanish tarkibidagi yuqori garmonikalarni bartaraf etadigan elektr zanjir elementi.

Integral mikrosxema – aktiv va passiv elementlarni yagona texnalogiya asosida yig‘ilgan va ulangan ma’lum funksional vazifalarini bajaruvchi minatyuralashtirilgan sxema.

Katta integral sxemalar (KIS) – katta imkoniyatlarga ega bo‘lgan elektron apparatlarni alohida bloki sifatida foydalaniladigan integral mikrosxema.

Gibridli integral mikrosxema – keramik asosga yupqa va qalin plenkalar sifatida joylashtirilgan integral mikrosxema.

Elektr yuritma – ishchi mexanizmni elektrlashtirish hamda ish jarayonlarini avtomatlashtirish uchun hizmat qiladigan avtomatik uskunalarga aytiladi.

Elektromotor – elektr energiyasini mexanik energiyaga aylantiruvchi elektromexanik qurilma.

Elektr to‘g‘rilagichlar – o‘zgaruvchan tok elektr energiyasini o‘zgarmas tok elektr energiyasiga aylantiruvchi apparat.

Inventor – o‘zgarmas tok elektr energiyasini o‘zgaruvchan tok elektr energiyasiga aylantiruvchi apparat.

I L O V A L A R

1-ilova

XALQARO SI SISTEMASIDA ELEKTR, MAGNIT, MEXANIK KATTALIKLAR VA PARAMETRLAR, HAMDA ULARNING O‘LCHOV BIRLIKLARI

Kattaliklar nomi	**(SI) Xalqaro sistemadagi birliklar**		
	Nomlanishi	**O‘lchov birligi**	**Belgisi**
Uzunlik	Metr	m	*l*
Yuza, sirt	Metr·kvadrat	m^2	*S*
Hajm	Metr·kub	m^3	*V*
Og‘irlik (massa)	Kilogramm	kg	*m*
Vaqt	Sekund	sek	*t*
Tezlik	Metrning sekundga nisbati	m/s	υ
Kuch	Nyuton	N	*F*
Ish	Joul (vatt·sekund)	J (Vt·sek)	*W*
Issiqlik miqdori	Joul	J	*Q*
Harorat	Kelvin	K	*T*
Burchak tezligi, burchak chastotasi	Radianning sekundga nisbati	rad/sek	ω
Yassi burchak	Radian	rad	α, φ, ψ
Kuch momenti	Nyuton·metr	N·m	*M*
Aktiv quvvat	Vatt	Vt	*P*
Reaktiv quvvat	Volt·amper·reaktiv quvvat	VAr	*Q*
To‘la quvvat	Volt·amper	VA	*S*
Kuchlanish, EYuK	Volt	V	*U, E*
Tok	Amper	A	*I*
Tok zichligi	Amperning metr kvadratga nisbati	A/m^3	*j*
Zaryad, elektr miqdori	Kulon	Kl	*Q, q*
Elektr maydon kuchlanganligi	Voltning metrga nisbati	V/m	E_n
Sig‘im	Farada	F	*S*
Absolyut dielektrik	Faradaning metrga nisbati	F/m	Σ_0

singdiruvchanlik			
Qarshilik	Om	Om	*R*
Solishtirma qarshilik	Om·metr	Om·m	ρ
O‘tkazuvchanlik	Simens	Sm	*g*
Solishtirma o‘tkazuvchanlik	Simensning metrga nisbati	Sm/m	γ
Magnit oqim	Veber	Vb	F
Magnit induksiya	Tesla (veberning metr kvadratga nisbati)	Tl	*B*
Magnit maydon kuchlanganligi	Amperning metrga nisbati	A/m	*H*
Absolyut magnit singdiruvchanlik	Genrining metrga nisbati	Gn/m	μ_0
Induktivlik	Genri	Gn	*L*
Reaktiv qarshilik	Om	Om	*X*
To‘la qarshilik	Om	Om	*Z*
Chastota	Gers	Gs	*f*

2-ilova.

O‘NGA KARRALI BIRLIKLAR

Bog‘lovchining nomi	**Bog‘lovchining belgisi**		**Asosiy birlik ko‘paytmasi**
	o‘zbekcha	**xalqaro**	
deka	da	*da*	10^1
gekto	g	*h*	10^2
kilo	k	*k*	10^3
mega	M	*M*	10^6
giga	G	*G*	10^9
tera	T	*T*	10^{12}
detsi	d	*d*	10^{-1}
santi	s	*c*	10^{-2}
milli	m	*m*	10^{-3}
mikro	mk	μ	10^{-6}
nano	n	*n*	10^{-9}

piko	p	ρ	10^{-12}

3-ilova.

ELEKTR O‘TKAZGICH MATERIALLARINING ASOSIY XARAKTERISTIKALARI

Material nomi	**Zichlik**	**Solishtirma qarshilik**	**Solishtirma o‘tkazuvchanlik**	**Qarshilikning haroratga nisbatan koeffitsienti**
	kg/m^3	**Om·m (10^{-6})**	**Sm/m (10^6)**	**1/K (10^{-6})**
Mis	8900	0,0176	57	4,11-4,20
Alyumin	2700	0,0278	35	4,31-4,39
Latun	8500	0,04	25	2,70-2,80
Volfram	19100	0,0612	16,34	4,1-5,0
Po‘lat	7900	0,13	7,6	5,7-6,2
Qalay	7300	0,143	7	4,4
Qo‘rg‘oshin	11400	0,221	4,52	3,8-4,1
Nixrom	8200	0,98	1,02	0,15
Konstantan	8800	0,4-0,51	2,5-1,98	0,005
Fexral	7600	1,4	0,7	0,28
Manganiy	8100	0,42	2,38	0,06

4-ilova.

DIELEKTRIKLARNING ASOSIY XARAKTERISTIKALARI

Material nomi	Nisbiy dielektrik singdiruvchanlik	Elektr mustahkamlik
	F/m	MV/m
Havo (293 K va bosim 100 kPa)	1*	3,3**
Qog‘oz	1,8-2,6	10
Parafin	2-2,3	40
Polietilen	2,4	40
Polistirol	2,4	50
Karton	4,8	15
Lakotkan	5-6	100
Mineral yog‘	2,2-2,5	20
Ebolit	3-3,5	20
Kvars, shisha, slyuda	5-10	25
Farfor (chinni)	4,5-6	15
Alyumin oksidi	-	100
Bariy titanat	800-2200	-

Izoh: *- dielektrik singdiruvchanlikning o‘rtacha qiymatlari ko‘rsatilgan;

**- dielektrikning 1 mm qalinligi uchun.

5-ilova

Tarmoq-larning nominal kuchlanish-lari, kV	Generatorlarning nomi-nal kuchla-nishlari, kV	Transformatorlarning nominal kuchlanishlari, kV		Izolyasiyalari-ning uzoq muddat ishlashi mumkin bo‘lgan kuchlanishi, kV
		Birlamchi chulg‘am uchun	Ikkilamchi chulg‘am uchun	
0,22		0,22	0,23	
0,38		0,38	0,4	
0,66		0,66	0,69	
(3)	(3,15)	(3)	(3,15)	(3,6)
(6)	(6,3)	(6)	(6,3)	(7,2)
10	10,5	10	10,5	12.0
20	21	20	21	24.0
35		35	38,5	40,5
110		110	121	126
(150)		(150)	(165)	(172)
220		220	242	252
330		330	347	368
500		500	525	525
750		750	787	787

Ilova: qavsda ko‘rsatilgan kuchlanishlar yangi loyihalashtirilayotgan tarmoqlarga tavsiya etilmaydi.

6-ilova

ASOSIY BELGILASHLAR

α kuchsizlanish, ishchi kuchsizlanish

b kompleks o‘tkazuvchanlikning reaktiv tashkil etuvchisi

C sig‘im

E o‘zgarmas elektr yurituvchi kuch (EYuK), garmonik EYuK ning ta’sir etuvchi (effektiv) qiymati

$\dot{E}$ kompleks EYuK

E_m garmonik eyuk amplitudasi

$\dot{E}_m$	garmonik eyuk ning kompleks amplitudasi
f	tebranish chastotasi
G	rezistiv o‘tkazuvchanlik
g	kompleks o‘tkazuvchanlikning aktiv tashkil etuvchisi
$g(t)$	zanjirning impuls tavsifi
$\dot{H}, H(j\omega)$	kompleks uzatish funksiyasi
$H(p)$	operator uzatish funksiyasi
$i, i(t)$	tokning oniy qiymati
I	tokning ta’sir etuvchi (effektiv) qiymati, o‘zgarmas tok qiymati
$\dot{I}$	kompleks tok
I_m	garmonik tokning amplitudasi
$\dot{I}_m$	tokning kompleks amplitudasi
$j=\sqrt{-1}$	mavhum son
k	kuchaytirish koeffisiyenti
$h(t)$	zanjirning o‘tkinchi tavsifi
L	induktivlik
l	liniya simini va boshqa miqdorlarning uzunligi
M	o‘zaro induktivlik koeffisiyenti
P	aktiv (o‘rtacha) quvvat
p	oniy quvvat, operator belgisi
Q	asillik, reaktiv quvvat
q	zaryad miqdori
R	Omik (rezistiv) qarshilik
r	aktiv qarshilik
T	tebranish davri
t	vaqtning oniy qiymati
U	kuchlanishning ta’sir etuvchi qiymati
$\dot{U}$	kompleks kuchlanish
U_m	garmonik kuchlanish amplitudasi
$u, u(t)$	kuchlanishning oniy qiymatlari

x	qarshilikning reaktiv tashkil etuvchisi
$Y(p)$	ikki qutblikning operator o‘tkazuvchanligi
$\underline{Y}$	ikki qutblikning kompleks o‘tkazuvchanligi
$Z(p)$	ikki qutblikning operator qarshiligi
$\underline{Z}$	ikki qutblikning kompleks qarshiligi
z	ikki qutblik kompleks qarshiligining moduli
φ	ikki qutblik kompleks qarshiligining argumenti
β	faza koeffisiyenti
γ	liniya tarqalish koeffisiyenti, solishtirma o‘tkazuvchanlik
$\varphi\ (\omega)$	faza-chastotaviy tavsif
ρ	solishtirma qarshilik, liniya to‘lqin qarshiligi
τ	yagona reaktiv elementli zanjirning vaqt doimiysi
ψ	garmonik tebranishning boshlang‘ich fazasi
F	magnit oqimi
φ	fazalar siljishi
φ_B	liniya to‘lqin qarshiligining argumenti
φ_Y	ikkiqutblik kompleks o‘tkazuvchanligi argumenti
φ_Z	ikkiqutblik kompleks qarshiligi argumenti
ω	doyiraviy (davriy) chastota

Foydalanilgan adabiyotlar

Asosiy darsliklar va o‘quv qo‘llanmalar

1. Steven W. Blume. Electric power system basics. USA, 2007.
2. Amirov S.F., Yoqubov M.S., Jabborov N.G. Elektrotexnikaning nazariy asos-lari. 1-kitob. O‘quv qo‘llanma. – T.: “Talqin” nashiryoti. 2008, - 144 b.
3. Amirov S.F., Yoqubov M.S., Jabborov N.G.. Elektrotexnikaning nazariy asos-lari. 2-qism. O‘quv qo‘llanma. – T.: “O‘zbekiston” nashiryoti. 2007. - 128 b.
4. Amirov S.F., Yoqubov M.S., Jabborov N.G.. Elektrotexnikaning nazariy asos-lari. 3-qism. O‘quv qo‘llanma. – T.: “O‘zbekiston” nashiryoti. 2007. - 155 b.
5. John Bird. Electrical and electronic Principles and Technology. 2014, - P.455.
6. Charles K. Alexander Matthew N.O. Sadiku. Fundamentals of Electric Circuits. New York, 2014. – P. 458.
7. Alimxodjayev K.T., Abdullayev B.A., Abidov K.G., Ibodullayev M. Elektro-texnikaning nazariy asoslari. 1-qism. Darslik. – T.: “Fan va texnologiyalar” nashiryoti. 2015, - 320 b.
8. Amirov S.F., Yaqubov M.S., Jabborov N.G‘., Sattorov X.A., Balg‘ayev N.E. Elektrotexnikaning nazariy asoslaridan masalalar to‘plami. O‘quv qo‘llanma. – T.: “Adabiyot uchqunlari” nashiryoti. 2015, - 420 b.
9. Ibadullayev M. Nazariy elektrotexnika asoslari. Masala va mashqlar to’plami. I-qism. O‘quv qo‘llanma. – T.: “O’zbekiston” nashiryoti. 2015, - 328 b.
10. Karimov A.S., Ibadullayev M., Abdullayev B. Elektrotexnikaning nazariy asoslari. 1-qism. Darslik. – T.: “Fan va texnologiyalar” nashiryoti. 2017, 324 b.
11. Alimxodjaev K.T., Abdullayev B., Abidov K.G. Nazariy elektrotexnika. 2-qism. Darslik. – T.: “Fan va texnologiyalar” nashiryoti, 2018, - 288 b.

12. Ibadullayev M.I., Abidov Q.G‘., Maxmadiyev G‘.M., Zaripov O.O. Nazariy elektrotexnika. O‘quv qo‘llanma. – T.: “Poligraf Super Servis” nashriyoti. 2020, - 154 b.
13. Abidov Q.G‘., Maxmadiyev G‘.M., Zaripov O.O. Nazariy elektrotexnika. O‘quv qo‘llanma. – T.: “Poligraf Super Servis” MChJ nashriyoti. 2020, 281 b.
14. Абидов К.Г., Нуралиев А.К., Зарипов О.О., Зарипова Ш., Нурматов Б.А., Теоретическая электротехника. Учебное пособие. – Карши.: Издательство “Intelekt”. 2021, - Стр.189.
15. Ibadullayev M., Tavbayev A., Yesenbekob A. Nazariy elektrotexnika masala va mashqlar to‘plami. I-qism. O‘quv qo‘llanma. – T.: “O’zbekiston xalqaro islom akademiyasi” nashriyot-matbaa birlashmasi. 2022, - 328 b.
16. Karimov A.S., Ibadullayev M., Abidov K.G. Nazariy elektrotexnika. 3-qism. Darslik. – T.: “Ta’lim nashriyoti” MChJ. 2022, - 223 b.
17. Abdullayev B., Alimov A., Abduraimov E.X, Xalmanov D.X. Elektrotexnika va elektronika. Darslik. – T.: “Dilorom Biznes” MChJ nashiryoti. 2022, 326 b.

Qo‘shimcha adabiyotlar

18. Mirziyoev Sh.M. Buyuk kelajagimizni mard va olijanob xalqimiz bilan birga quramiz. Kitob. - T.: “O‘zbekiston” NMIU. 2017, - 477 b.
19. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining “2022-2026 yillarga mo‘ljallangan yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi 2022 yil 1-yanvar-dagi PF-60-sonli farmoni.
20. Демирчан К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. СПб. Питер. 2003, - Стр.463.
21. Коровкин Н.В., Селина Е.Е., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. Сборник задач. – СПб. Питер. 2006, - Стр.512.
22. Qodirov T.M., Alimov H.A., Rafiqova G.R. Sanoat korxonalari va fuqaro binolarining elektr ta’minoti. O‘quv qo‘llanma. – T.: “Cho‘lpon”. 2007.

23. Karimov X.G., Rasulov A.N., Taslimov A.D. Elektr tarmoqlari va tizimlar. O‘quv qo‘llanma. – T.: “Tafakkur qanoti”. 2015.
24. Karimov R.Ch., Rafiqova G.R. Elektr xavfsizligi asoslari. O‘quv qo‘llanma. – T.: “Spectrum Media Group” MChJ nashiryoti. 2015.

Internet saytlari

25. www.google.ru – xalqaro o‘quv materiallarining qidiruv sayti
26. www.ziyonet.uz – milliy o‘quv materiallarining qidiruv sayti
27. www.lex.uz – O‘zRes. Qonun hujjatlari ma’lumotlari milliy bazasi

M U N D A R I J A

KIRISH 3

1–BOB. ELEKTR VA MAGNIT MAYDON XUSUSIYATLARI, TOK VA KUCHLANISHLAR TAVSIFLARI

1.1. Zaryadlangan zarrachalar va elektromagnit maydon, elektr maydoning o‘tkazgichdagi tok bilan bog‘liqligi 6
1.2. O‘tkazuvchanlik, ko‘chirish va siljish toklari, tokning uzluksizligi . . . 12
1.3. Kuchlanish, potensiallar farqi, elektr yurituvchi kuch 21

2–BOB. ELEKTR ZANJIRLARINING ELEMENTLARI VA ASOSIY TUSHUNCHALARI

2.1. Elektr va magnit zanjirlari 33
2.2. Elektr zanjirlarining elementlari 35
2.3. Elektr zanjirlarining fizik xususiyatlari va elektr zanjirlarini sodalashtirish 37
2.4. Elektr zanjiri elementlaridagi tok, kuchlanish va EYuK larning shartli musbat yo‘nalishlari 49
2.5. EYuK va tok manbalari 53
2.6. Elektr zanjirlarining sxemalari 57
2.7. Elektr zanjiri sxemasining topologiyasi, sxema grafigi 63
2.8. Elektr zanjirlarining tahlili va sintezi 66

3–BOB. O‘ZGARMAS TOK ELEKTR ZANJIRLARINI TAHLIL QILISHDA ASOSIY QONUNLAR VA USULLAR

3.1. Elektr zanjirlar uchun Kirxgof va Om qonunlari 70
3.2. Oddiy elektr zanjirlari uchun om va kirxgof qonunlarini qo‘llash 76
3.3. Kirxgof qonunlarini tatbiq etish 82
3.4. Kirxgof qonunlari asosida tuzilgan tenglamalar to‘liqligi 85
3.5. Superpozisiya (ustlash yoki jamlash) prinsipi 88
3.6. Kompensasiya usuli 91
3.7. Chiziqlilik prinsipi 93
3.8. Ekvivalent generator usuli 95
3.9. Kontur toklar va tugun potensiallari usullari 99
3.10. O‘zarolik prinsipi 109
3.11. Elektr zanjir sxemalarida «Uchburchak» ulashdan ekivalent «Yulduz» ulashga va aksincha o‘tkazish tenglamalari 110

4–BOB. O‘ZGARUVCHAN TOK ZANJIRLARI

4.1. Umumiy tushunchalar 117

4.2. Rezistor va kondensatorli zanjirda o‘zgaruvchan tok 121
4.3. Davriy miqdor ta’sir etuvchi (effektiv) qiymati 125
4.4. Induktivlik va rezistori bo‘lgan zanjirda o‘zgaruvchan tok 126
4.5. Induktivlik, sig‘im va rezistorli zanjirda o‘zgaruvchan tok 128
4.6. O‘zgaruvchan tok zanjiri uchun Kirxgof qonunlari 132
4.7. Oddiy garmonik funksiyalar ustida matematik amallar, geometrik usul 134
4.8. Kompleks (simvolik) usul 136
4.9. Kompleks tekislikda to‘g‘ri chiziq tenglamasi 146

5-BOB. TARKIBIDA L, R, C BO‘LGAN CHIZIQLI O‘ZGARUVCHAN TOK ZANJIRI NAZARIYASI VA HISOBLASH USULLARI

5.1. Elektr zanjiri tenglamalarining kompleks shakldagi ko‘rinishlari 148
5.2. Kompleks tekislikda potensial diagramma 157
5.3. O‘zgaruvchan tok zanjirida quvvat 160
5.4. Energiyaning uzatilishi 169

6-BOB. REZONANS, CHASTOTAVIY TAVSIF VA UZATISH FUNKSIYASI

6.1. Elektr zanjirlarida rezonans hodisalarining tahlili 179
6.2. Kuchlanishlar rezonansi 180
6.3. Toklar rezonansi 188
6.4. Chastotaviy tavsiflar 190
6.5. Zanjir elementlarining chastotaviy tavsiflari 198
6.6. Zanjirning uzatish funksiyasi 211

7-BOB. ELEKTR ZANJIRLARIDA O‘ZARO INDUKTIVLIK

7.1. O‘zaro induktiv bog‘langan elementli zanjirlar 214
7.2. Induktiv bog‘langan zanjirlarni xususiyatlari 230
7.3. Chiziqli transformator 233
7.4. Ikki magnit bog‘langan konturlarda rezonans 246

8-BOB. UCH FAZALI ZANJIRLAR

8.1. Ko‘p fazali zanjirlar 249
8.2. Uch fazali simmetrik generator 253
8.3. Simmetrik uch fazali zanjir 257
8.4. Uch fazali simmetrik zanjirlar quvvati 262
8.5. Uch fazali liniyalarda energiya uzatish 266
8.6. Uch fazali liniya induktivligi 269
8.7. Uch fazali transformator 274
8.8. Aylanuvchi magnit maydon, asinxron va sinxron motorlar 276

8.9. Statik yuklangan uch fazali nosimmetrik zanjir 280
8.10. Nosimmetrik uch fazali zanjirlarning simmetrik tashkil etuvchilari . . 285

GLOSSARIY 292
ILOVALAR 297
FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR 304

О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ 3

ГЛАВА 1. СВОЙСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ПОНЯТИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

1.1. Заряженные частицы и электромагнитное поле, зависимость электрического поля от тока в проводнике 6
1.2. Токи проводимости, смешения и переноса, непрерывность тока . . 12
1.3. Напряжение, разница потенциалов, электродвижущая сила 21

ГЛАВА 2. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

2.1. Электрические и магнитные цепи 33
2.2. Элементы электрических цепей 35
2.3. Физические свойство электрических цепей, упрощение электрических цепей 37
2.4. Условные положительные направления тока, напряжения и электродвижущая сила на элементах электрических цепей 49
2.5. Источники электродвижущая сила и тока 53
2.6. Схемы электрических цепей 57
2.7. Топология схем электрических цепей, схема графов 63
2.8. Анализ и синтез электрических цепей 66

ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И МЕТОДЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1. Законы Кирхгофа и Ома для электрических цепей 70
3.2. Применение законов Кирхгофа и Ома для простых электрических цепей 76
3.3. Применение законов Кирхгофа 82
3.4. Полнота уравнений составленных по законам Кирхгофа 85
3.5. Принцип суперпозиции (наложения) 88
3.6. Принцип компенсatsii 91
3.7. Принцип линейности 93
3.8. Метод эквивалентного генератора 95
3.9. Методы контурных токов и узловых потенциалов 99
3.10. Принцип взаимности 109
3.11. Уравнения схемах электрических цепей для перехода от соединения «треугольник-звезда» к эквивалентному соединению «звезда-треугольник» 110

ГЛАВА 4. ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

4.1. Общие понятия 117
4.2. Переменный ток в цепи с резистором и конденсатором 121
4.3. Действующее (эффектив) значение периодических величин 125
4.4. Переменный ток в цепи с резистором и индуктивностью 126
4.5. Переменный ток в цепи с индуктивностью, резистором и конденсатором 128
4.6. Законы Кирхгофа для цепи переменного тока 132
4.7. Математические operatsii с простыми гармоническими функциями, геометрический метод 134
4.8. Комплексной (символический) метод 136
4.9. Уравнения прямой на комплексной плоскости 146

ГЛАВА 5. ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СОДЕРЖАЩИЙ *L, R, C*

5.1. Уравнения электрической цепи в комплексной форме 148
5.2. Потенциальная диаграмма на комплексной плоскости 157
5.3. Мощность в цепи переменного тока 160
5.4. Передача энергии 169

ГЛАВА 6. РЕЗОНАНС, ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ

6.1. Анализ резонансных эффектов в электрических цепях 179
6.2. Резонанс напряжений 180
6.3. Резонанс токов 188
6.4. Частотные характеристики 190
6.5. Частотные характеристики элементов электрической цепи 198
6.6. Передаточная функция цепи 211

ГЛАВА 7. ВЗАИМНАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

7.1. Цепи с индуктивно связанными элементами 214
7.2. Особенности индуктивно связанных цепей 230
7.3. Линейные трансформаторы 233
7.4. Резонанс в двух магнита связанных контурах 246

ГЛАВА 8. ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ

8.1. Многофазные цепи 249
8.2. Симметричный трехфазный генератор 253

8.3. Симметричная трехфазная цепь 257
8.4. Мощность трехфазной симметричной цепи 262
8.5. Передача энергии по трехфазной линии 266
8.6. Индуктивность трехфазной линии 269
8.7. Трехфазный трансформатор 274
8.8. Вращающееся магнитное поле. Асинхронные и синхронные моторы 276
8.9. Несимметричная трехфазная цепь при статической нагрузке 280
8.10. Симметричные составляющие несимметричной трехфазной цепи 285

ГЛОССАРИЙ 292
ПРИЛОЖЕНИЯ 297
ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА 304

C O N T E N T S

INTRODUCTION 3

CHAPTER 1. PROPERTY ELECTRIC AND A MAGNETIC FIELD, CONCEPT OF A CURRENT AND PRESSURE

1.1. The charged particles and electromagnetic field, dependence of electric field from current in a conductor 6
1.2. Currents of conductivity, mixture and carrying over, current continuity 12
1.3. Voltage, difference of potentials, electromotive power 21

CHAPTER 2. ELEMENTS OF ELECTRIC CHAINS AND THE BASIC CONCEPTS

2.1. Electric and magnetic chains 33
2.2. Elements of electric chains 35
2.3. Physical properties of electric chains, simplification of electric chains 37
2.4. Conditional positive directions of a current, voltage and electromotive power on elements of electric chains 49
2.5. Sources electromotive power and a current 53
2.6. Schemes of electric chains 57
2.7. Topology of schemes of electric chains, the scheme of counts 63
2.8. The analysis and synthesis of electric chains 66

CHAPTER 3. ORGANIC LAWS AND METHODS FOR THE ANALYSIS OF ELECTRIC CHAINS OF A DIRECT CURRENT

3.1. Laws Kirchhoff and Ohms for electric chains 70
3.2. Application of Kirchhoff law and Ohms for simple electric chains . . . 76
3.3. Application of Kirchhoff laws 82
3.4. Completeness of the equations made under Kirchhoff laws 85
3.5. Principle of superposition 88
3.6. Principle of compensation 91
3.7. Principle of linearity 93
3.8. Method of the equivalent generator 95
3.9. Methods of planimetric currents and nodal potentials 99
3.10. Principle of reciprocity 109
3.11. The equations schemes of electric chains for transition from connection "triangle-star" to equivalent connection «a star-triangle» 110

CHAPTER 4. CHAINS OF ALTERNATING CURRENT

4.1. The general concepts 117

4.2. Alternating current in a chain with the resistor and the condenser 121
4.3. Operating (effektiv) value of periodic sizes 125
4.4. Alternating current in a chain with the resistor and inductance 126
4.5. Alternating current in a chain with inductance, the resistor and the condenser 128
4.6. Law of Kirchhoff for an alternating current chain 132
4.7. Mathematical operations with simple harmonious functions, a geometrical method 134
4.8. Complex (symbolical) method 136
4.9. The straight line equations on a complex plane 146

CHAPTER 5. THE THEORY AND METHODS OF CALCULATION OF LINEAR CHAINS OF AN ALTERNATING CURRENT CONTAINING L, R, C

5.1. The equations of an electric chain in the complex form 148
5.2. The potential diagramme on a complex plane 157
5.3. Capacity in an alternating current chain 160
5.4. Transmission of energy 169

CHAPTER 6. RESONANCE, FREQUENCY CHARACTERISTICS AND TRANSFER FUNCTIONS

6.1. The analysis of resonant effects in electric chains 179
6.2. Resonance of voltage 180
6.3. Resonance of currents 188
6.4. Frequency characteristics 190
6.5. Frequency characteristics of elements of an electric chain 198
6.6. Transfer function of a chain 211

CHAPTER 7. MUTUAL INDUCTANCE IN AN ELECTRIC CHAIN

7.1. Chains with it is inductive the connected elements 214
7.2. Features it is inductive the connected chains 230
7.3. Linear transformers 233
7.4. Resonance in two magnets the connected contours 246

CHAPTER 8. THREE-PHASE CHAIN

8.1. Multiphase chains 249
8.2. The symmetric three-phase generator 253
8.3. The symmetric three-phase chain 257
8.4. Capacity of a three-phase symmetric chain 262
8.5. Transmission of energy on a three-phase line 266

8.6. Inductance of a three-phase line 269
8.7. The three-phase transformer 274
8.8. Rotating magnetic field. Asynchronous and synchronous motors 276
8.9. Asymmetrical three-phase chain at static loading 280
8.10. Symmetric components of an asymmetrical three-phase chain 285

GLOSSARY 292
APPLICATIONS 297
REFERENCES 304

NAZARIY ELEKTROTEXNIKA

Muharrir: S.T.Xashimov
Musahhih: H.Zakirova
Sahifalovchi: A.Hidoyatov
Dizayner: A.Abdiahodov

Nashriyot litsenziyasi AI № 3676, 24.12.2020. Ofset qog‘ozi. Bosishga ruxsat etildi 23.12.2023. Format 60x84 1/16. Garnitura «Times New Roman». Bosma taboq 20.0 Adadi 200 nusxa. Buyurtma №23.

«SHUHRAT MATBUOT-SERVIS» mas’uliyati cheklangan jamiyati.
Toshkent shahri, Uchtepa tumani Farhod ko‘chasi 58-uy