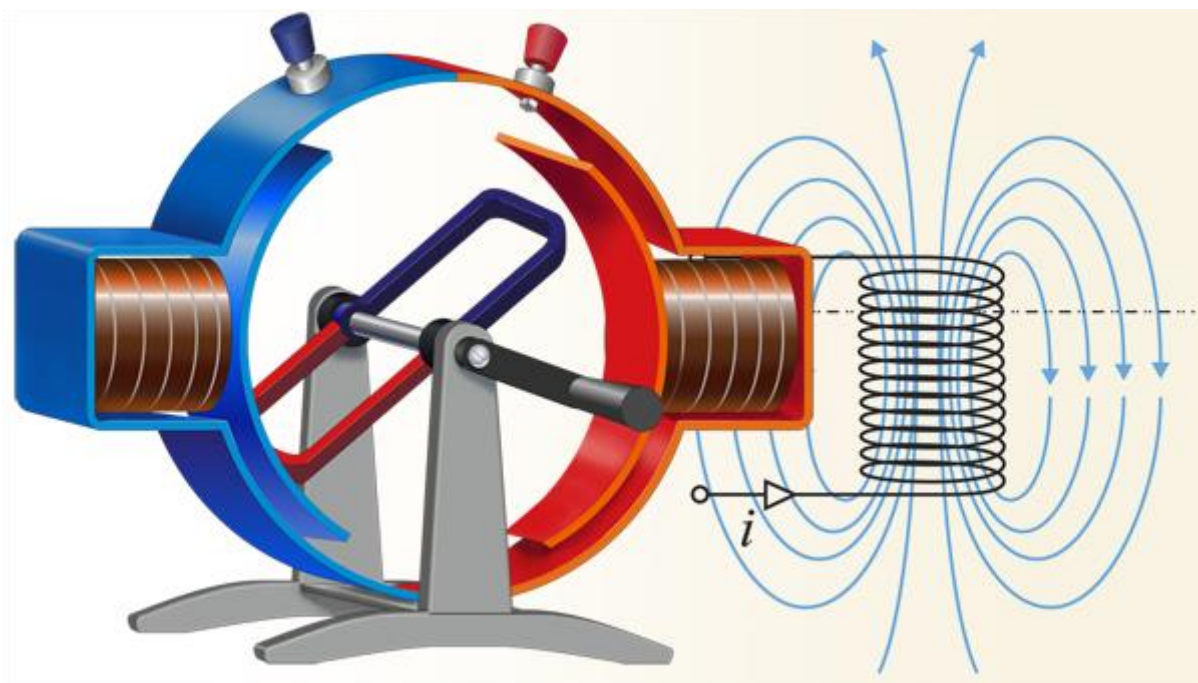
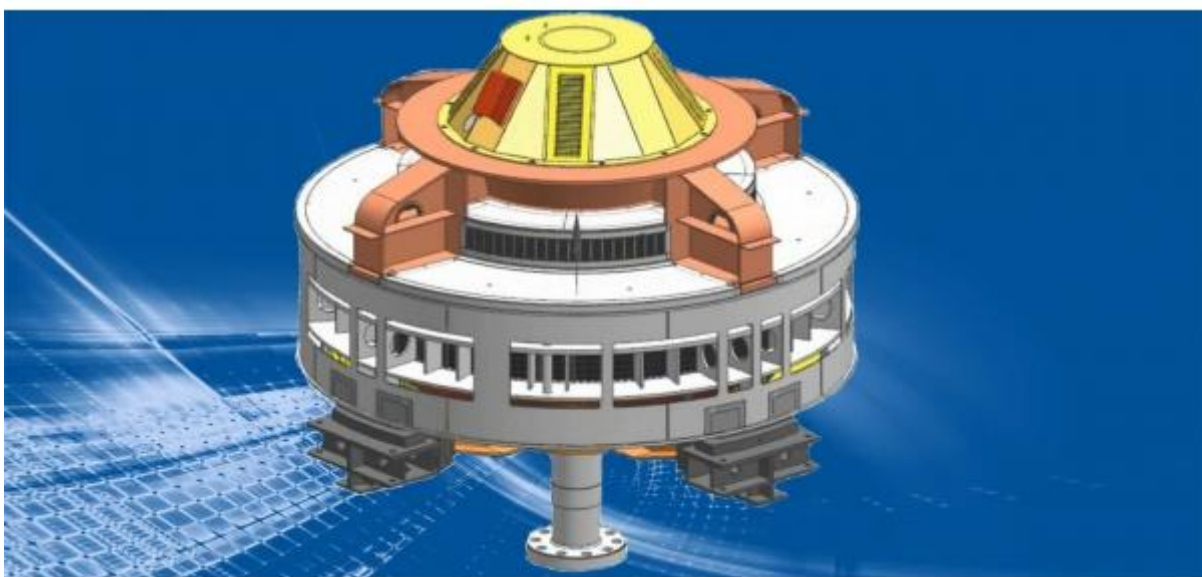


Sadullaev N.N., Pirmatov N.B.



ANALITIK ELEKTROMEXANIKA



Toshkent -2020

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

Бухоро муҳандислик –технология институти

Sadullaev N.N., Pirmatov N.B.

ANALITIK ELEKTROMEXANIKA

*(5A310701-Elektr mexanikasi (tarmoqlar bo'yicha) magistratura
mutaxassisligida tahsil olayotgan talabalar uchun o'quv qo'llanma)*

TOSHKENT - 2020

UO‘K: 621.313.
КБК

Analitik elektromexanika. Sadullaev N.N., Pirmatov N.B. - O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta’lim vazirligi - T.: «Fan va texnologiya», 2020. - 273 bet. ISBN:

Mazkur o‘quv qo‘llamada elektr mexanikasi sohasida analitik tadqiqotlarni o‘tkazish metodlari va bu tadqiqotlar natijalarini qayta ishlash metodlari bayon qilingan. Energiyani elektr mexanik o‘zgartirish jarayonlarini elektrotexnika va elektr mexanikasi qonunlari asosida zamonaviy matematik hisoblash usullaridan foydalanib tahlil qilish, matematik modellashirishni qo‘llab barqaror hamda dinamik jarayonlarni tahlil qilish usullari keltirilgan.

В этом учебном пособии описываются методы проведения аналитических исследований в области электромеханики, а также методы обработки результатов этих исследований. Изложены методы анализа электромеханического преобразования энергии на основе законов электротехники и электромеханики с использованием современных методов математического исчисления, а также методы анализа динамических и установившихся процессов с применением математического моделирования.

The methods of conducting analytical research in the field of electromechanics, as well as methods of processing the results of research are described in this tutorial. Methods for the analysis of electromechanical energy conversion, based on the laws of electrical engineering and electromechanics using modern methods of mathematical calculations, as well as methods for analyzing dynamic and steady processes using mathematical modeling are described.

© Sadullaev N.N., Pirmatov N.B. 2020
© «Fan va texnologiya», 2020

MUNDARIJA

Kirish. Elektr mexanikasi hozirgi holati va rivojlanishining istiqbolli yo'nalishlari.....	10
I-BOB. ANALITIK ELEKTROMEXANIKANING ASOSIY QONUNLARI VA TENGLAMALARI.....15	
1.1. Analitik elektr mexanikaning asosiy tushunchalari va tenglamalari.....	15
1.2. Elektr mashinalardagi issiqlik va gidravlik jarayonlarning tahlili.....	20
1.3. Elektr mexanikasining asosiy qonunlari va tushunchalari.....	29
1.4. Energiyani elektromexanik o'zgartirish jarayonlarini tadqiq etishda qo'llaniladigan differensial va integral tenglamalar.....	40
1.5. Elektr mashinalardagi elektromagnit jarayonlarini tadqiq qilishda Fure qatorlarini qo'llash.....	49
II-BOB. ELEKTROMEXANIK O'ZGARISH JARAYONLARINI TAHLIL QILISH MATEMATIK METODLARI.....62	
2.1. Energiyaning elektromexanik o'zgarishlarini tahlil qilishda vektorlar algebrasidan foydalanish.....	62
2.2. Elektromagnit maydonning vektor tahlil elementlari. Maksvell tenglamalari.	72
2.3. Energiyani elektromexanik o'zgarishlarini tahlil qilishda matritsali metodlarni qo'llash.....	83
2.4. Umumlashgan elektr mashinalar nazariyasi asoslari.....	91
2.5. Energiyani elektromexanik o'zgartirishda koordinatalarni almashtirish qoidalari.....	101
III-BOB. ELEKTROMEXANIK JARAYONLARNI TADQIQ QILISHDA MATRITSAVIY VA VEKTOR TAHLIL METODLARI.....108	
3.1. Elektr mashinalarni tadqiq qilishda vektor tahlilni qo'llash.....	108
3.2. Matritsali tahlil elementlari. Elektr mashinalar va transformatorlarning matritsali tenglamalari.	117
3.3. Tenzor algebra va tenzor tahlil to'g'risida umumiy ma'lumot	128
3.4. Elektromexanik tizimlarning asosiy tenglamalari. Lagranj –Maksvell tenglamasi.	135
IV-BOB. ELEKTR MASHINALARINING ISH HOLATLARINI TAHLIL QILISH METODLARI.....139	
4.1. O'zgaruvchan tok elektr mashinalarida aylanuvchan magnit maydonga ta'sir etuvchi omillar tahlili.....	139

4.2. Asinxron motorlarning asosiy xossalarning tahlili	147
4.3. Ozgaruvchan tok elektr mashinalarining parametrlarini aniqlash metodlari	153
4.4. Uch fazali asinxron motorlar yuklanish tavsiflari tahlili.....	164
4.5. Uch fazali sinxron motorning nominal kuchlanish va chastotadagi ish rejimlarining tahlili.....	171
4.6. Sinxron mashinalarning asosiy tavsiflari tahlili	175
4.7. Turbogeneratorning asinxron va anormal ish rejimlari tahlili	182

V-BOB. ELEKTROMEXANIKAVIY TIZIMLARNI TEXNIK - IQTISODIY KO'RSATKICHLARI TAHLILI.....

5.1. Elektr mashinalar energetik ko'rsatkichlari tahlili	188
5.2. Tezligi rostlanadigan elektr mashinalarning ish rejimlarini tahlili.....	197
5.3. Muqobil elektr energiyasi manbalarining generatorini takomillashtirish muammolari	208
5.4. Elektromexanik majmualar va tizimlar ish samaradorligining iqtisodiy ko'rsatkichlarini tahlili	218

VI-BOB. ELEKTR MASHINALARNI RAQAMLI MODELASHTIRISH ASOSLARI.....

6.1. Elektr mashinalarni kompyuterda modelashtirish asoslari va vositalari.....	226
6.2. Modelashtirish natijalarini qayta ishlash va umumlashtirish metodlari.....	235
6.3. Elektr mashinalarni tadqiq qilishda foydalaniladigan kompyuter dasturlari..	242
6.4. ANSYS Electromagnetics suite dasturiy paketining imkoniyatlari tahlili.....	250
6.5. Elektr mashinalarni ANSYS Maxwell dasturida loyihalash asoslari.....	255
6.6. Elektr mashinalardagi dinamik jarayonlarni «matlab» dasturida tahlil qilish.	263
XULOSA	273
GLOSSARIY	275
ADABIYOTLAR	279

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. Современное состояние и перспективные направления развития электромеханики.....	10
ГЛАВА-I. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И УРАВНЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ.....	15
1.1.Основные понятия и уравнения аналитической электромеханики.....	15
1.2.Анализ тепловых и гидравлических процессов электрических машин...	20
1.3.Основные понятия и законы электромеханики.....	29
1.4.Дифференциальные и интегральные уравнения используемые при исследованиях электромеханического преобразования энергии.....	40
1.5.Применение рядов Фурье при исследованиях электромагнитных процессов электрических машин.....	49
ГЛАВА-II. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ...	62
2.1. Использование векторной алгебры при анализе электромеханического преобразования энергии	62
2.2. Элементы векторного анализа электромагнитного поля.....	72
2.3. Применение матричного метода при анализе электромеханического преобразования энергии.....	83
2.4. Основы теории обобщенной электрической машины.....	91
2.5. Координатные преобразования уравнений электромеханического преобразования энергии.....	101
ГЛАВА-III. МАТРИЧНЫЕ И ВЕКТОРНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ..	108
3.1. Применение векторного анализа при исследованиях электрических машин	108
3.2. Элементы матричного анализа. Матричное уравнение электрической машины и трансформатора.....	117
3.3. Основы тензорной алгебры и тензорного анализа	128
3.4. Основные уравнения электромеханических систем. Уравнения Лагранжа-Максвелла.....	135
ГЛАВА-IV. МЕТОДЫ АНАЛИЗА РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.....	139

4.1. Анализ воздействующих факторов на вращающееся магнитное поле электрических машин переменного тока.....	139
4.2. Анализ основных свойств асинхронного двигателя.....	147
4.3. Методы определения параметров электрических машин переменного тока.....	153
4.4. Анализ нагрузочных характеристик трехфазных асинхронных двигателей.....	164
4.5. Анализ рабочих режимов асинхронного двигателя при номинальном напряжении и частоте тока	171
4.6. Анализ основных характеристик синхронной машины	175
4.7. Анализ асинхронного и аномального режимов работы турбогенераторов.....	182
ГЛАВА-V. АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	
5.1. Анализ энергетических показателей электрических машин.....	188
5.2. Сравнительный анализ показателей эффективности регулируемых электрических машин.....	197
5.3. Проблемы совершенствования генераторов альтернативных источников энергии машин	208
5.4. Анализ экономических показателей эффективности работы электромеханических систем и комплексов.....	218
ГЛАВА-VI. ОСНОВЫ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.....	
6.1. Основы и средства компьютерного моделирования электрических машин	226
6.2. Методы обработки и обобщения результатов моделирования	235
6.3. Компьютерные программы используемые при исследованиях электрических машин.....	242
6.4. Анализ возможностей программного пакета ANSYS Electromagnetics suite.....	250
6.5. Основы проектирования электрических машин в среде ANSYS Maxwell.....	255
6.6. Анализ динамических процессов электрических машин в среде «matlab»	263
Заключение.....	273
Глоссарий	275
Литература	279

CONTENTS

INTRODUCTION. Current state and perspective directions of development of electromechanics.....	10
CHAPTER I. FUNDAMENTAL LAWS AND EQUATIONS OF ANALYTICAL ELECTROMECHANICS.....	
1.6. Basic concepts and equations of analytical electromechanics.....	15
1.7. Analysis of thermal and hydraulic processes of electrical machines.....	20
1.8. Basic concepts and laws of electromechanics.....	29
1.9. Differential and integral equations used in studies of electromechanical energy conversion.....	39
1.10. Application of Fourier series in studies of electromagnetic processes of electric machines.....	48
CHAPTER II. MATHEMATICAL METHODS OF RESEARCH OF PROCESSES OF ELECTROMECHANICAL CONVERSION.....	
2.1. Application of the vector algebra in the analysis of electromechanical energy conversion	60
2.2. Elements of vector analysis of the electromagnetic field.....	70
2.3. Application of the matrix method in the analysis of electromechanical energy conversion.....	81
2.4. Fundamentals of the theory of a generalized electric machine.....	88
2.5. Coordinate transformations of the equations of electromechanical energy conversion.....	97
CHAPTER III. MATRIX AND VECTOR METHODS OF ANALYSIS OF ELECTROMECHANICAL CONVERSION PROCESSES.....	
3.1. Application of the vector analysis in studies of electrical machines.....	104
3.2. Elements of matrix analysis. Matrix equation of electric machine and transformer.....	112
3.3. Fundamentals of tensor algebra and tensor analysis.....	123
3.4. The basic equations of electromechanical systems. Lagrange-Maxwell equations.....	129
CHAPTER IV. METHODS OF ANALYSIS OF OPERATING MODES OF ELECTRIC MACHINES.....	
4.1. Analysis of factors affecting on rotating magnetic field of AC electric machines.....	133

4.2. Analysis of the main characteristics of asynchronous motor.....	141
4.3. Methods for determining the parameters of AC electric machines.....	147
4.4. Analysis of load characteristics of three-phase asynchronous motors.....	157
4.5. Analysis of operating modes of asynchronous motor at rated voltage and current frequency	164
4.6. Analysis of the main characteristics of synchronous machine	167
4.7. Analysis of asynchronous and abnormal modes of operation of turbogenerators.....	174

CHAPTER V. ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS.....180

5.1. Analysis of energy coefficient of electrical machines	180
5.2. Comparative analysis of efficiency indexes of regulated electric machines..	188
5.3. Problems of improving the generators of alternative energy sources of machines.....	200
5.4. Analysis of economic performance indicators of electromechanical systems and complexes.....	209

CHAPTER VI. FUNDAMENTALS OF DIGITAL MODELING OF ELECTRIC MACHINES.....218

6.1. Fundamentals and tools of computer modeling of electrical machines....	218
6.2. Methods for processing and summarizing of results of modeling.....	227
6.3. Computer programs used in research of electrical machines.....	233
6.4. Analysis of features of ANSYS Electromagnetics suite software.....	242
6.5. Fundamentals of designing electrical machines in ANSYS Maxwell environment	246
6.6. Analysis of dynamic processes of electric machines in “MATLAB” environment	254
Conclusion	264
Glossary	268
References	272

Kirish. Elektr mexanika hozirgi holati va rivojlanishining istiqbolli yo'nalishlari.

Elektr energetikasi mamlakat iqtisodiyotining asosiy tayanchlaridan biri bo'lib uning rivojlanishi xalq xo'jaligini barqaror o'sishini ta'minlaydi va xalq faravonligini belgilovchi asosiy omillardan biri hisoblanadi. Mamlakatimizda ishlab chiqarilayotgan elektr energiyasining deyarli barchasini va elektr energiyasi istemolchilarining asosiy qismini elektr mashinalariga to'g'ri kelmoqda. Energiya resurslardan oqilona foydalanish orqali mahsulot tannarxini kamaytirish ishlab chiqarilayotgan mahsulotimizni tashqi va ichki bozordagi raqobatbardoshligini oshirish asosiy yo'llaridan biridir. Bu vazifani hal qilishning yana bir asosiy yo'llaridan biri energiya samaradorligi yuqori energiya manbalaridan foydalanib, texnologik mashinalarning ish samaradorligini oshirish hisoblanadi. Bu o'z navbatida elektr mashinalari konstruksiyasini, ularni boshqaruv tizimini yanada takomillashtirish bo'yicha tadqiqotlar olib borishni taqozo qiladi [1]. Yuqoridagi dolzarb vazifalar elektr mashinalar muammolarini tadqiq etish malakasiga ega bo'lgan mutaxassislarni tayyorlash masalasini ilgari suradi. Bu vazifani amalga oshirishda "Analitik elektromexanika" fani muhim o'rinni egallaydi va fanning predmeti aynan shu masalalar yechimiga yo'naltirilgan.

Hozirgi kunda hukumatimiz tomonidan iqtisodiyotimizda o'tkazilayotgan islohotlarning ustuvor yo'nalishlaridan biri innovatsiyalarga asoslangan raqamli iqtisodiyotni qurish bo'lib unda elektr energetikasi tizimini energiya samaradorlik mezoni asosida modernizatsiyalashga alohida e'tibor berilgan. Oxirgi yillarda hukumatimiz tomonidan bu sohani rivojlantirish bo'yicha ko'plab me'yoriy-huquqiy hujjatlar qabul qilindi va amaliyotga joriy etildi. Bu qonun va harorlarda elektr energetikasi tizimini modernizatsiya qilishning ustuvor yo'nalishlari sifatida ishlab chiqarishda energiya samaradorligini oshirish, zamonaviy axborot – kommunikatsiya texnologiyalarini qo'llash orqali energiya iste'moli jarayonlarini avtomatlashtirish va muqobil energiya manbalaridan foydalanish salmog'ini oshirish vazifalari belgilab berildi. Ekologik muhitga ta'sir ko'rsatish darajasi

bo'yicha energetika va sanoat salmoqli o'rinni egallaydi. Ekologik toza energiya manbalaridan foydalanish salmog'ini oshirish hozirgi kunning muhim vazifalaridan biri hisoblanadi [1]. Energiya ist'emolida sanoat muhim o'rinni egallaydi. Sanoat korxonalarida elektr energiyasi ist'emolining 80-90 foizi elektr mexanik majmualar va tizimlarga (elektr mashinalar, o'zgartgichlar va h.k.) to'g'ri keladi. Bu qurilmalarni tadqiq qilish metodlarini o'rganish muhim ahamiyatga ega bo'lgan amaliy vazifa hisoblanadi.

"Analitik elektromexanika" fani "Elektr mexanikasi" mutaxassisligining integrallashgan kursi bo'lib, elektr mashinalari va kuch transformatorlarining o'ziga xos xususiyatlarini hisobga olgan holda ta'lim, fan, texnika, texnologiya va ishlab chiqarishning "Elektr mexanikasi" sohasidagi yutuqlarni o'rgatuvchi fandır. Bu fanning vazifasi energiyani elektromexanik o'zgartgichlarning ish rejimlarini matematikaning zamonaviy metodlari asosida tahlil qilib, ulardan chiqarilgan to'g'ri xulosani amaliyotga tatbiq qilish yo'llarini o'rgatadi.

Elektromexanikaning hozirgi holati katta quvvatli an'anaviy energetikani va muqobil energetikaning raqobatda rivojlanishi bilan tavsiflanadi. Energetika sanoatni, transportni va boshqa sohalarning rivojini belgilovchi ilmiy-texnik taraqqiyotining doimiy asosidir. Yangi ekologik toza energetikada (shamol elektr stansiyalari, suvning ko'tarilishi va geotermal energoqurilmalar, turbina siklli quyosh elektr stansiyalari) elektromexanikaning roli tez yuksalmoqda [2].

Elektr mexanikasi elektronika bilan integratsiyasi, past va yuqori temperaturali o'ta o'tkazuvchan elektr mashinalarini ishlab chiqarishdagi, katta tezlikli elektr transporti uchun chiziqli elektr motorlarini qo'llash va energiyani elektromexanik o'zgartgichning yangi turlarini yaratish va boshqa muvaffaqiyatlari tufayli o'zining an'anaviy chegaralarini kengaytirmoqda [3].

Hozirgi vaqtda katta energetikada ishlatiladigan elektromagnit qo'zg'atgichli sinxron mashinalarning sovitish tizimi modernizatsiya qilingan yangi turlari (masalan, vodorod o'rniga suv bilan to'la sovitish, ayrim turbogeneratorlarda oddiy qavo bilan sovitishning yangi konstruksiyasini ishlatish, magnitlanish o'qi burila-

digan asinxronlashtirilgan sinxron generatorlarni ishlab chiqib, ularni amalda qo'llash va boshq.) tufayli sinxron mashinalar taraqqiy etmoqda.

Elektr mexanikasining amaliy yo'nalishlari rivojlanishining istiqbollari raqamli texnologiyalar bilan uzviy bog'langan [4]. Elektromexanikaning taraqqiy qilinishiga o'ta o'tkazgichli sinxron mashinalar va kuch transformatorlarini amalga kiritish bilan bo'lgan muammolarning yechimini topish dolzarb masalalardan hisoblanadi [5].

Elektromexanik olimlar va muhandislar oldida quyidagi masalalar va ularni yechish vazifalari turibdi:

- boshqariladigan kuch elektronikasining yangi avlodi bilan elektr mashinalari integrallashuvining zarurligi;
- yuqori temperaturali o'ta o'tkazgich chulg'amli elektr mashinalar va kuch transformatorlarini rivojlantirish;
- quvvati uncha katta bo'lmagan sinxron mashinalar va o'zgarmas tok mashinalari uchun yana ham quvvatli va barqaror (bir xil turadigan) o'zgarmas magnitlar qo'llash;
- energiya tejamkor elektr mashinalarining yangi avlodini loyihalab ishlab chiqarishda qo'llash;
- avtomatika va robototexnika uchun elektr mashinalarlarini keyingi rivojlantirishning zarurligi.

Elektr mashinalar konstruksiyasini takomillashtirish va ulardan foydalanish samaradorligini oshirish bo'yicha ustivor yo'nalishlar sifatida quyidagilarni keltirish mumkin:

- ✓ elektr mashinalarining nominal kuchlanishi va quvvatini oshirish;
- ✓ sifati yuqori elektrotexnik materiallardan foydalanish;
- ✓ shamollatish tizimini takomillashtirish;
- ✓ elektr mashinalarning boshqaruv tizimini takomillashtirish;
- ✓ elektr mashinalarning hajmi va massasini kamaytirish;
- ✓ muqobil energiya manbalari FIKni oshirish va tannarxini kamaytirish.

Elektr mashinalarning kuchlanishi va quvvatini oshirish mashinalarning foydali ish koeffitsientini oshirish imkonini beradi [6]. Bu yuqori sifatli izolyatsiya materiallardan foydalanish, otkazuvchanligi yuqori o'tkazgichlardan foydalanish, shamollatish tizimini yaxshilash, chulg'amlarni ixcham o'rash texnologiyasini qo'llash orqali erishiladi. Kuchlanishni oshirish tokni va aktiv quvvat isroflarni kamaytirish imkonini beradi. Quvvatni oshirish sanoatni modernizatsiyalash talabi hisoblanadi.

Sifati yuqori elektrotexnik materiallardan foydalanish quyidagi yo'nalishlarda amalga oshirish mumkin:

- ✓ yuqori sifatli elektromagnit materiallardan foydalanish;
- ✓ induksiyasi yuqori bo'lgan doymiy magnitlarni yaratish;
- ✓ yuqori sifatli izolyatsiya materiallardan foydalanish;
- ✓ otkazuvchanligi yuqori o'tkazgichlardan foydalanish;
- ✓ sovitish tizimida foydalaniladigan xladogenlar sifatini jshirish;
- ✓ issiqlikni tez sochuvchi materiallar yaratish.

Shamollatish tizimini takomillashtirish quyidagi tadbirlar orqali amalga oshiriladi:

- ✓ elektr mashinalarning aktiv qismida issiqlik manbalarini kamaytirish;
- ✓ elektr mashinalarning konstruksiyasini takomillashtirish;
- ✓ sovitish tizimida foydalaniladigan xladogenlar sifatini jshirish;
- ✓ elektr mashinalar korpusida issiqlik o'tkazuvchanligi yuqori bo'lgan materiallardan foydalanish;
- ✓ elektr mashinalarda majburiy sovitish tizimlarini qo'llash;
- ✓ mexanik bog'lanishlarda ishqalanishni kamaytirish.

Elektr mashinalarning boshqaruv tizimini takomillashtirish asosan raqamli texnologiyalarni qo'llash orqali quyidagi tadbirlar orqali amalga oshiriladi:

- elektr mashinalarning boshqaruv tizimi bilan birlashtirilib mexatronika qurilmalari yaratiladi;

- Raqamli qurilmalardan hamda internet tarmog'idan foydalanib elektr yuritma imkoniyatlari kengaytiriladi;

- o'zgartkish texnikasidan foydalanib energiya samarador (tejamkor) elektr yuritmalarni yaratish;

- elektr yuritma ishchi organi harakati aniqligini va tezkorligini oshirish;

- boshqaruv tizimi orqali elektr yuritma ishonchligini oshirish.

- elektr mashinalarning hajmi va massasini kamaytirish quyidagi yo'nalishlarda amalga oshiriladi:

- elektr yuritma tizimini yagona korpusga yig'ib ixchamlashtirish;

- induksiyasi yuqori o'zgarmas magnit materiallarni qo'llash;

- cho'tka – kollektor tizimidan foydalanmaslik;

- elektr mashinalarda yuqori kuchlanishni qo'llash va quvvatini oshirish;

- yuqori sifatli elektrotexnik materiallardan foydalanish;

- shamollatish tizimini takomillashtirish.

Elektr mexanikasi rivojlanishining muhim sohalaridan biri bu qayta tiklanuvchan energiya manbalaridan (shamol elektr stansiyalari mini, mikro GESlar) foydalanib, ishlovchi generatorlarning samaradorligini oshirish. Bu generatorlarning aylanish tezligi odatda past bo'lib, ularning ishlash samaradorligini oshirish dolzarb muammolardan biri hisoblanadi.

2013 yil 1 martda "Muqobil energiya manbalarini yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida" O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni e'lon qilindi. Farmon 9 banddan iborat bo'lib O'zbekistonda muqobil energiya manbalarini rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlari va vazifalari ko'rsatib berilgan. Jumladan, muqobil manbalardan energiya ishlab chiqarish bo'yicha tajriba loyihalarini ishlab chiqarish va amalga oshirish, respublikada tegishli uskunalarni, butlovchi buyumlar va materiallarni ishlab chiqarish, shuningdek ularga servis xizmati ko'rsatishini tashkil qilish belgilab berilgan.

I-BOB. ANALITIK ELEKTROMEXANIKANING ASOSIY QONUNLARI VA TENGLAMALARI

1.1. Analitik elektr mexanikaning asosiy tushunchalari va tenglamalari

Kalit so'zlar: *elektr mexanika, analitik mexanika, ideal bog'lanish, moddiy nizim, noerkin tizim, nostasionar bog'lanish, stasionar bog'lanish, golonom bog'lanish, nogolonom bog'lanish, simvol metodi.*

“Analitik elektr mexanika” fani elektr mexanikasi sohasida analitik tadqiqotlarni o'tkazish metodlari va ular asosida olingan tadqiqot natijalarini tahlil qilish metodlarini o'rganadi. Analitik tadqiqotlar asosan elektrotexnika va elektr mexanikasi sohasidagi qonunlar asosida elektr mexanik o'zgartirish jarayonini tahlil qilish va matematik modellashirish orqali barqaror hamda dinamik jarayonlarni tahlil qilishdan iborat bo'ladi.

Analitik elektr mexanika fani mexanikaning va elektrotexnika fanining asosiy tushunchalariga tayanadi. *Analitik mexanika* ideal bog'lanishlar reaksiyasini kiritmagan holda harakatning differensial tenglamalarini tuzishga yordam beradigan umumiy metodlarni beradi [13,22]. Moddiy nuqtalarning majmuasi *moddiy tizim* deyiladi. Moddiy tizimning nuqtalari orasida ichki kuchlar mavjud bo'ladi.

Agar moddiy tizimning har birta nuqtasi fazoda har qanday holatni egallashi va har qanday tezlikka ega bo'lishi mumkin bo'lsa, bunday moddiy tizim *erkin tizim deyiladi*, bu shartlar bajarilmagan holda *noerkin tizim deyiladi*.

Moddiy tizimning nuqtalari fazoda ixtiyoriy holatni egallashiga va ixtiyoriy tezlikka ega bo'lishiga imkon bermaydigan cheklanishlar (sharoitlar) *bog'lanishlar deyiladi* (ular tutib qoluvchi va tutib qolmaydigan bo'lishi mumkin). Bog'lanish nuqtalar koordinatalari va tezliklari o'zgarishini cheklab qo'yadi. Analitik jihatdan bu cheklovlar tenglamalar yoki tengsizliklar ko'rinishda yoziladi.

Agar tutib qoluvchi bog'lanishlar tenglamasi $f(x_i, y_i, z_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i, t) = 0$ vaqt t ni o'z ichiga olsa *nostasionar bog'lanish* deyiladi, bog'lanish tenglamasi vaqt t ga bog'liq bo'lmaganda esa *stasionar bog'lanish* deyiladi. Agar tenglamasida koordinata bo'yicha hosilaga ega bo'lmasa, ya'ni $f(x_i, y_i, z_i, t) = 0$, bunday bog'lanishni *geometrik yoki golonom bog'lanish* deyiladi, agar birinchi tenglamadagi singari koordinata bo'yicha hosilaga ega bo'lsa, *integrallab bo'lmaydigan yoki nogolonom bog'lanish* deyiladi

Moddiy tizim nuqtalarining virtual (ya'ni bo'lishi mumkin bo'lgan) joyini o'zgartirishlar va virtual tezliklar to'g'risidagi tushunchalar analitik mexanikaning fundamental tushunchalaridan biridir.

Elektr mexanik tizimlar matematik o'zgartirishlar orqali keltirilgan elektr sxemalarga olib kelinadi va elektr zanjirlarni hisoblash usullari va qonunlaridan foydalaniladi. Bunda o'zgaruvchan tok zanjirlarini hisoblashda va tahlil qilishda qo'llaniladigan simvolli (kompleks) metoddan va vector diagrammalardan keng foydalaniladi.

O'zgaruvchan tok zanjirlarini vektor diagrammalari vositasi bilan kerakli aniqlikda hisoblab bo'lmaydi. Shuning uchun vektorlarni kompleks sonlar bilan ifodalab, elektr zanjiriga oid turli masalalarni kompleksli algebra vositasi bilan hal qilish elektrotexnikaning katta muvaffaqiyatlaridan hisoblanadi. O'zgaruvchan tok zanjirlaridagi sinusoidal miqdorlarni kompleks sonlar bilan ifodalab, ular orasidagi bog'lanishlarni algebra usullari bilan ko'rsatish yo'llari *simvol metod* deb ataladi.

Elektr zanjiri to'la qarshiligining kompleksi quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$Z = \bar{E} / \bar{I} = r + jx = Z \cdot e^{j\varphi}, \quad (1.1)$$

bunda $Z = \bar{E} / \bar{I}$ – to'la qarshilik kompleksining moduli; φ – uning argumenti bo'lib $\varphi = \arctg(X/R)$.

Kompleks miqdorlarni hisoblashda, ko'pincha ularni turli (Y – yulduz; Δ – uchburchak) shakllarda ko'rsatishga to'g'ri keladi. Qo'shish va ayirish amallarini kompleks miqdorlarning algebraik shaklida [$\bar{A} = a_1 + ja_2$], bundagi a_1 – haqiqiy

son, a_2 – mavhum son, bajarish qulay bo'lsa, ko'paytirish va bo'lish amallari, aksincha ularning darajali ($\bar{A} = A \cdot e^{j\alpha}$), bundagi A – kompleks sonning moduli, α – uning argumenti.

O'zgaruvchan tok elektr zanjiri uchun *Om qonuni* simvol shaklda quyidagicha yoziladi: $\bar{U} = \bar{I} \cdot Z \cdot e^{j\varphi} = \bar{I}Z$.

O'zgaruvchan tok zanjirlarini hisoblashning *simvolli metodiga* asoslangan turli usullari bor. Albatta barcha usullar elektr zanjiri qonunlariga asoslangan. Kirxgof qonunlari kompleks usulida quyidagicha yoziladi:

a) Kirxgofning 1-qonuni: Elektr zanjirining biror tuguni uchun sinusoidal toklarning yig'indisi nolga teng: $\sum \bar{I} = 0$.

b) Kirxgofning 2-qonuni: Sinusoidal EYuK ta'sir etuvchi va sinusoidal toklar bo'lgan berk konturlarda EYuK lar yig'indisi toklarning to'la qarshilikka ko'paytmasi yig'indisiga teng: $\sum \bar{E} = \sum \bar{I} Z$, bundagi tenglamaning chap tomoni – tashqaridan ta'sir etuvchi EYuK larning yig'indisi; tenglamaning o'ng tomoni – kuchlanish pasayishining yig'indisi).

Sinusoidal miqdorlar kompleks ravishda ifodalanganida ular bilan qilinadigan amallar algebra asosida bajariladi. Kirxgof qonunlaridagi yig'indilar ham algebra yig'indilari ravishida ishlatiladi.

Operatorli metod chiziqli differensial tenglamalarning yechimini algebraik tenglamalar tizimining yechimiga olib borishga imkon beradi. Metodning muhim ahamiyati shundaki, yechimi darhol topiladi va ixtiyoriy o'zgarmaslarni qo'shimcha hisoblashlarni talab qilmaydi. Operatorli metod vaqt bo'yicha o'zgarayotgan har bir $f(t)$ funksiyani qandaydir kompleks o'zgaruvchi $F(r)$ funksiya bilan mos qo'yishga imkon beradigan Laplas almatirishi [.

$\int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt = F(p)$] ga asoslangan. Bunga asosan funksiyalarning mos kelishi quyidagicha yoziladi: $f(t) \doteq F(p)$, (bunda $\doteq$ belgi moslik belgisi deyiladi. Vaqt bo'yicha o'zgarayotgan $f(t)$ funksiya [masalan, $i(t)$, $u(t)$, $e(t)$, $\psi(t)$] – “original”

deyiladi, unga mos qo'yiladigan kompleks argument $F(r)$ funksiyasi [masalan, $I(t)$, $U(t)$, $E(t)$, $\Psi(t)$] – “tasvir” deyiladi.

Elektr mashinalari nazariyasida Laplas almashtirishi o'rniga Karson–Xevisayd almashtirishi [integralga « r » ko'paytma bilan farq qiladi: $p \int_0^{\infty} f(t)e^{-pt} dt = F(p)$] qo'llaniladi. Bu almashtirishda tasvir va original bir xil o'lchamni ta'minlaydi.

Chastotali metod Fure integrali xossalariga va Laplas almashtirishlariga asoslangan. Bu metod bilan murakkab chiziqli tizimlarni tahlil qilishga imkon beradi. Masalan, o'zgaruvchan tok mashinalarida ko'p konturli rotordagi qator o'tish jarayonlarni hisoblashda, massivni hisobga olish va magnit zanjiri to'yinishini taxminiy aniqlash mumkin bo'ladi.

Soddalashtirilgan chastotali harakteristikalar bo'yicha fizik tizimning xossalarini baholash uchun samarali metodlar ishlab chiqilgan. Berilgan differensial tenglamalar tizimining harakteristik tenglamalari ildizlarini bilib, amplitudaviy va fazaviy harakteristikalarni tezda baholash yoki logarifmik amplitudaviy harakteristika bo'yicha harakteristik tenglama ildizlarining taxminiy qiymatini oson aniqlash mumkin. Demak, murakkab ekvivalent sxema bilan harakterlanadigan elektr mashinalarning holatini (xossasini) tezda aniqlashga imkon beradi.

Aylanayotgan elektr mashinalarini tarmoqqa ulashda va qisqa tutashuvga o'tish paytidagi toklar chastotali harakteristika parametrlari va ekvivalent sxemaning o'tish funksiyasi bilan bevosita bog'langan bo'ladi.

Chastotali harakteristikalarni tajribaga olishning quyidagi metodlari ma'lum:

a) berilgan kuchlanishning chastotasi va amplitudasi o'zgarmas bo'lganda mashinalarning asinxron rejimidan tokning geometrik o'rinlari (godografi)ni olish. Tok godografini tahlil qilish va stator parametrlarini ajratish rotor parametrlarini sirpanishga nisbatan funksiyasini (o'zgarishini) aniqlashga imkon beradi;

b) qo'zg'almas rotorda statorga o'zgaruvchan chastotali kuchlanish berish yo'li bilan chastota karakteristikasini olib, so'ngra stator va rotor parametrlarini taqsimlash;

c) qo'zg'almas qisqa tutashgan rotorda statorga o'zgarmas tok berib tok godografini olib, so'ngra tokning so'nish egriligini ossillolografga tushirish.

Eksponenta tashkil etuvchilarini ajratish bilan tok egriligini tahlil qilish mashinalarning parametrlarini aniqlashga imkon beradi. Chastotali harkteristika metodi sinxron va asinxron mashinalari rotorlarining murakkab zanjirlari parametrlari tadqiqot o'tkazishda katta ahamiyatlidir. Elektr mashinalarining havo oralig'i magnit maydonini tahlil qilishga asoslangan eksperimental metod bo'layotgan asosiy jarayonga oid to'la ma'lumot beradi.

Analitik elektrmexanika fanining asosiy tadqiqot usullaridan biri bu elektr mexanik jarayonlarni modellashtirish hisoblanadi. Elektr mashinalarni nazariy tadqiqotlarida matematik modellashtirishdan keng foydalaniladi. Bunda o'rganilayotgan ob'ekt uchun, avvalo, matematik model quriladi. U ma'lum fundamental modellarga asoslanadi. Hisoblash tajribasining keyingi sikllarida modelga aniqlik kiritiladi, yangi omillar hisobga olinadi va h.k. Matematik model amaliy matematikaning an'anaviy usullarida ko'rib bo'lganidan so'ng matematik model oraliq tadqiqotdan o'tkaziladi. Matematik model oraliq sinovdan o'tkaziladi. Matematik modelni oraliq sinovdan o'tkazishning asosiy mazmuni nisbatan sodda (model), masalan, ularni ajratib har tomonlama o'rganishdan iborat. Hisoblash tajribasining keyingi bosqichida diskret masalasi hamda ushbu diskret masalani yechishning sonli usuli quriladi.

Har qanday fizik ob'ekt kabi elektr mashinalarni modellashtirishda ham umumiy modellashtirish usullaridan foydalaniladi. Modellashtirish usullari 2 ga bo'linadi: fizik modellashtirish va matematik modellashtirish. Fizik modellashtirishda o'rganilayotgan ob'ektning o'lchamlari o'zgargan (kichraytirilgan yoki kattalashtirilgan) ammo, ob'ekt xossalarini qisman yoki to'la o'zida mujassamlagan, ko'rinishi o'xshash ob'ektlar tushuniladi.

Modellashtirishning ikkinchi ko‘rinishi matematik modellashtirish bo‘lib o‘rganilayotgan ob‘ektning xossalari matematik ifodalar bilan olingan egriliklar, diagrammalar va h.k. lar bilan namoyish etiladi [9]. Matematik modellashtirishning keyingi bosqichi bu kompyuter modeli bo‘lib 2 turga: analogli va raqamli modellashtirishga bo‘linadi.

Analogli modellashtirish analogli hisoblash mashinalarida amalga oshiriladi. Bunda andazaviy matematik ifodalar elektron sxemalar orqali ifodalanadi. Bu sxemalarni chiqish signali matematik ifoda yechimi bo‘ladi. Raqamli modellashtirishda sonli hisoblash usullardan foydalaniladi. Jumladan, sonli differensiallash va sonli integrallash usullaridan foydalaniladi. Tenglamalar yechimi ham raqamlar ko‘rinishida olinadi. Raqamli modelashda matematika qonunlariga asoslanadi.

Nazorat savollari:

1. ideal bog‘lanish nima?
2. moddiy tizim nima?
3. Nostasionar va stasionar bog‘lanish nima?,
4. golonom va nogolonom bog‘lanish nima?,
5. Elektr zanjirlarni hisoblashni simvol metodi nima?

1.2. Elektr mashinalardagi issiqlik va gidravlik jarayonlarning tahlili.

***Kalit so‘zlar:** qizish, qisqa tutashuv, issiqlik jarayoni, issiqlik manbalari, Nyuton-Rixman qonuni, issiqlik o‘tkazuvchanlik, gidravlik jarayon, ekvivalent gidravlik sxema, gidravlik qarshilik.*

Elektr mashinalarni ishdan chiqishiga sabab bo‘luvchi asosiy omillardan biri bu mashinalarning meyyoriy qiymatdan ortiq qizishi hisoblanadi. Bu mashinalardagi izolyatsiya materiallarini ishdan chiqishiga va qisqa tutashuv vujudga kelishiga sabab bo‘ladi. SHuning uchun elektr mashinalardagi issiqlik

jarayonlarini tadqiq qilish muhim amaliy ahamiyatga ega bo'lgan vazifadir. Dastlab, issiqlik jarayonlarini keltirib chiqaruvchi sabablarni tahlil qilib chiqamiz.

Elektr mashinalarida bo'ladigan isroflar va issiqlik manbalari tok o'nuvchi qismlardagi aktiv qarshiliklar bilan bog'liq bo'ladi. Elektr mashinalarda energiyaning o'zgarishida uning aktiv qismlarida quvvat isroflari bir vaqtda sodir bo'ladi va qaytmaydigan issiqlik energiyasiga aylanadi. Bu issiqlik konstruksiya elementlariga va tashqi muhitga oqib o'tadi va sochilib ketadi.

Elektr mashinalarida isroflarni to'rtta guruhga bo'ladilar: 1) elektr isroflar (chulg'amlarda va cho'tka-kollektor tugunida); 2) magnit isroflar (magnit o'zakda gisterezis va uyurma toklar tufayli vujudga keladigan); 3) qo'shimcha isroflar (po'lat o'zakda va chulg'amlarda); 4) mexanik isroflar (cho'tka-kollektor yoki cho'tka-kontakt halqalari ishlashida hamda sovitish muhitini ko'chirishga sarflanadigan).

Issiq o'tkazuvchanlik yo'li bilan issiqlikning tarqalishi Fure qonuni ($q = -\lambda \partial T / \partial n$)ga binoan kechadi. Bu qonun « n » normal yo'nalishida issiqlik oqimi zichligi q ni temperatura gradienti T bilan bog'laydi (issiqlik ko'chishining jadalligi issiqlik o'tkazuvchanlik koeffisienti λ bilan tavsiflanadi).

Issiqlikning konvektiv usulda (qizigan zarrachalarning fazoda ko'chishi orqali) tarqalishi *Nyuton-Rixman qonuni* [$q_{gr} = \alpha(T_{ch} - T_{at})$] bilan tavsiflanadi. Bu qonun chegaradagi issiqlik oqim zichligi q_{ch} ni mazkur chegaradagi temperaturalar farqi T_{ch} va T_{at} bilan aloqani o'rnatadi. Issiqlik ko'chirishning jadalligi issiqlik berish koeffisienti α bilan tavsiflanadi.

Tashqi muhitni mashinalar aktiv qismlari va boshqa issiqlik ajratuvchi qismlari bilan bevosita oshirilgan sirtli kontakt hosil qilishga intilishi kerak. Elektr mashinalarning issiqlik tizimlar va gidravlik tizimlar bilan o'xshashligi mavjud. Issiqlik nuqtai nazaridan elektr mashinalar – bu jismning geometrik, fizik, energetik xossalarini va ularning atrof muhit bilan o'zaro ta'sir shartlarini tavsiflovchi kattaliklar taqsimlanishiga mos bo'lgan temperatura maydoni T ni shakllantiruvchi issiqlik ko'chirish jarayoni vujudga keladigan qattiq jismlar maj-

muidir. Elektr mashinalarning issiqlik tizim sifatidagi asosiy parametri temperatura maydoni T hisoblanadi. Bu maydon issiqlik ajralish zichligining maydoni va issiqlik uzatish jarayonining jadalligini belgilovchi parametrlarini shakllantiradi.

Bu parametrlar tarkibiga issiqlik o'tkazuvchanlik λ va issiqlik berish α koef-fisientlaridan tashqari qattiq jismlarda va ularning chegaralarida issiqlik uzatishning asosiy qonunlaridan kelib chiqqan holda aniqlanib uyg'unlashgan tizimning geometriyasi ham kiradi. Issiqlik tizimining chegaralari va sovitish muhiti bir vaqtning o'zida gidravlik tizimning qismidir. Bunga sovitgich o'tishi uchun passiv (issiqlik nuqtai nazaridan) yo'l va uning harakatini ta'minlaydigan sovitish muhitini siqib beruvchi jihozlar ham kiradi}. Elektr mashinalarning gidravlik tizim sifatidagi asosiy parametri sovitgich tezligi maydoni (w) hisoblanadi. Uni yuzaga keltiruvchilarga sovitish muhitini siqib beruvchi jihozlar yaratgan bosimlarning taqsimlanishi va sovitgich ko'chishiga qarshilikni belgilovchi parametrlar (uning yopishqoqligi va tizimning geometriyasi) kiradi. Elektr mashinalarini gidravlik va issiqlik tizim sifatida o'rganishda eksperiment muhim rol o'ynaydi [7].

Elektr mashinalarida bo'ladigan gidravlik jarayonlarni tahlil qilish metodlarini ko'rib chiqamiz. Elektr mashinalarda sovitgich tezligining maydonini o'rganish ko'pchilik hollarda eksperimental ravishda amalga oshiriladi. Hisoblash metodlaridan foydalanganda elektr mashinalar kanallarida sovitgichning ishlatilishi (sarflanishi) bilan belgilanadigan faqat o'rtacha tezliklar bilan ish ko'riladi. Bunda real sovitish tizimini ekvivalent gidravlik sxema (EGS) bilan almashtiradilar. EGS– bu bosim manbalari (bosimni oshirib beruvchi jihozlar) va to'plangan gidravlik qarshiliklar [yo'l (sovitish muhitining yo'lidagi) va joy (tugun, ya'ni sovitish muhitining yo'lidagi egilish, burilish va boshqalar)] qarshiliklari majmuasidir.

Gidravlik qarshilik $\Delta r = z \cdot Q^2$ ko'rinishdagi bog'liqlikka proporsionallik ko-effisienti z sifatida kiritiladi (bunda Δr – sovitish tizimi elementida bosim isrofi va Q – undagi sarf) yo'l va joy qarshiliklari quyidagilarga teng:

$$z_y = \xi \rho \cdot l / (2F^2 d_g) ; z_j = \zeta \cdot \rho / (2F^2), \quad (1.2)$$

bu yerda: l va d – elementning uzunligi va gidravlik diametri; ξ – Reynolds soni Re ga bog'liq bo'lgan yo'l isroflari koeffisienti; ζ – joy isroflari (joy qarshiligi) koeffisienti, bu koeffisient Reynolds soni Re ga bog'liq emas); ρ – muhitning zichligi; F – o'tish kesimining yuzasi.

Umumiy qo'llaniladigan elektr mashinalarining gidravlik qarshiliklariga qo'shilgan asosiy hissani joy qarshiliklari beradi (bularda koeffisient ζ Reynolds sonidan bog'liq emas; trubalar uchun $Re_{kr} = 2300$).

EGC elementlarining proporsionallik koeffisienti z ning qiymati aniqlangandan keyin mashinalar gidravlik tarmog'ining umumiy qarshiligi z_{gt} ni topib tarmoq harakteristikasi $\Delta r_t = f(z_{gt} Q^2)$ ni quradilar.

Gidravlik va issiqlik jarayonlarni hisoblash uchun EHMni qo'llashda, ularni o'zaro korreksiya (avtomatik to'g'rilanishi)ni hisobga oladigan yagona dasturga ega bo'lib, ketma-ket yaqinlashish metodini qo'llash maqsadga muvofiq hisoblanadi

Elektr mashinalarida bo'ladigan issiqlik jarayonlar va ularni tahlil qilish metodlari. Mashinalarning aktiv qismlari va sovitish muhitli konstruksiyasi elementlari yuzasining issiqlik almashuvi o'xshashlik nazariyasini qo'llagan holda eksperimental ravishda tekshiriladi. Qattiq jismlarda issiqlik ko'chirish elektr mashinalarini issiqlik tizim sifatida tabaqalanish darajasi orqali belgilanadigan har xil metodlar bilan hisoblanadi. Ulardan eng aniq natija beradigani temperatura maydoni metodidir. Chegaraviy shartlar hisobga olinib yyechiladigan masalalar faqat sonli metodlarni (masalan, oxirgi ayirma metodini) qo'llash bilan amalga oshiriladi.

Hozirgi vaqtda elektr mashinalarning temperatura maydonini hisoblashning uch o'lchamli masalasini yechishda uni ikki o'lchamligi keltirib, sonli yoki analitik(bu usulda qo'shimcha cheklanishlar kiritiladi) usullarda hisoblaydilar. Katta quvvatli va maxsus elektr mashinalarini hisoblashda o'zaro yaqin joylashgan doira (chulg'am va o'zak) uchun yechimini faqat III tur chegaraviy

shartlarni foydalangan holda va $\partial T/(\partial n)=0$ sharti bajarilganda olish mumkin bo'ladi.

Elektr mashinalari issiqlik hisoblarida qizishning umumiy maslasini yechish uchun amalda ekvivalent issiqlik sxemasi (EIS) metodini qo'llaydilar. Bu metodda uzluksiz tarqalgan parametrlı issiqlik tizim bir jinsli jismlar ekvivalent tizimi bilan almashtiriladi. Bu jismlar orasida issiqlik almashuvi mos jarayonlari orqali aniqlanuvchi to'plangan bog'lanishlar amalga oshadi.

Elektr mashinalari issiqlik hisobining aniqligi topshiriqda dastlabki berilganlar (isroflar, issiqlik o'tkazuvchanlik va issiqlik uzatish koeffisientlari)-ning aniqligiga bog'liqdir. Elektr apparatlarning o'tkazgich va ferromagnit qismlarida elektr energiya yo'qotiladi. Yo'qotilayotgan energiyaning bir qismi apparatni qizishiga, qolgani esa, atrofda muhitga issiqlik orqali tarqaladi. Apparatlarning qizishi ularning izolyatsiyasini eskirishiga olib keladi va apparatni xizmat davomatini qisqartiradi. Tajribada aniqlandiki, apparatning o'ta qizishi (ya'ni xizmati nominal ishchi haroratdan oshib ketishi) 80°C ortsa, izolyatsiyaning xizmat davomiyligi ikki barobar kamayadi.

Misdan bajarilgan kontakt tizimni mexanik jihatdan mustahkamligi haroratni 1000°C dan 2500°C gacha ortganida 40 % pasayadi. Aytib ketilgan jarayonlar qisqa tutashuv rejimlarida yanada og'irlashadi, chunki haroratni ortib ketishidan tashqari elektr apparatiga elektrodinamik kuchlari ham ta'sir qiladi.

Shunday qilib, apparatlarning mustahkamligi va ishlash davomiyligi qizish jarayonlariga bog'liqdir. Ya'ni apparatlar mumkin bo'lgan ish sharoitlarda nominal ruxsat etilgan haroratga ega bo'lishi kerak. O'zgarmas tok apparatlarida qizish jarayoni aktiv qarshiliklardagi energiyani yo'qotilishi hisobiga hosil bo'ladi.

Bu energiya quyidagicha aniqlanadi:

$$W = \int_0^t i^2 R dt \quad (1.3)$$

bu yerda: i - zanjirdan oqayotgan tok, A; R - aktiv qarshilik, Om.

Yuza effekti. O'zgaruvchan tok o'tkazgichdan oqib o'tib o'zgaruvchan magnit maydonini hosil qiladi. Magnit maydoni o'tkazgichni kesib o'tib E.Yu.K. va uyurma toklarini hosil qiladi. Uyurma toklar o'tkazgichdan oqib o'tayotgan tok bilan geometrik jihatdan qo'shiladi va natijada o'tkazgich yuzasidagi tokni zichligi ortadi. Markaz tomonga yaqinlashgach zichlik kamayadi chastota ortadi, solishtirma qarshilik kamayadi va yuza effekti ortadi.

$$K_{ya} = \frac{R_{\sim}}{R_{=}} \quad (1.4)$$

Yaqinlik effekti. Qo'shni o'tkazgichning magnit maydoni o'tkazgichni kesib o'tib unda E.Yu.K. hosil qiladi va natijada tok oqimi paydo bo'ladi. Bu tok asosiy tok bilan geometrik jihatdan qo'shiladi va o'tkazgichning kesim yuzasi bo'yicha notekis tarqaladi. Yaqinlik effekti ta'sirida tokning f chastotasi ortishi bilan kuchayadi.

Issiqlikni o'tkazishning uch xili mavjud: issiqlik o'tkazuvchanlik; konveksiya; issiqlik nurlanish.

Jismning bir qismidan ikkinchi qismiga yoki ikkita jismning bir-biriga tutashib turganida o'tgan issiqlik jarayoni issiqlik o'tkazuvchanlik deb ataladi. Issiqlik o'tkazuvchanlik asosan qattiq jismlarda hosil bo'ladi. Fure qonuniga ko'ra issiqlik o'tkazuvchanlik jarayonida uzatilayotgan issiqlik energiyasi quyidagicha aniqlanadi:

$$Q = \lambda \cdot \frac{\partial \tau}{\partial n} \cdot dt \cdot dS \quad (1.5)$$

λ - issiqlik o'tkazuvchanlik ko'rsatgichi materialni issiq o'tkazish qobiliyatini belgilaydi, $Vt/m \cdot K_0$; $d\tau/dn$ -issiqlik tarqalish tomoniga yo'nalgan harorat gradienti; dt – vaqt orttirmasi; dS – yuza orttirmasi.

Konveksiya jarayoni suyuqlik va gazlarda hosil bo'lib issiqlikni molekulalar orqali tarqatadi (uzatadi). Nyuton-Rixman qonuniga asosan konveksiya orqali uzatilgan issiqlikni quyidagi tenglama orqali aniqlash mumkin:

$$Q = \alpha_k (\tau_m - \tau_{am}) \cdot S \quad (1.6)$$

α - konveksiya ko'rsatgichi, Vt/m K^0 ; τ_m - apparatning harorati, K^0 ; τ_{am} - atrof-muhit harorati, K^0 ; S - yuza, m^2 .

Issqlik nurlanish - bu elektro magnit to'liqlar orqali issqlikning uzatilishi va undagi uzatilayotgan issqlik quyidagi Stefan-Bolsman tenglamasi orqali aniqlanadi:

$$Q = \alpha_k (\tau_m - \tau_{am}) \cdot S \quad (1.7)$$

C_s - qora jismning nurlanish ko'rsatgichi, $\text{Vt/m}^2 \cdot \text{K}^0$; E - issqlikni uzatayotgan materialni qoralik darajasi, $E=1$ - qora jism uchun; T -absolyut harorat.

Elektr apparatlarning ishchi rejimida quyidagi qizish jarayonlari mavjud:

1. Qizishning turg'un rejimi. Apparatlardagi qizish harorati ma'lum vaqt davomida o'zgarmasa, turg'un rejim deb ataladi. Bu rejimda bir soat davomida haroratning ortib ketishi 1^0C dan ortmasligi kerak va hosil bo'layotgan issqlik atrof-muhitga tarqaladi.

2. Apparatlarning o'tish jarayonida qizishi va sovishi. Elektr apparatlar manbaga ulanganda harorati birdan ortmay, balki sekin asta hosil bo'layotgan issqlik qisman apparatni qizishiga, qisman esa, atrofga tarqaladi va Nyuton tenglamasi bilan ifodalanadi:

$$P dt = k_t \cdot S \cdot \tau \cdot dt + C \cdot d\theta \quad (1.8)$$

bunda R - jismdagi issqlik quvvatining yo'qotilishi, Vt ; S - jismning issqlik sig'imi, $\text{Vt} \cdot \text{C}$; C - solishtirma issqlik sig'imi, $\text{Vt} \cdot \text{S/kG} \cdot \text{S}$; m - jismning og'irligi, kG ; k_t - solishtirma issqlik o'zatuvchanlik ko'rsatgichi.

Tenglamaning o'ng tomonidagi birinchi tashkil qiluvchisi:

$k_t \cdot S \cdot \tau \cdot dt$ - dt vaqt davomida atrofga tarqalayotgan issqlik.

Ikkinchi tashkil qiluvchisi:

$C \cdot d\theta$ - harorat dt ga o'zgarganda jismning qizishiga sarflangan issqlik. Atrof-muhit harorati θ o'zgarmasa $d\theta = d\tau$, chunki issqligi bo'yicha apparatlarni uchta ishchi rejimi mavjud.

Birinchi rejimda apparatga ta'sir qiluvchi issiqlik quvvati o'zgarmaydi, ya'ni:

$$P = I^2 \cdot R_0 = \text{const} \quad (1.9)$$

Bunday rejim manbaga ketma-ket ulangan va harishligi R_0 harorat ortib ketishi bilan o'zgarmaydigan apparatlarda kuzatiladi.

Ikkinchi rejimda apparatdan oqib o'tayotgan tok o'zgarmaydi $I_0 = \text{const}$, chunki uning harishligi yuklama va qolgan zanjirni harishligidan ancha kichik ($Z_{ap} \ll Z_{zanj}$). Qizish natijasida apparatning tok o'tkazgich qismida harishlik quvvati:

$$P = I_0^2 R = I_0^2 R_0 [1 + \lambda_k (\theta_0 + \tau)] \quad (1.10)$$

Uchinchi rejimda apparatning chulg'ami katta quvvatli manbaga ulanadi. (kontaktorlar, kuchlanish rel'elari, oraliq rel'esi) va

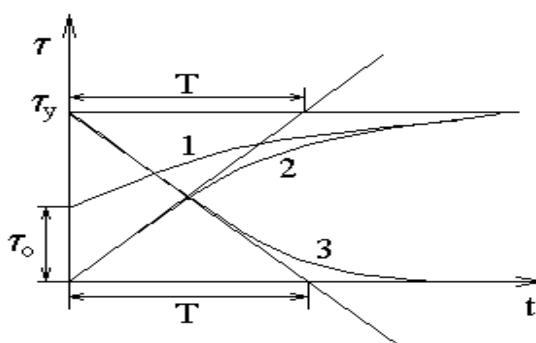
$$P = \frac{U^2}{R_0 [1 + \lambda_k (\theta_0 + \tau)]} \quad (1.11)$$

$R = \text{const}$ bo'lganda oxirgi tenglamaning yechimi:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{\frac{-t}{T}} + \tau_y (1 + e^{\frac{-t}{T}}) \quad (1.12)$$

Bu yerda: τ_0 - dastlabki haroratning ortishi ($t=0$); τ_y - haroratning turg'un ortishi;

T - vaqt bo'yicha qizish doimiysi



1.1-rasm. Elektr mashinalarning qizish jarayoni egri chizig'i.

$\tau = F(t)$ bog'lanishda:

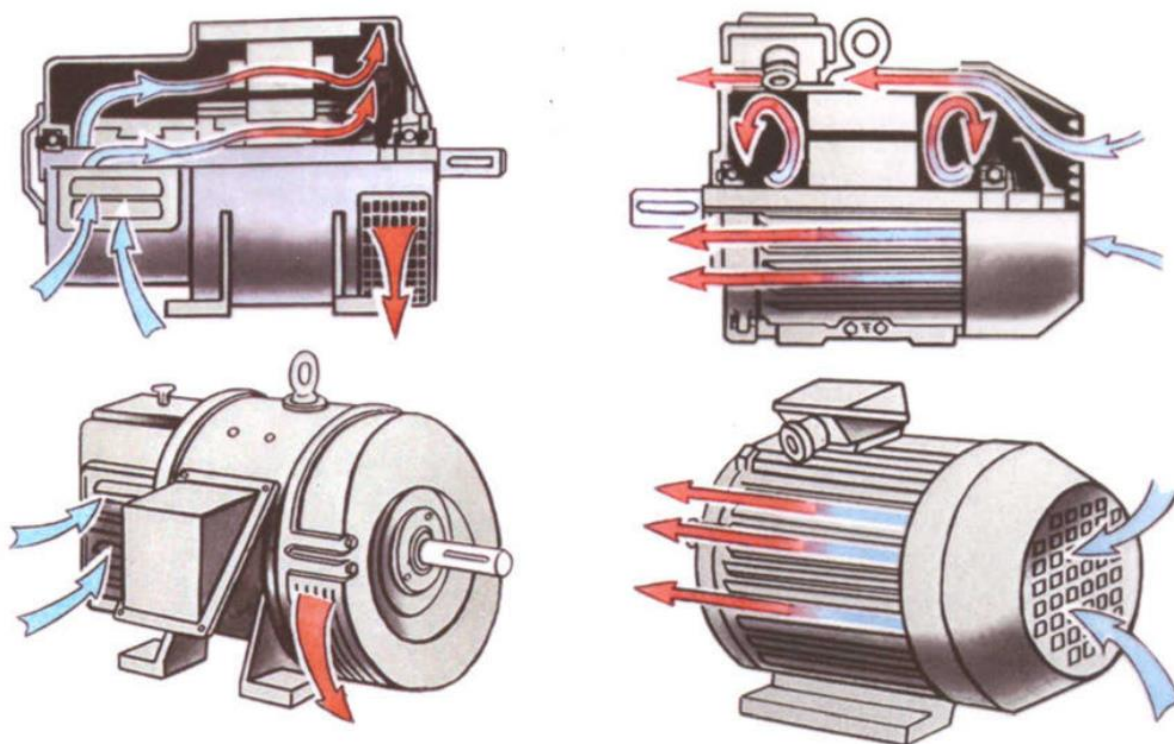
1 - egri chizig'i a) tenglamasini ifodalaydi.

2 - egri chizig'i - $\tau = 0$ ifodalaydi.

T - qiymati qancha katta bo'lsa, apparatning qizishi sekinlashadi.

Elektr mashinalarda issiqlik jarayonlarini tadqiq qilish natijalari asosida sovitish tizimlari tanlanadi. Amaliyotda elektr mashinalarni sovitish uchun asosan 4 ta sovitish tizimlardan foydalaniladi. 1.2-rasmda asinxron mashinalarni sovitish tizimlari ko'rsatilgan.

Asinxron motorlarni ekspluatatsiya jarayonida ma'lum muddatda, odatda yilda bir marta qizish bo'yicha ekspluatatsiya sinovlari o'tkaziladi. Bu sinovlarning maqsadi motorning tuzukligini tekshirish hisoblanadi. Bu sinovlardan tashqari yana maxsus va tadqiqot sinovlari o'tkaziladi. Maxsus sinovlar maxsus sharoit va talablarga javob bera olishi tekshirib ko'riladi. Tadqiqot sinovlari asosan yangi motorlarni ishlab chiqish uchun o'tkaziladi.



1.2-rasm. Elektr mashinalarning sovitish usullari: a) radial, b) aksial, c) tashqi shamollatish.

Ekspluatatsiya jarayonida elektr mashinalarning qizishi nominal yuklamada ishlatib tekshiriladi. Bunda barqaror temperatura aniqlanib, atrof – muhit temperaturasidan farqi aniqlanadi. Bu sinash taxminan 2-8 soat atrofida o'tkaziladi. Har 30 minutda temperatura o'lchanadi. Temperatura termometr usulida yoki qarshilik usulida o'tkaziladi. Termometr usulida bevosita termometr o'lchanadigan qismga qo'yiladi. Qarshilik usulida temperatura bilvosita o'lchanadi va izolyatsiyalangan chulg'amlarda qo'llaniladi.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Elektr mashinada issiqlik jarayoni manbalari nimalar?
2. *Nyuton-Rixman qonunini izohlab bering.*
3. Issiqlik o'tkazuvchanlik nima?
4. Ekvivalent gidravlik sxema nima?
5. Gidravlik qarshilik nima?

1.3. Elektr mexanikasining asosiy qonunlari va tushunchalari.

Kalit so'zlar: *Elektromagnit induksiya qonunini, Om qonunlari, Joule-Lenz qonuni, uch fazali tizim, simvolik usul, Elektromagnit maydon, Kulon qonuni, Elektrodinamika qonunlari, To'la tok qonuni.*

Elektr mexanikasi fani, avvalo, elektrotexnika va mexanika fanlari qonunlariga asoslanadi. Fan muammolarini o'rganishda foydalanadigan bu qonunlarni qisqacha ko'rib chiqamiz. Elektr va magnetizm bo'yicha dastlabki tadqiqotlar XIX asrda boshlangan. Magnit strelkaga tokning ta'siri X. Ersted tomonidan 1819 yilda, toklarning o'zaro ta'siri esa A. Amper tomonidan 1820 yilda o'rganilgan. Amper birinchi bo'lib elektr toki, tok kuchi, elektr kuchlanish atamalarini kiritgan. Magnit maydonining dastlabki tadqiqotlari J.B. Bio va M. Savar tomonidan o'tkazilgan va Laplas tomonidan matematik ravishda umumlashtirilgan (Bio - Savar - Laplas qonuni).

Elektrostatikaga oid ayrim tenglamalarni fransuz matematigi S. Puasson tadqiq etgan. Elektromagnit maydonning materialistik konsepsiyasi ingliz olimi M. Faradey tomonidan rivojlantirilgan. U elektr va magnit maydonlarni tadqiq etish uchun kuch va ekvipotensial chiziqlar atamalarini kiritgan.

1782 yilda Laplas o'z nomi bilan ataladigan tenglamalarni og'irlik nazariyasiga tegishli asarlarida qo'llagan. Elektromagnit induksiya qonunini 1831 yilda ingliz fizigi M. Faradey tajriba yo'li bilan kashf etgan va elektroqimyo qonunlarini birinchi bor o'rgangan. Elektromagnitli telegraflar rus injeneri P. Shilling tomonidan 1832 yili yaratilgan. Rus akademigi B. Yakobi 1838 yili suv kemasi uchun elektr mashinalar yaratgan. Elektr zanjiriga oid Om qonuni 1826 yilda nemis olimi G. Om tomonidan kashf etilgan.

Tokning issiqlik ta'siri - Joul-Lens qonunini ingliz fizigi D. Joul 1841 yili va rus akademigi E. Lens 1842 yilda ta'riflab berishgan. 1833 yil E. Lens elektromagnit inersiya qonunini bayon qilgan. Nemis olimi G. Kirxgof 1845 yilda elektr zanjirlarga oid ikkita muhim qonunga ta'rif bergan.

Vektor potentsiali, induktivlik va o'zaro induktivlikni birinchi bor nemis olimi F. Neyman ifodalagan. Buyuk ingliz olimi D. Maksvell 1873 yili siljish toklari tushunchasini kiritdi, hamda hozirda uni nomi bilan ataladigan o'zgaruvchan elektromagnit maydon tenglamalarini tuzdi. Bundan faqat 25 yildan keyingina elektromagnit maydon mustaqil tarzdagi materiya deb isbot etildi.

Elastik muhitda energiya harakati rus olimi N.Umov tomonidan 1874 yilda nazariy jihatdan tadqiq qilingan. 1889-91 yillarda rus injeneri M.O. Dolivo-Dobrovolskiy elektr energiyaning uch fazali tizimining qism (generator, transformator, motor) larini ishlab chiqqan va kuchlanishi 15 KV, quvvati 150 KV bo'lgan elektr energiyani 175 km masofaga uzatishni amalga oshirgan.

Sinusoidal tok elektr zanjirlarini simvolik usulda hisoblash usulini amerika olimi Ch. Shteynmets 1894 yilda taklif etgan. Garmonik balans usulida nochiziq elektr zanjirlarni hisoblash usulini fransuz olimi M. Joli 1911 yil joriy etgan. Sekin o'zgaradigan amplitudalar usulini 1927 yilda golland olimi B. Vander-Pol taklif

etgan. Kichik parametrlar usulini esa, 1928 yilda fransuz olimi G. Puankare taklif etgan.

Maydon nazariyasi masalalarini yechishda integral tenglamalarni qo'llashni rus olimlari G.A. Granberg, V.M. Alexin, O.V. Tozoni, E.V. Kotelnikovlar (1948 y.) taklif etdilar. Elektromagnit maydoni materiyaning bir turi bo'lib, har bir nuqtada "Elektr maydoni" va "Magnit maydoni" nomlarini olgan ikkita vektor kattalik bilan tavsiflanadi. Elektromagnit maydoni bo'shliqda $C=2,998 \cdot 10^8$ m/s $\approx 3 \cdot 10^8$ m/s tezlik bilan tarqaladi. Yaxlit elektromagnit maydonining ikkita tomoni bo'lgan elektr va magnit maydonlarini namoyon qilish uchun ularning o'zini sezdiruvchi u yoki bu xossalardan foydalaniladi. Elektromagnit maydonining ikki tomonidan biri hisoblangan elektr maydoni deb, elektr zaryadli zarrachaga zarrachaning zaryadiga proporsional va uning tezligiga bog'liq bo'lmagan kuch bilan ta'sir etuvchi tavsifga ega bo'lgan maydonga aytiladi.

Elektr maydonini tavsiflovchi asosiy fizik kattalik mavjud bo'lib, u elektr maydon kuchlanganligi nomini olgan. Elektr maydon kuchlanganligi elektr maydonini tavsiflaydigan va elektr maydoni tomonidan q_0 -zaryadli zarrachaga ta'sir etuvchi F -kuchni aniqlaydigan vektor kattalik bo'lib quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$\vec{E} = \vec{F} / q_0 \quad (1.13)$$

Elektromagnit maydonining ikki tomonidan biri hisoblangan magnit maydoni deb zaryadli zarrachaga uning tezligi va zarrachaning zaryadiga proporsional tarzda kuch bilan ta'sir etuvchi tavsifga ega bo'lgan maydonga aytiladi.

Magnit maydonini tavsiflovchi asosiy fizik kattalik mavjud bo'lib, u magnit induksiyasi deb ataladi. Magnit induksiyasi magnit maydonini tavsiflaydigan va magnit maydoni tomonidan harakatdagi zaryadli zarrachaga ta'sir etuvchi kuchni aniqlaydigan vektor kattalikdir.

$$\vec{B} = \frac{F_2}{q \vec{V}} \quad (1.14)$$

Elektromagnit induksiya qonuni tabiatning muhim qonunlaridan biridir. Elektr uskunalarning ko'pchiligini ishlashi mana shu qonunga asoslangan. Masalan, o'zgaruvchan tok generatorlari – sinxron generatorlar, asinxron motorlar, transformatorlar, radio-teleapparaturalarning ishlashi va hokazolar.

Agar o'tkagichli o'zgaruvchan elektromagnit maydonga kiritsak, bu konturda elektromagnit induksiya elektromagnit induksiya elektr yurituvchi kuchi (E.YU.K.) hosil bo'ladi. Bu EYUKning kattaligi elektromagnit maydonning o'zgarish tezligiga proporsionaldir:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \text{ - birta o'ram uchun;}$$

$$e = -W \frac{d\phi}{dt} \text{ - o'ramlar soni } W \text{ ga teng bo'lganda;}$$

Bu tenglamada: $\frac{d\phi}{dt}$ - magnit oqimi vaqt bo'yicha olingan hosila bo'lib, bu ifoda magnit oqimining o'zgarish tezligini anglatadi.

Elektr mashinalari magnit maydon va tokli o'tkazgichlarining mavjudligi va ularning o'zaro ta'siri tufayli harakatga keladi. Elektrodinamika qonunlari toklar va ularning magnit maydoni orasidagi bog'lanishni belgilaydi va ularning o'zaro ta'sirini hisoblashga imkon beradi.

Magnit maydoni magnit hodisalar deb ataluvchi fizik hodisalar bo'lib turgan fazoning bir qismidir. Magnit chiziqlari yordamida maydonning tasvirlanishi elektromagnit jarayonlarni o'rganishda katta yaqqollik beradi. Har birta magnit chiziq boshi ham, oxiri ham bo'lmagan berk kontur deb tasavvur qilinadi.

Magnit potentsiali Laplas tenglamasini qanoatlantiradi:

$$\frac{d^2U}{dx^2} + \frac{d^2U}{dy^2} + \frac{d^2U}{dz^2} = 0 \quad (1.15)$$

Bu tenglamani yechishda to'la tok qonuni (Maksvell 1-tenglamasining integral shakli) qo'llanilganda yetarli aniqlik olinadi.

To'la tok qonuni quyidagicha ifodalanadi:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \oint H dl \cos(\vec{H}, d\vec{l}) = \sum i, \quad (1.16)$$

bunda dl – birta nuqtadan ikkinchi nuqtaga yo'li bo'yicha elementar ko'chishi; $\sum i$ – integrallash konturi o'rab olgan to'la tok kattaligi; $\cos(\vec{H}, \vec{dl})$ – ko'chish yo'nalishi va magnit kuch chizig'i yo'nalishi orasidagi burchak kosinusi (agar integrallash yo'li uchun magnit kuch chizig'ining o'zi tanlansa, $\cos(\vec{H}, \vec{dl}) = 1$).

Magnit zanjiri qonunining ta'rifi: Magnit maydon kuchlanganligining $d\vec{l}$ yo'nalishi bo'yicha tashkil etuvchisining dl ga ko'paytmasidan har qanday berk kontur bo'yicha integralli shu kontur o'rab olgan to'la tokka son jihatdan teng.

Elektr mashinalarida magnit oqim asosan alohida uchastkalar (yakor, qutblar, yarmo va boshq.)dan tashkil topgan magnit o'tkazgich bo'yicha o'tadi. Shunga ko'ra

$$\oint H dl = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n = \sum i = iw, \quad (1.17)$$

bu yerda w – o'ramlar soni; i – g'altak o'tkazgichlaridagi tok. Butun magnit zanjir bo'yicha birta magnit oqim o'tsa, magnit oqim F uchun ifodani (elektr zanjiri uchun Om qonuniga o'xshatib) magnit zanjiri qonuni ko'rinishida yozish mumkin: $F = iw/R_\mu$.

Elektromagnit induksiya qonunini elektr mashinalarida qo'llashda ko'pincha Maksvell bergan ko'rinishda ishlatiladi, ya'ni $e = -dF/dt$, shu bilan birga, qandaydir konturda induksiyalangan EYuK kontur tayyorlangan o'tkazgichlarning moddasi, shakli va o'lchamlaridan bog'liq emas. Bu EYuK faqat kontur orqali o'tuvchi magnit oqimi o'zgarishining tezligiga bog'liq bo'ladi.

Ayrim hollarda elektr mashinalarini o'rganishda elektromagnit induksiya qonuni Faradey ta'riflab bergan $e = Vlv$ shaklda foydalaniladi. Bu ta'rifga binoan, qandaydir konturda induksiyalangan EYuK magnit maydon kuch chiziqlarini kontur tomonidan kesib o'tish tezligiga bog'liq bo'lib, kontur yasalgan o'tkazgichning moddasi, shakli va ko'ndalang kesimi o'lchamlariga bog'liq emas. Bu formulada: V – berilgan nuqtadagi magnit induksiya; l – to'g'ri chiziqli o'tkazgichning bir jinsli magnit maydonda magnit kuch chiziqlariga

perpendikulyar tekislikdagi aktiv uzunligi va v – uning tezligi. O'tkazgichlarda induksiyalangan EYuK ning yo'nalishi o'ng qo'l qoidasi bo'yicha aniqlanadi.

Magnit maydon energiyasi va elektromagnit kuch. Elektromagnit kuch ta'siri namoyon bo'lgan butun fazoda magnit tizim energiyasi taqsimlangan. Bu energiyani qiyamatini Om qonunidan aniqlash mumkin (umumiy ko'rinishda): $i = (e - d\psi/dt) / r$ yoki $e = ir + d\psi/dt$ (bunda $\psi = wF$ – oqim ilashishi). Bu konturda tokning bajaradigan elementar ishi

$$dA = ei \cdot dt = i^2 r \cdot dt + i \cdot d\psi. \quad (1.18)$$

Magnit oqim egallagan butun hajmda to'la energiya ($\mu = \text{const}$ bo'lganda) quyidagiga teng: $W = Li^2/2$. Bu ifoda tok i o'tayotgan kontur bilan bog'langan energiya zapasi (zaqirasi)dir. Bu yerda $Li = \psi$ – tok I ning kontur bilan to'la magnit ilashishi. ψ ning har qanday o'zgarishi o'z induksiya EYuK e_s va u hosil qiladigan tok i_s lar ko'rinishida elektromagnit reaksiyaga olib keladi. Har qanday elektromagnit tizim o'ziga xos elektromagnit inersiya mavjudligi tufayli kontur bilan bog'langan magnit oqimni ma'lum miqdorda saqlashga intiladi. Odatda ko'pchilik hollarda elektr mashinalarda ikki va undan ko'p elektromagnit–bog'langan konturlar bo'ladi. Ikkita konturning elektromagnit energiyasi quyidagicha ifodalanadi:

$$W_{1,2} = L_1 i_1^2/2 + L_2 i_2^2/2 + \dots + M_{1,2} \cdot i_1 \cdot i_2. \quad (1.19)$$

Konturlarning L_1 va L_2 induktivliklari ularning o'zaro holatiga bog'liq bo'lmasligi mumkin. O'zaro induktivlik $M_{1,2}$ esa, konturlarning nisbatan joylashishiga bog'liq bo'ladi, shu sababli toklari o'zgarmagan konturlarning o'zaro har qanday joyini o'zgartirishi konturlar bilan bog'langan energiya $W_{1,2}$ ning o'zgarishiga olib keladi. Demak, mexanik o'zaro ta'sir kuchi mavjudligini ko'rsatadi. Bu elektromagnit kuch quyidagiga teng:

$$f = dW_{1,2}/dx = i_1 \cdot i_2 \cdot dM_{1,2}/dx, \quad (1.20)$$

bunda x – geometrik koordinata.

Elektromagnit kuchlar konturlarning o'zaro joylashishini shunday o'zgartirishga intiladilarki, bunda o'zaro induksiya oqimi oshadi va bu bilan toklar o'zgarmaganda tizim energiyasi oshadi.

Elektr mashinalarida ayrim hollarda kontur bilan bog'langan oqim oshishini hisoblash qiyin bo'lganligidan konturning alohida elementiga ta'sir etuvchi elektromagnit kuchni hisoblash ifodasidan foydalanish qulay hisoblanadi. Uzunligi dl bo'lgan uchastkaga ta'sir etuvchi elementar elektromagnit kuchning kattaligi quyidagiga teng:

$$df = i \cdot dF/dx = B i \sin \varphi dl. \quad (1.21)$$

Agar magnit maydon bir jinsli va o'tkazgich to'g'ri chiziqli bo'lsa o'tkazgich l ga ta'sir etuvchi elektromagnit kuch quyidagiga teng bo'ladi:

$$f = B \cdot l \cdot i \cdot \sin \varphi. \quad (1.22)$$

Shunday qilib, elektrodinamik tizimlarda konturlar tizimining har bir tashkil etuvchilari bilan bog'langan tashqi oqim elektromagnit kuchlarni hosil qilib, bu kuchlar konturlar harakatini shunday tashkil etadiki, bunda tashqi oqim (barcha toklar o'zgarmagan holda) ijobiy o'zgarishga ega bo'ladi.

O'zgarmas tok elektr zanjirlarini o'rganishda: oddiy zanjirlar uchun Om qonunlaridan, tarqalgan (murakkab) elektr zanjirlarni hisoblashda esa, Kirxgof qonunlaridan foydalanadilar.

Ketma-ket ulangan zanjirning hamma qismida tok bir xil bo'ladi. Tokning o'zgarimaslik qonuni juda muhimdir. EYuK ning manbasi zanjirning tashqi qismi bilan ketma-ket ulangan. Shu sababli manba ichidagi tok tashqi zanjirniki bilan bir xil bo'ladi. Boshqacha qilib aytganda, tashqi zanjir iste'mol qiladigan to'la tok generator orqali o'tadi.

Elektr zanjiri parallel ulanganda zanjirning hamma shaxobchalarida kuchlanish hamma vaqt bir xil bo'ladi. Parallel ulanishda tokning tarmoqlanishi Kirxgofning birinchi qonunidan kelib chiqadi, ya'ni: Zanjirning tarmoqlanish nuqtasida keluvchi toklarning yig'indisi (masalan, $I_1 + I_2$) ketuvchi toklarning

yig'indisi (shahobchalardagi toklar yig'indisi): $I_3 + I_4 + I_5$ ga teng: $I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$. Buni boshqacha qilib yozsa ham bo'ladi: $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0$, ya'ni $\sum I = 0$.

Kirxgofning birinchi qonuni ketma-ket ulangan zanjirning (alohida shahobchalari o'zaro parallel ulangan bo'lsa ham, lekin ularning barchasi, umumiy holda zanjirga ketma-ket ulanadi) alohida qismlarida tokning o'zgarmaslik qonuni natijasidir. Mohiyati bo'yicha, Kirxgofning 1-qonuni moddaning saqlanish qonunidan kelib chiqadi, chunki elektronlar moddiy zarrachalardir. Tarmoqlanish nuqtasidan chiqqan toklar shahobchalarning qarshiliklariga teskari proporsional ravishda taqsimlanadilar.

Murakkab elektr zanjirlarini hisoblash uchun Kirxgofning 2-qonunidan foydalanadilar. Umumiy holda bu qonun quyidagicha ta'riflanadi: har qanday berk konturda EYuK larning algebraik yig'indisi kuchlanish pasayishlarining algebraik yig'indisiga teng, ya'ni $\sum E = \sum I r$. Tenglama tuzishda soat strelkasining harakati bo'yicha yo'nalgan tok va EYuK lar musbat ishora bilan olinsa, teskari yo'nalganlarini manfiy ishora bilan olish kerak. Murakkab elektr zanjirlarini hisoblashda elektr zanjirlarining asosiy qonunlari bo'lgan Om qonuni va Kirxgof qonunlariga asoslangan maxsus metodlar: superpozitsiya_(ustiga qo'yish) metodi, tugun kuchlanishi metodi, kontur toklari metodi ishlatiladi.

Magnit oqimi o'tadigan berk yo'l magnit zanjiri deb ataladi. Magnit zanjiri qonuni quyidagicha ta'riflanadi: Magnit oqimi magnit yurituvchi kuchga to'g'ri proporsional, magnit zanjirining qarshiligiga teskari proporsional bo'ladi, ya'ni $F = F/R_m$.

Magnit zanjirining bu asosiy qonuni elektr zanjirining asosiy qonuniga o'xshash bo'lib, elektrotexnikada ahamiyati katta.

O'zgaruvchan tok o'tayotgan zanjirdagi hodisalar o'zgarmas tok o'tayotgan zanjirdagidan farq qiladi. O'zgarmas tok o'tayotganda faqat r (aktiv) qarshiligiga uchrasa, o'zgaruvchan tok o'tishiga ko'rsatiladigan qarshilik turli boshqa hodisalarning (gisterezis, uyurma tok va sirtiy effekt)lar natijasidan vujudga keladi. o'zgaruvchan tok elektr zanjirlarida aktiv qarshilikdan tashqari induktiv va sig'im

qarshiliklari ham bo'ladi. Induktiv qarshilik muhim o'ziga xos xususiyatga ega, ya'ni unda energiya sarf bo'lmaydi. Belgilash lozimki, har qanday g'altak o'tkazgichidan tok o'tganda Joul-Lens qonuniga binoan o'zgaruvchan tok energiyasi issiqlik energiyaga aylanib simni qizdiradi. Lekin, energiyaning bu sarfi simning aktiv qarshiligi tufayli vujudga keladi. U induktivlik bilan bog'liq emas.

Induktiv qarshilik boshqa jarayonni harakterlaydi. Sinusoidal tok o'zgarishi (oshishi)ning chorak davrida tok energiyasi magnit maydonni yaratishga sarflanadi va unda g'amlanadi (zahira bo'ladi), keyingi chorak davrda tok pasayishi tufayli magnit maydon kamayadi va magnit maydon energiyasi yana tok energiyasiga aylanadi. Bu quyidagicha tushuntiriladi. Magnit maydon kamayganda g'altakda tok yo'nalishi bilan bir xil yo'nalgan va uni tutib turadigan o'z induksiya EYuK hosil bo'ladi. O'zgarish davrining birta choragida g'altak iste'molchi sifatida, keyingi choragida esa – generator sifatida ishlaydi.

Shu sababli induktiv qarshilik reaktiv qarshilik ham deyiladi. “Reaksiya” ya'ni “teskari ta'sir qiluvchi” ma'nodan kelib chiqib, g'altak magnit maydonida g'amlangan energiya sarflanmasdan, to'la holda zanjirga qaytadi.

Tok o'zgarishi natijasida elektr zanjirida bo'lgan sig'im goh elektrlanadi, goh elektrsizlanadi va shu tariqa tok o'zgarishiga to'sqinlik qiladi. Bu to'sqinlik *sig'im qarshiligi deyiladi.*

Shunday qilib, o'zgaruvchan tok ta'sirida tashqaridan ta'sir etuvchi EYuK ga uch xil qarshilik: aktiv qarshilik, induktiv qarshilik va sig'im qarshiligi ko'rsatilishi mumkin. Tashqi EYuK uchala kuchlanishning pasayishiga sarflanadi:

$$e = ri + Ldi/dt + \int i dt /C. \quad (1.23)$$

Bu tenglama o'zgaruvchan tokning oddiy zanjirlarini harakterlaydi.

Agar o'tkazgichdan o'zgaruvchan tok o'tsa, bu o'tkazgich atrofida o'zgaruvchan magnit maydoni hosil bo'ladi. Bu maydon kuch chiziqlari o'tkazgichni kesib o'tadi va unda e_L EYuK induksiyanadi. Bu hodisani o'z induksiya hodisasi deyiladi.

O'zgaruvchan tok o'tayotgan o'tkazgichda *s i r t i y e f f e k t* kuzatiladi. o'zgaruvchan tok o'zgarmas tokdan farqli ravishda o'tkazgichning to'la kesimi bo'yicha o'tmay, uning sirt qatlami bo'yicha (uning qalinligi chastota oshgan sari kamayib boradi) o'tadi. Sirtiyl effekt quyidagicha tushuntiriladi. Magnit maydon faqat o'zgaruvchan tok o'tayotgan o'tkazgich atrofidagi fazoda mavjud bo'lib qolmasdan, uning ichida ham bo'ladi; eng kuchli magnit maydon o'tkazgichning sirt qatlamida bo'ladi. O'tkazgich o'qi atrofida magnit maydon kuch chiziqlari zich joylashib, katta o'z induksiya EYuK vujudga keladi va tokka induktiv qarshilik ko'p bo'ladi, sirt qatlamida esa, kuch chiziqlar kam bo'lganidan induktiv qarshilik kam bo'ladi. Shu sababli tok asosan, o'tkazgichning sirtiyl qatlamidan o'tadi. Demak, o'zgaruvchan tok o'tkazgichning markaziy qismlaridan uning sirtiga siqib chiqariladi. Bu holda o'tkazgichning o'zgaruvchan tok o'tadigan kesimi o'zgarmas tok o'tgandagiga nisbatan ancha kam bo'lib, uning aktiv qarshiligi ortadi. Bu farq chastota oshgan sari osha boradi. Chastota 50 Gs bo'lganda sirtiyl effekt deyarli bo'lmaydi.

R e z o n a n s q o d i s a s i. Induktiv va sig'im qarshiliklaridan tarkib topgan elektr zanjirlarida tebranma harakat sodir bo'ladi. Rezonans hodisasi tebranish tizimining biror tashqi ta'sir ostida juda katta amplituda bilan tebranishidan iboratdir. Bunday maksimal amplituda tebranish tizimi erkin tebranish chastotasiga tashqaridan ta'sir etuvchi kuchning chastotasi mos kelganidagina ro'y beradi. Induktivlik va sig'im elementlaridan tashkil topgan tebranish konturi deb atalgan elektr zanjirida rezonans hodisasi ro'y berishi uchun konto`rning erkin tebranish chastotasi bilan tashqaridan ta'sir etuvchi EYuK chastotalari bir-biriga teng bo'lishi shart.

Elementlari ketma-ket ulangan elektromagnit tebranish konturining *erkin tebranish chastotasi* $\omega_0 = 1 / \sqrt{LC}$ bo'ladi. Bunday elektr zanjirida rezonans hodisasi bo'lishi uchun ω_0 chastotasi, $e > R$ ning ω chastotasiga teng bo'lishi kerak: $\omega = \omega_0 = 1 / \sqrt{LC}$. Rezonans hodisasi ro'y berishi uchun konto`rning induktiv qarshiligi uning sig'im qarshiligiga teng bo'lishi shart; yoki konto`rning reaktiv

qarshiligi nolga teng bo'lishi shart: $\omega L - 1/(\omega C) = x = 0$. Bu holda konturdan o'tuvchi tok kuchi $I = U / r$ maksimal miqdorga erishadi (chunki bunda $Z = r$). Rezonans vaqtida elementlari parallel ulangan kontonining ayrim tarmoqlaridagi tok umumiy yo'ldagi tokka qaraganda ancha kuchli bo'lishi mumkin. Shuning uchun elementlari parallel ulangan konturda sodir bo'luvchi rezonans toklari rezonansi deb ataladi. Rezonans hodisasi ro'y berishi uchun aktiv qarshilik r to'lqin qarshiligi ($\sqrt{L/C}$) dan kichik bo'lishi kerak.

Tashqaridan ta'sir etuvchi EYuK I_r bo'lgani uchun $(I/r) < I\omega L$ yoki $(I/r) < (I/(\omega C))$ ekanligini ko'rib, yana birta xulosa chiqarish mumkin: rezonans hodisasi ro'y berganda induktivlik yoki sig'imdagi kuchlanish zanjirga ta'sir etuvchi EYuK ga qaraganda juda ham ko'p bo'lishi mumkin. Demak, zanjirga unchalik yuqori EYuK ta'sir etmasa ham, rezonans natijasida zanjirning ayrim qismlaridagi kuchlanish juda ham yuqori bo'lishi mumkin. Shuning uchun, bunday rezonans kuchlanish rezonansi deb ataladi.

Kuchlanish rezonansi rejimida $x_L = x_C$ qarshiliklar zanjir aktiv qarshiligi R dan qancha marta katta bo'lsa, induktivlik va sig'imdagi kuchlanish zanjirga berilgan kuchlanishdan shuncha marta katta bo'ladi. Bunday rezonans uchun reaktiv qarshiliklar teng ($x_L = x_C$) bo'lishi shart.

Joul–Lens qonuniga asosan, agar zanjir qismida elektr maydon ta'sirida mexanik ish bajarilmasa va moddalarning kimyoviy aylanishlari bo'lmagan holda elektr maydonning ishi faqat o'tkazgichning qizishigagina olib kelar ekan.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Elektromagnit induksiya qonunini tushuntirib bering.
2. Om qonuni va Joul-Lens qonunlarini tushuntirib bering.
3. uch fazali tizimining tushuntirib bering. Elektr zanjirlarni hisoblashni simvolik usulini mohiyatini tushuntirib bering.
4. To'la tok qonunini tushuntirib bering.

1.4. Energiyani elektromexanik o'zgartirish jarayonlarini tadqiq etishda qo'llaniladigan differensial va integral tenglamalar.

Kalit so'zlar: dinamik jarayonlar, differensial tenglamalar, integral tenglamalar, barqaror rejim, klassik usul, operatorli metod, grafik usullar, raqamli usullar, trapetsiyalar formulasi, Eyler usuli, sonli differentsiallashtirish usuli.

Elektr mashinalarda kechadigan eng murakkab jarayonlar dinamik jarayonlar bo'lib elektr mashinalarning differensial va integral muvozanat tenglamalarini yechish orqali tadqiq qilinadi [19, 22]. Asinxron motor to'la differensial tenglamalarini integrallash orqali olingan modellar o'zining aniqligi va keng diapazondagi dinamik jarayonlarni tadqiq qilish imkoniyati bilan ajralib turadi.

Elektr mashinalarning differensial tenglamalar tizimlari ularning barcha ish rejimlariga oid to'la ma'lumotni beradi. Elektr mashinalarning barcha konturlari toklariga nisbatan tenglamalarni yechganda faqat toklar o'zgarishi to'g'risida ma'lumotgina emas, balki uning oqim ilashishi, kuchlanishi va o'tish jarayonidagi (to'satdan QT, elektr mashinalarni tarmoqqa ulash va shunga o'xshashlar) moment to'g'risida ham aniq tasavvorni olish mumkin. Mashinalarning differensial tenglamalaridan ularning *barqaror rejim* uchun tenglamalariga o'tish osondir. Elektr mashinalarning barcha differensial tenglamalar tizimini matematik nuqtai nazaridan ikkita guruhga bo'lish mumkin: 1) o'zgarmas koeffisientli va 2) o'zgaruvchan (davriy) koeffisientli.

Birinchisi chulg'amlari o'zaro harakatsiz bo'lgan mashinalardagi (masalan, transformatorlar) elektromagnit jarayonni tahlil qilishda olinib, *ikkinchisi* – chulg'amlari bir-biriga nisbatan harakatda bo'lganda hosil bo'ladi. Differensial tenglamalarni yechishning *analitik metodida* elementar funksiyalar orqali ifodalangan va integrallash yo'li bilan aniq yechimlar olinadi [9]. Laplas almashtirilishi (operator usuli)ga asoslangan differensial tenglamalarni yechish

zamonaviy fanda juda keng qo'llaniladi. Bu usul tenglamaning berilgan boshlangich shartlarini qanoatlantiruvchi xususiy yechimini darhol topishga imkon beradi. Ma'lumki, analitik (klassik) usul bilan yechimlarni izlashda dastlab tenglamaning umumiy yechimini topish, undan keyin esa, boshlangich shartlar bo'yicha barcha ixtiyoriy o'zgarmlarni aniqlash talab qilinadi. Shunday qilib, operator usuli tenglamalarni yechishda vaqt va mehnatni jiddiy ravishda tejashga imkon beradi.

Klassik (analitik) va operatorli metodlar yechadigan differensial tenglamalar tizimi chiziqli va koeffitsientlari o'zgarms bo'lgan holda qo'llaniladi. Klassik metodning katta ahamiyatga ega bo'lgan o'ziga xosligi integrallash doimiyligini aniqlash usulidir. Buning uchun harakteristik tenglamani tuzadilar va uning ildizlarini topadilar [15].

Agar tenglamada noma'lum funktsiya hosila yoki differentsial ostida qatnashsa, bunday tenglama differentsial tenglama deyiladi. Agar differentsial tenglamada noma'lum funktsiya faqat bir o'zgaruvchiga bog'liq bo'lsa, bunday tenglama oddiy differentsial tenglama deyiladi. Masalan:

$$\frac{dy}{dx} = \sqrt{3}(1-2y); \quad y' = \frac{x^4}{2}; \quad \frac{dy}{dt} = t^2 - 1; \quad \sqrt{2} \frac{d^2y}{dx^2} = x^2 + 1; \quad xdy = 3dx \quad (1.24)$$

Agar differentsial tenglamadagi noma'lum funktsiya ikki yoki undan ortiq o'zgaruvchilarga bog'liq bo'lsa, bunday tenglama xususiy hosilali differentsial tenglama deyiladi. Masalan:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = f(x, y, z) \quad (1.25)$$

Differentsial tenglamaning tartibi deb, shu tenglamada qatnashuvchi hosilaning (differentsialning) eng yuqori tartibiga aytiladi. Masalan:

$$\frac{dz}{dx} = 5(z-1); \quad (u')^3 = x^2 + 2 \quad (1.26)$$

birinchi tartibli tenglamalar,

$$\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = 5\left(\frac{\partial^3 u}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 u}{\partial z^3}\right), \quad \frac{d^4 T}{dt^4} = 1 - (l' + 2) \quad (1.27)$$

esa 4-tartibli differensial tenglamalardir.

n – tartibli oddiy differensial tenglamaning umumiy koʻrinishi quyidagicha:

$$F(x, y, y', y'', \dots, y^{(n)}) = 0 \quad (1.28)$$

bu yerda x – erkli oʻzgaruvchi; y – nomaʼlum funktsiya, $y', y'', \dots, y^{(n)}$ - nomaʼlum funktsiyaning hosilalari.

(13.4) ni koʻp hollarda quyidagi koʻrinishda yozish mumkin:

$$y^{(n)} = f(x, y, y', y'', \dots, y^{(n-1)}) \quad (1.29)$$

(13.5) ning yechimi (yoki integrali) deb uni qanoatlantiruvchi shunday $y = \phi(x)$ funktsiyaga aytiladiki, $\phi(x)$ ni (13.5) ga qoʻyganda u ayniyatga aylanadi.

Oddiy differensial tenglama yechimining grafigi uning integral egri chizigʻi deyiladi.

n -tartibli differensial tenglamaning yechimida n ta erkli oʻzgarmas son qatnashadi. Bu oʻzgarmas sonlarni oʻz ichiga olgan yechim umumiy yechim deyiladi. Umumiy yechimning grafik koʻrinishi integral egri chiziqlar dastasini ifodalaydi. Umumiy yechimda qatnashuvchi erkli oʻzgarmaslarning aniq son qiymatlari maʼlum boʻlsa umumiy yechimdan xususiy yechimni ajratib olish mumkin.

Umumiy yechimga kiruvchi erkli oʻzgarmaslar masalaning boshlangʻich shartlaridan aniqlanadi. Bunda masala quyidagicha qoʻyiladi: (1.29) differensial tenglamaning shunday yechimi $y = \phi(x)$ ni topish kerakki, bu yechim erkli oʻzgaruvchi x ning berilgan qiymati $x=x_0$ da quyidagi qoʻshimcha shartlarni qanoatlantirsin:

$$x = x_0 \text{ da } y = y_0, \quad y' = y'_0, \quad y'' = y''_0, \dots, y^{(n-1)} = y_0^{(n-1)} \quad (1.30)$$

(1.30) shartlar boshlangʻich shartlar deyiladi, $x_0, y_0, y'_0, y''_0, \dots, y_0^{(n-1)}$ - sonlar esa, yechimning boshlangʻich qiymatlari deyiladi. Boshlangʻich shartlar (1.30) yordamida umumiy yechimdan xususiy yechim ajratib olinadi.

Differensial tenglamalarning aniq yechimini topish juda kamdan – kam hollardagina mumkin boʻladi. Amaliyotda uchraydigan koʻpdan – koʻp

masalalarda aniq yechimni topishning iloji bo`lmaydi. Shuning uchun differentsial tenglamalarni yechishda tajribiy usullar muhim rol o`ynaydi. Bu usullar yechimlar qay tarzda ifodalanishlariga qarab quyidagi guruhlariga bo`linadilar:

1. Analitik usullar. Bu tajribiy usullarda yechim analitik (formula) ko`rinishda chiqadi.
2. Grafik usullar. Bu hollarda yechimlar grafik ko`rinishlarda ifodalanadi.
3. Raqamli usullar. Bunda yechim jadval ko`rinishida olinadi.

Hisoblash matematikasida mazkur uch guruhga kiruvchi bir qancha usullar ishlab chiqilgan. Bu usullarning bir-birlariga nisbatan muayyan kamchiliklari va ustunliklari mavjud. Elektr mexanikasi masalalarini yechishda shularni hisobga olgan holda u yoki bu usulni tanlab olish lozim bo`ladi. Differentsial tenglamani yechishda dastlab uni Koshi masalasida keltiriladi:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \quad (1.31)$$

differentsial tenglamaning $[a, b]$ kesimida aniqlangan va $y(x_0) = y_0$ boshlang'ich shartlarni qanoatlantiruvchi tajribiy yechimi topiladi.

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= f_1(x, y, z) \\ \frac{dz}{dx} &= f_2(x, y, z) \end{aligned} \right\} \quad (1.32)$$

$$y(x_0) = y_0, z(x_0) = z_0,$$

tajribiy qiymatlar $y(x_i) \approx y_i, z(x_i) \approx z_i$ uchun yaqinlashishlar quyidagi formula bo`yicha topiladi.

$$\left\{ \begin{aligned} y_{i+1} &= y_i + \Delta y_i, \Delta y_i = hf(x_i, y_i, z_i) \\ z_{i+1} &= z_i + \Delta z_i, \Delta z_i = hf(x_i, y_i, z_i) \end{aligned} \right\} \quad (1.33)$$

bu yerda $i=0, 1, 2, \dots, n$

Elektr mashinalar ilmiy muammolarini tadqiq etishda integral tenglamalardan ham keng foydalaniladi. Quyidagi

$y' = \frac{dy}{dx} = f(x, y); \quad dy = f(x, y)dx$ bu ifodaning ikkala tomonini x_0 dan x gacha

$$\int_{x_0}^x dy = \int_{x_0}^x f(x, y) dx \quad (1.34)$$

Bundan (13.8) hisobga olinsa,

$$y(x) = y_0 + \int_{x_0}^x f(x, y) dx \quad (1.35)$$

(1.36) da nomaʼlum funktsiya integral ifodasi ostida qatnashganligi tufayli u *integral tenglama* deb ataladi. (1.35) da $f(x,y)$ funktsiyadagi y oʻrniga uning maʼlum qiymati y_0 ni qoʻyib birinchi yaqinlashish boʻyicha yechimini topamiz:

$$y_1(x) = y_0 + \int_{x_0}^x f(x, y_0) dx \quad (1.36)$$

Endi (1.36) dagi $f(x,y)$ funksiyadagi y o`rniga uning ma`lum qiymati y_1 ni qo`ysak, ikkinchi yaqinlashish bo`yicha yechim $y_2(x)$ ni topamiz:

$$y_2(x) = y_0 + \int_{x_0}^x f(x, y_1) dx \quad (1.37)$$

Ushbu jarayonni davom ettirsak,

$$\left\{ \begin{array}{l} y_3(x) = y_0 + \int_{x_0}^x f(x, y_2) dx \\ \\ y_n(x) = y_0 + \int_{x_0}^x f(x, y_{n-1}) dx \end{array} \right. \quad (1.38)$$

Shunday qilib, o'zgaruvchining joriy qiymatlari ketma-ket aniqlanadi.

Elektr mashinalarni tadqiq qilishda uchraydigan ko'p masalalarni yechishda aniq integrallarni hisoblashga to'g'ri keladi. Faraz qilaylik, $\int_a^b f(x)dx$ hisoblash talab etilsin. Bu yerda $f(x)$ - $[a; b]$ kesmada berilgan uzluksiz funktsiya. Bu integralni hisoblashda quyidagi formula (N'yuton—Leybnits formulasi) qo'llaniladi:

$$\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a), \quad (1.39)$$

bu yerda $F(x)$ – boshlangich funktsiya. Agar boshlangich funktsiya $F(x)$ ni elementar funktsiyalar orqali ifodalab bo'lmasa yoki integral ostidagi funktsiya $f(x)$ jadval ko'rinishida berilsa, u holda (5.1) formuladan foydalanish mumkin emas. Bu holda aniq integralni tajribiy formulalar orqali hisoblashga to'g'ri keladi. Bunday formulalarga *kvadratur formulalar* deyiladi.

Aniq integralning geometrik ma'nosini hisobga olsak, quyidagini yozishimiz mumkin bo'ladi:

$$\int_a^b f(x)dx \approx h \cdot y_0 + hy_1 + hy_2 + \dots + hy_{n-1} = h(y_0 + y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1}) = h \sum_{k=0}^{n-1} y_k;$$

$$\int_a^b f(x)dx \approx h \sum_{k=0}^{n-1} y_k \quad (1.40)$$

Bu yerda to'g'ri to'rtburchak yuzini hisoblashda uning chap tomon ordinatasi olinadi. Agar o'ng tomon ordinatani olsak ham shunday formulaga ega bo'lamiz:

yoki

$$\int_a^b f(x)dx \approx h \sum_{k=1}^n y_k$$

$$\int_a^b f(x)dx \approx h(y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n) = h \sum_{k=1}^n y_k; \quad (1.41)$$

Bu xulosalarni nazarga olgan holda (1.40) va (1.41) formulalar hadlarini mos ravishda qo'shib o'rta arifmetigini olsak, quyidagi ifoda hosil bo'ladi:

$$\int_a^b f(x)dx \approx h \left(\frac{1}{2} y_0 + y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1} + \frac{1}{2} y_n \right) = h \left(\frac{y_0}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} y_k + \frac{y_n}{2} \right) \quad (1.42)$$

(1.42) formula *trapetsiyalar formulasi* deb ataladi. Bu formula yordamida topilgan integralning tajribiy qiymatining aniqligini oshirish uchun bo'linish nuqtalari soni «n» ni ikki, uch va x.k. marta oshirish kerak bo'ladi. Albatta bunda ham hisoblash hajmi bir necha marotaba oshadi.

Yuqorida ko`rilgan usullar tajribiy analitik usullar bo`lib, bu hollarda yechimlar analitik (formula) ko`rinishlarida olinadi. Bu usullar bilan topilgan yechimning aniqlik darajasi haqida fikr yuritish birmuncha murakkab bo`ladi. Masalan, ketma – ket differentsiallashtirish usulini qo`llaganda qatorning juda ko`p qadrlarini hisoblashga to`g`ri keladi va ko`p hollarda bu qatorning umumiy qadini aniqlab bo`lmaydi. Amaliy masalalarni yechishda yechimlarni formula ko`rinishida emas, balki jadval ko`rinishida olish qulay bo`ladi. Differensial tenglamalarni sonli usullar bilan yechganda yechimlar jadval ko`rinishida olinadi.

Eyler usuli. Quyidagi $y' = f(x, y)$ birinchi tartibli differentsial tenglamaning $[a, b]$ kesmada boshlang'ich shart $x = x_0$ bo`lgan hol uchun  $y = y_0$  ni qanoatlantiruvchi yechimining topilishi lozim bo`lsin. $[a, b]$ kesmani $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ nuqtalar bilan n ta teng bo`lakchalarga ajratamiz; bunda $x_i = x_0 + ih$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n$), $h = \frac{b - a}{n}$ - qadam.

Tenglamani $[a, b]$ kesmaga tegishli bo`lgan biror $[x_k, x_{k+1}]$ kesmada integrallasak,

$$\int_{x_k}^{x_{k+1}} f(x, y) dx = \int_{x_k}^{x_{k+1}} y' dx = y(x) \Big|_{x_k}^{x_{k+1}} = y(x_{k+1}) - y(x_k) = y_{k+1} - y_k \quad (1.43)$$

ya`ni,

$$y_{k+1} = y_k + \int_{x_k}^{x_{k+1}} f(x, y) dx \quad (1.44)$$

Bu yerda integral ostidagi funktsiyani $x = x_k$ nuqtada boshlang'ich o`zgarmas qiymatiga teng deb qabul qilinsa, quyidagini hosil qilamiz:

$$\int_{x_k}^{x_{k+1}} f(x, y) dx = f(x_k, y_k) \cdot x \Big|_{x_k}^{x_{k+1}} = f(x_k, y_k) \cdot (x_{k+1} - x_k) = y'_k \cdot h \quad (1.45)$$

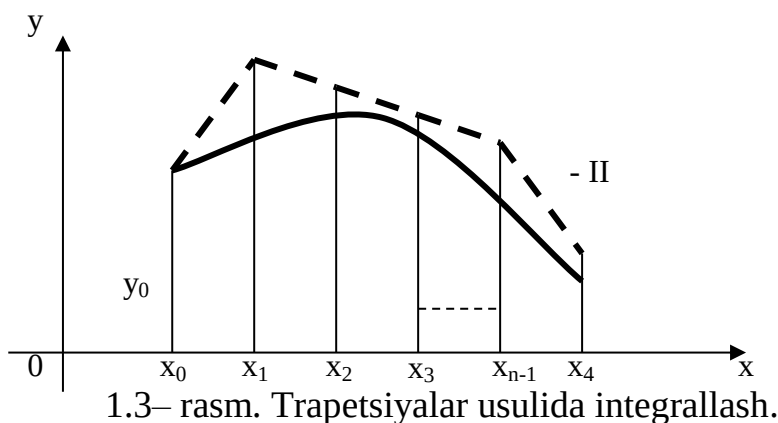
U holda (1.44) dan

$$y_{k+1} = y_k + y'_k h \quad (1.46)$$

$y_{k+1} - y_k = \Delta y_k$ ya`ni $y'_k h = \Delta y_k$ deb belgilasak,

$$y_{k+1} = y_k + \Delta y_k \quad (1.47)$$

Ushbu jarayonni $[a,b]$ ga tegishli boʻlgan har bir kesmacha uchun takrorlab, tenglamaning yechimini ifodalovchi jadvalini tuzamiz. Eyler usulining geometrik maʼnosi shundayki, bunda tenglamaning yechimini ifodalovchi integral egri chiziq siniq (II) chiziqlar bilan almashtiriladi (1.3 - rasm).



quyidagi

$$\begin{cases} y' = f_1(x, y, z) \\ z' = f_2(x, y, z) \end{cases} \quad (1.48)$$

uchun

$$x=x_0 \text{ da } y=y_0, z=z_0 \quad (1.49)$$

boshlangʻich shart berilgan. (14.5) ning tajribiy yechimlari quyidagi formulalar orqali topiladi:

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y_i, \quad z_{i+1} = z_i + \Delta z_i$$

bu yerda

$$\Delta y_i = hf_1(x_i, y_i, z_i); \quad \Delta z_i = hf_2(x_i, y_i, z_i) \quad (i = 0, 1, 2, \dots)$$

Runge - Kutta usuli koʻp jihatdan Eyler usuliga oʻxshash, ammo aniqlik darajasi eyler usuliga nisbatan yuqori boʻlgan usullardan biridir.

Runge-Kutta usuli bilan amaliy masalalarni yechish juda qulay. Chunki, bu usul orqali nomaʼlum funktsiyaning x_{i+1} dagi qiymatini topish uchun uning x_i dagi qiymati aniq boʻlishi yetarlidir. Runge-Kutta usuli uning aniqlash darajasiga koʻra bir necha turlarga boʻlinadi. Shulardan amaliyotda eng koʻp qoʻllaniladigani toʻrtinchi daraja aniqlikdagi Runge-Kutta usulidir.

Birinchi tartibli $y=f(x,y)$ differentsial tenglama uchun $x=x_i$ ($i=0,1,2,\dots,n$) $y=y_i$ ma'lum bo'lsin. Bu yerda y_i boshlang'ich shart ma'nosida bo'lmasligi ham mumkin. Noma'lum funktsiya y ning $x=x_{i+1}$ dagi qiymati $y_{i+1}=y_{i+1}(x)$ ni topish uchun quyidagi ketma-ket hisoblash jarayonini amalga oshirmoq lozim bo'ladi:

$$\left. \begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + h, \quad y_{i+1} = y_i + \Delta y_i, \\ \Delta y_i &= \frac{1}{6}[Q_1^{(i)} + 2Q_2^{(i)} + 2Q_3^{(i)} + Q_4^{(i)}], \end{aligned} \right\} \quad (1.50)$$

bu yerda

$$\begin{aligned} Q_1^{(i)} &= hf(x_i, y_i), \\ Q_2^{(i)} &= hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{Q_1^{(i)}}{2}\right), \\ Q_3^{(i)} &= hf\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{Q_2^{(i)}}{2}\right), \\ Q_4^{(i)} &= hf(x_i + h, y_i + Q_3^{(i)}), \end{aligned} \quad (1.51)$$

$i=0,1,2,\dots,n-1$, $h=\frac{b-a}{n}$ - integrallash qadami.

Tenglamaning yechimi qidirilayotgan $[a,b]$ kesma $x_i = x_0 + ih$ ($i=0,1,2,\dots,n$) nuqtalar bilan o'zaro teng n ta bo'lakka bo'lingan. i ning ha bir qiymati uchun (1.50) va (1.51) dagi amallarni bajaramiz va noma'lum funktsiya y ning qiymatlarini (tenglamaning yechimini) quyidagi formuladan topamiz:

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y_i \quad (i=0,1,2,\dots,n) \quad (1.52)$$

Sonli differentsiallashtirish usuli. Ko'p amaliy masalalarda funktsiya hosilalarini ayrim nuqtalarda tajribiy hisoblashga to'g'ri keladi. Masalan, chulg'amdagi EYuKni tokni vaqt bo'yicha differentsiallashtirish orqali hisoblash mumkin. Bu masala sonli differentsiallashtirish masalasi deyiladi. Funktsiyaning analitik ko'rinishi noma'lum bo'lib uning ayrim nuqtalaridagi qiymatlari ma'lum bo'lsa, masalan, tajribadan topilgan bo'lsa, u holda uning hosilasi sonli differentsiallashtirish yo'li bilan topiladi. Umuman aytganda, funktsiyaning sonli differentsiallashtirish masalasi doimo bir qiymatli ravishda yyechilavermaydi. Masalan, $f(x)$ funktsiyaning $x=x_0$ nuqtadagi hosilasini topish uchun $h>0$ ni olib,

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} \quad (1.53)$$

yoki

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0) - f(x_0 - h)}{h} \quad (1.54)$$

yoki

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + h) - f(x_0 - h)}{2h} \quad (1.55)$$

kabi olishimiz mumkin. Ko'pincha (1.53) o'ng hosila, (1.54) chap hosila va (1.55) markaziy hosila deyiladi.

Vaqt bo'yicha hosila qiymatlarini qo'yib chiqib differensiallanuvchi funksiyaning qiymati aniqlanadi.

Elektr mashinalarni differensial va integral tenglamalar ko'rinishdagi matematik modellari kompyuterda sonli integrallash yoki sonli differentsiallashtirish usullari orqali yechimlari aniqlanadi va tadqiqotlar olib boriladi. SHuning uchun elektr mashinalarni analitik tadqiqotlar olib borishda ushbu sonli hisoblash usullarini bilish muhim ahamiyatga ega bo'ladi.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Dinamik jarayonlar nima?
2. differensial va integral tenglamalar nima?
3. Klassik (analitik) va operatorli metodlarni tushuntiring.
4. Sonli differentsiallashtirish usuli nima?
5. Sonli integrallashni Eyler usulini tushuntiring.

1.5. Elektr mashinalardagi elektromagnit jarajonlarini tadqiq qilishda

Fure qatorlarini qo'llash

Kalit so'zlar: Fur'e qatorlari, nochoziqli qarshilik, Dirixle sharti, Fure qatoridagi koeffitsientlari, yuqori garmonika, nosinusoidal davriy fuksiya, effektiv qiymat, o'rtacha qiymat, standart signal, garmonika tartibi.

Elektr mexanikasining ayrim muammolarini tadqiq qilishda Fur'e qatorlaridan foydalaniladi. O'zgaruvchan tok elektr energiyasi parametrlari (tok, kuchlanish, quvvat va h.k.) sinusoidalligi buzilganda uning garmonik tarkibini tadqiq qilishda Fure qatorlaridan foydalaniladi [10]. Tarmoq kuchlanishi (yoki tokini) sinusoidalligini buzilishiga olib keluvchi asosiy sabablar quyidagilar:

- tarmoqdagi nochiziqli qarshilikka ega bo'lgan qurilmalarning (yarim o'tkazgichli qurilmalar) ulanishi;
- elektr mashinalar va transformatorlarning magnit zanjirining to'yinishi;
- elektr tarmoqlar boshqaruv tizimlarida nosinusoidal signallarni generatsiyalovchi manbalardan foydalanish.

Elektr tarmoqlarda kuchlanishning sinusoidalligining buzilishi quyidagi salbiy oqibatlarga olib keladi:

- o'zgaruvchan tok mashinalarida teskari aylanuvchi magnit maydonlar hosil bo'lishi bilan motor aylantirish momentini va foydali quvvatini kamaytiradi;
- kuchlanish tarkibidagi yuqori garmonika toklariga mutanosib ravishda tarmoq elementlarida qo'shimcha isroflarni vujudga keltiradi;
- o'lchash va qaydlov tizimlarida xatoliklarni keltirib chiqaradi;
- himoya va avtomatika qurilmalarini yanglish ishlashini keltirib chiqaradi.

Elektr tarmoqlarda kuchlanishni sinusoidalligi buzilganda dastlab uning garmonik tarkibi aniqlanadi. YA'ni, nosinusoidal kuchlanish bir nechta sinusoidalar yig'indisiga olib kelinadi. Bunda davriy nosinusoidal funktsiyani Fure qatorlariga yoyish usulidan foydalanamiz.

Oliy matematika kursidan ma'lumki, Dirixle shartini qanoatlantiruvchi har qanday uzluksiz davriy funsiya $f(t)$ ni Fure qatoriga yoyish mumkin:

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + A_2 \sin(2\omega t + \alpha_2) + \dots + A_k \sin(k\omega t + \alpha_k). \quad (1.56)$$

bu yerda : $A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(\omega t) dt$ - o'zgarmas tashkil etuvchi,

$A_1 \sin(\omega t + \alpha_1)$ - asosiy , yoki birinchi garmonika

$A_k \sin(k\omega t + \alpha_k)$ – k tartibli yuqori garmonika yoki k-garmonika

A_k, φ_k - berilgan funksiya $f(t)$ ning k -garmonikasining amplitudasi
va boshlangich fazasi,

$\omega = \frac{2\pi}{T}$, T – funksiyaning burchagiy chastotasi va o'zgarish davri.

Fure qatoridagi koefitsientlarini aniqlaymiz:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x dx = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{x^2}{2} \Big|_{-\pi}^{\pi} = 0 \quad (1.57)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x \cos nx dx = \frac{1}{\pi} \left[x \frac{\sin nx}{n} \Big|_{-\pi}^{\pi} - \frac{1}{n} \int_{-\pi}^{\pi} \sin nx dx \right] = 0 \quad (1.58)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x \sin nx dx = (-1)^{n+1} \cdot \frac{2}{n} \quad (1.59)$$

Demak,

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \left(\frac{2}{n} \sin nx \right) = 2 \left(\frac{\sin x}{1} - \frac{\sin 2x}{2} + \frac{\sin 3x}{3} + \dots + (-1)^{n+1} \frac{\sin nx}{n} \right) \quad (1.60)$$

Amalda elektr va magnit zanjirlarning elementlarida hosil bo'lgan barcha davriy nosinusoidal elektromagnitaviy miqdorlar Dirixle shartini qanoatlantiradi. Shuning uchun Fure qatorini hosil qiluvchi o'zgarmas va sinusoidal tashkil etuvchilar ekvivalent tarzda almashtirilishi mumkin. Nazariy jihatdan olganda Fure qatori cheksiz ($k \rightarrow \infty$) bo'lib, amalda har qanday o'ta murakkab davriy chiziqlarni yetarlicha katta aniqlikda Fure qatori bilan ko'rsatish mumkin. Fure qatorining koefitsientlarini aniqlash uchun (1.60)ni quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$\begin{aligned} f(t) = & A_0 + A_1 \cos \alpha_1 \sin \omega t + A_1 \sin \alpha_1 \cos \omega t + A_2 \cos \alpha_2 \sin 2\omega t + \dots + A_2 \sin \alpha_2 \cos 2\omega t + \dots \\ & + A_k \cos \alpha_k \sin k\omega t + A_k \sin \alpha_k \cos k\omega t + \dots = A_0 + B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + \dots + B_k \sin k\omega t + \dots \quad (1.61) \\ & + C_1 \cos \omega t + \dots + C_2 \cos 2\omega t + \dots + C_k \cos k\omega t. \end{aligned}$$

Tarkibida bir nechta garmonika bo'lgan nosinusoidal davriy fuksiyalarga misollar sifatida quyidagi ifodalar bilan olingan va 1.4 - 1.6-rasmlarda keltirilgan grafiklarni keltirish mumkin:

$$f(t) = 100 \sin(\omega t + 30^\circ) + 20 \sin(5\omega t + 180^\circ) + 10 \sin(7\omega t + 30^\circ) \quad (1.62)$$

$$f(t) = 100 \sin(\omega t + 30^\circ) + 20 \sin(5\omega t + 0) + 10 \sin(7\omega t + 0) \quad (1.63)$$

$$f(t) = 100 \sin(10t + 0) + 30 \sin(30t + 0,52) \quad (1.64)$$

$$f(t) = 10 + 100 \sin(10t + 0,52) + 20 \sin(30t + 0) + 10 \sin(50t + 0,3) \quad (1.65)$$

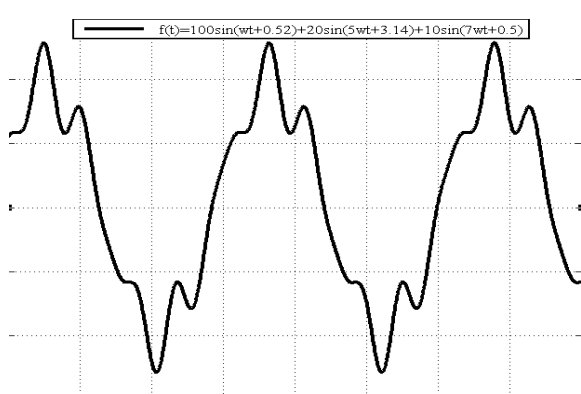
Nosinusoidal miqdorni garmonika tashkil etuvchilari yig'indisi tegishli qayidagicha teng bo'ladi:

$$V_k = \frac{2}{T} \int f(t) \sin k\omega t dt \quad (1.66)$$

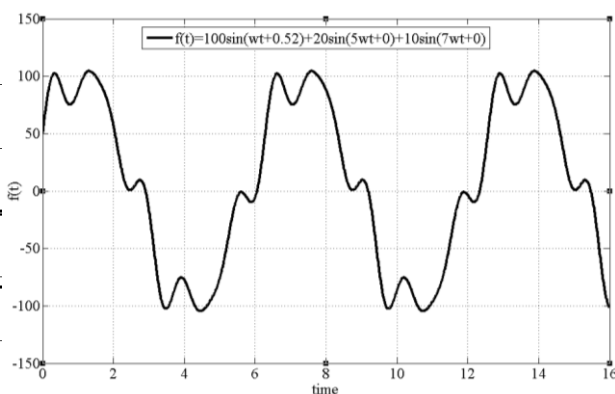
$$C_k = \frac{2}{T} \int f(t) \cos k\omega t dt \quad (1.67)$$

Tashkil etuvchilar V_k va S_k orqali k - garmonikaning amplitudasi va boshlang'ich fazasini quyidagidek aniqlaymiz:

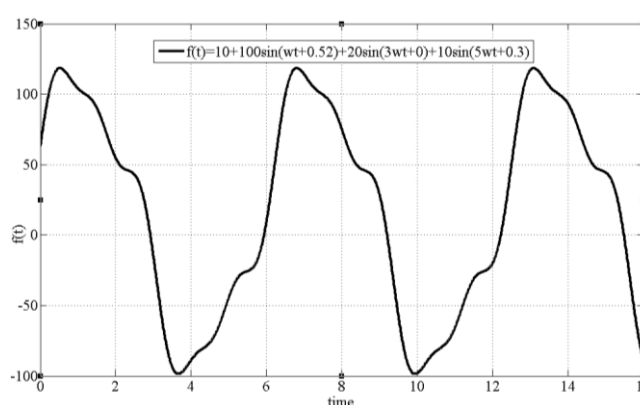
$$A_K = \sqrt{B_K^2 + C_K^2}, \quad \alpha_K = \arctg \frac{C_K}{B_K}. \quad (1.68)$$



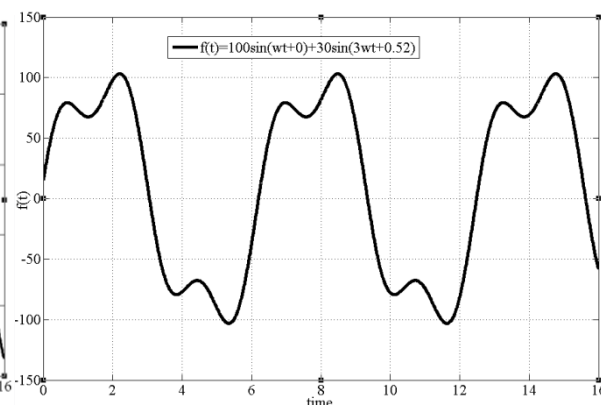
1.4-rasm. (1.62) ifoda grafigi



1.5-rasm. (1.63) ifoda grafigi



1.5-rasm. (1.64) ifoda grafigi



1.6-rasm. (1.65) ifoda grafigi

Nosinusoidal EYK, tok va kuchlanishlarning qiymatlarini quyidagi analitik yig'indi ko'rinishida ifodalash mumkin:

$$\begin{aligned}
e &= e_0 + e_1 + e_2 + \dots + e_k + \dots, \\
u &= u_0 + u_1 + u_2 + \dots + u_k + \dots, \\
i &= i_0 + i_1 + i_2 + \dots + i_k + \dots
\end{aligned}
\quad (1.69)$$

Agar r, L, C elementlari ketma-ket ulangan birorta murakkab zanjirga
 $u = U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_{u1}) + U_{2m} \sin(2\omega t + \psi_{u1}) + \dots + U_{km} \sin(k\omega t + \psi_{uk}), \quad k=n \quad (1.70)$

Kuchlanish ta'sir ettirilsa, tok $i = \sum i_k$

kuchlanish egri chizig'ining shakli jixatidan farq qiladi.

Masalan: k-garmonika tokining oniy qiymati quyidagiga teng:

$$i_k = I_{km} \sin(k\omega t + \psi_{uk} - \varphi_k), \quad (1.71)$$

bu yerda: $I_{km} = \frac{U_{km}}{Z_k}$ - tokning amplitudasining qiymati

$Z_k = \sqrt{r^2 + (k\omega L - 1/k\omega C)^2}$ - k-garmonikadagi to'la qarshiligi.

$$\varphi_k = \arctg \frac{k\omega L - \frac{1}{k\omega C}}{r}, \quad (1.72)$$

φ_k - kuchlanish u_k va tok i_k orasidagi faza siljishi burchagi.

$Z_0 = \sqrt{r^2 + (0 - \infty)^2} = -\infty$ bo'lgan uchun tokda o'zgarish tashkil etuvchilar

bo'lmaydi. Chunki o'zgarish tok uchun $\omega=0$.

Nosinusoidal elektr miqdorlarining maksimal, effektiv va o'rtacha qiymatlarini aniqlaymiz. Davriy nosinusoidal funksiya $f(t)$ ning amplituda qiymati uchun bir davr ichida o'zgarishi natijasida erishgan oniy qiymatlaridan eng kattasi olinadi.

Funksiya $f(t)$ ning effektiv qiymati uchun, sinusoidal funksiyalardagiga o'xshash, bir davr ichidagi o'rtacha kvadratik qiymati olinadi.

$$A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(\omega t) dt} \quad (1.73)$$

Elektr oʻlchash asboblarning koʻrsatishi ana shu miqdorlarga moslangan boʻladi. Ixtiyoriy davriy nosinusoidal kuchlanishning oʻzgarish qonuniyati va garmonik tarkibi quyidagicha berilgan boʻlsin:

$$u(\omega t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} U_{km} \sin(k\omega t + \psi_{ku}) \quad (1.74)$$

(1.66) tenglamaga binoan kuchlanishning effektiv qiymati quyidagicha boʻladi:

$$U = \sqrt{\frac{1}{m} \left[\sum_{k=0}^{k=\infty} U_{km} \sin(k\omega t + \psi_{ku}) \right]^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=0}^{\infty} \int_0^m U_{km}^2 \sin^2(k\omega t + \psi_{ku}) dt + \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{\infty} \int_0^m U_{qm} U_{ms} \sin(q\omega t + \psi_{qk}) \sin(S\omega t + \psi_{sk}) dt} \quad (1.75)$$

ildiz ostidagi ifodaning ikkinchi tashkil etuvchisi integrali nolga teng. Kuchlanish effektiv qiymatining kvadrati endi quyidagicha boʻladi:

$$U^2 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T U_{km}^2 \sin^2(k\omega t + \psi_{ku}) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_0^2 dt + \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^T \frac{U_{km}^2}{2} [1 - \cos(2k\omega t + 2\psi_{ku})] dt = \\ = U_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_{km}^2}{2} = U_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k^2 = \sum_{k=0}^{\infty} U_k^2. \quad (1.76)$$

Davriy nosinusoidal kuchlanish, e.yu.k. Va toklarning effektiv qiymatlari. Har bir

$k\omega$ chastotali garmonikaning effektiv kuchlanishi $U_k = \frac{U_{km}}{2}$

Kuchlanishi quyidagi koʻrinishda berilsa:

$$u = U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \psi_{1n}) + U_{2m} \sin(2\omega t + \psi_{2m}) + U_{3m} \sin(3\omega t + \psi_{3u}) + \dots + \\ + U_{nm} \sin(k\omega t + \psi_{ku}) + \dots,$$

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_k^2 + \dots} \quad (1.77)$$

E.Yu.K. va toklarning effektiv qiymatlari shunga oʻxshash yoʻl bilan hisoblanadi:

$$E_{ef} = \sqrt{E_0^2 + E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_k^2 + \dots} \quad (1.78)$$

$$I_{ef} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2 + \dots} \quad (1.79)$$

Nosinusoidal davriy funksiya $f(\omega t)$ ning oʻrtacha qiymati umumiy holda

$$A_{o\cdot r} = \frac{1}{T} \int_0^T [f(\omega t)] dt \quad (1.80)$$

Asosi davr Tga teng bo'lgan shartli to'g'ri to'rt burchaklikning balandligiga baravar. Bu to'g'ri to'rt burchaklikning yuzi esa $(\omega t_2 - \omega t_1) = T$ oralig'ida $f(\omega t)$ egri chiziqli bilan chegaralangan yuzalarning arifmetik yig'indisiga teng. Agar $f(\omega t)$ egri chiziqli ωt o'qiga nisbatan simmetrik bo'lsa, quyidagicha bo'ladi:

$$A_{o\cdot r} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(\omega t) dt \quad (1.81)$$

Davriy nosinusoidal tokning quvvatini aniqlaymiz. O'zgaruvchan tokning oniy quvvati zanjir tok i bilan u hosil qilgan kuchlanish U tushuvining ko'paytmasiga teng bo'ladi. Bu quvvatning bir davr ichidagi o'rtacha qiymati yoki aktiv quvvati:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt \quad (1.82)$$

Nosinusoidal o'zgaruvchan kuchlanish va tok qiymatlarini ikkita trigonometrik qatorga yoysak:

$$u = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin(k\omega t + \psi_{uk}) \quad (1.83)$$

$$i = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_{ik}) \quad (1.84)$$

Quvvat quyidagicha ifodalanadi:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T \left[U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin(k\omega t + \psi_{uk}) \right] \left[I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_{ik}) \right] dt = \\ &= U_0 I_0 + \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_{uk}) \sin(k\omega t + \psi_{ik}) dt + \\ &\quad + \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{\substack{q=0 \\ s=0 \\ q \neq s}}^{\infty} U_{qm} I_{sm} \sin(q\omega t + \psi_{uq}) \sin(s\omega t + \psi_{is}) dt \end{aligned} \quad (1.85)$$

Turli $q\omega$ va $s\omega$ chastotalarning sinus tashkil etuvchilari yig'indilarning integrali nolga teng bo'lgani uchun quyidagini yozamiz:

$$P = U_0 I_0 + \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_{km} I_{km}}{2} [\cos(\psi_{uk} - \psi_{ik}) - \cos(2k\omega t + \psi_{uk} + \psi_{ik})] dt =$$

$$U_0 I_0 + \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k dt = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots +$$

$$+ U_k I_k \cos \varphi_k = P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_k.$$
(1.86)

$$S = U \cdot I = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_k^2 + \dots} \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots} =$$

$$\sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2 \sum_{k=0}^{\infty} I_k^2},$$
(1.87)

$$Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + \dots + U_k I_k \sin \varphi_k + \dots = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k$$
(1.88)

Aktiv quvvatning to'la quvvatga nisbatini $\cos \alpha$ bilan belgilasak,

$$\cos \alpha = \frac{P}{S} = \frac{P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_k}{\sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_k^2 + \dots} \times \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2 + \dots}}$$
(1.89)

Davriy nosinusoidal o'zgaruvchan tokli zanjirning quvvat koeffisienti deb ataymiz. Injenerlik hisoblarida quyidagicha aniqlanadi:

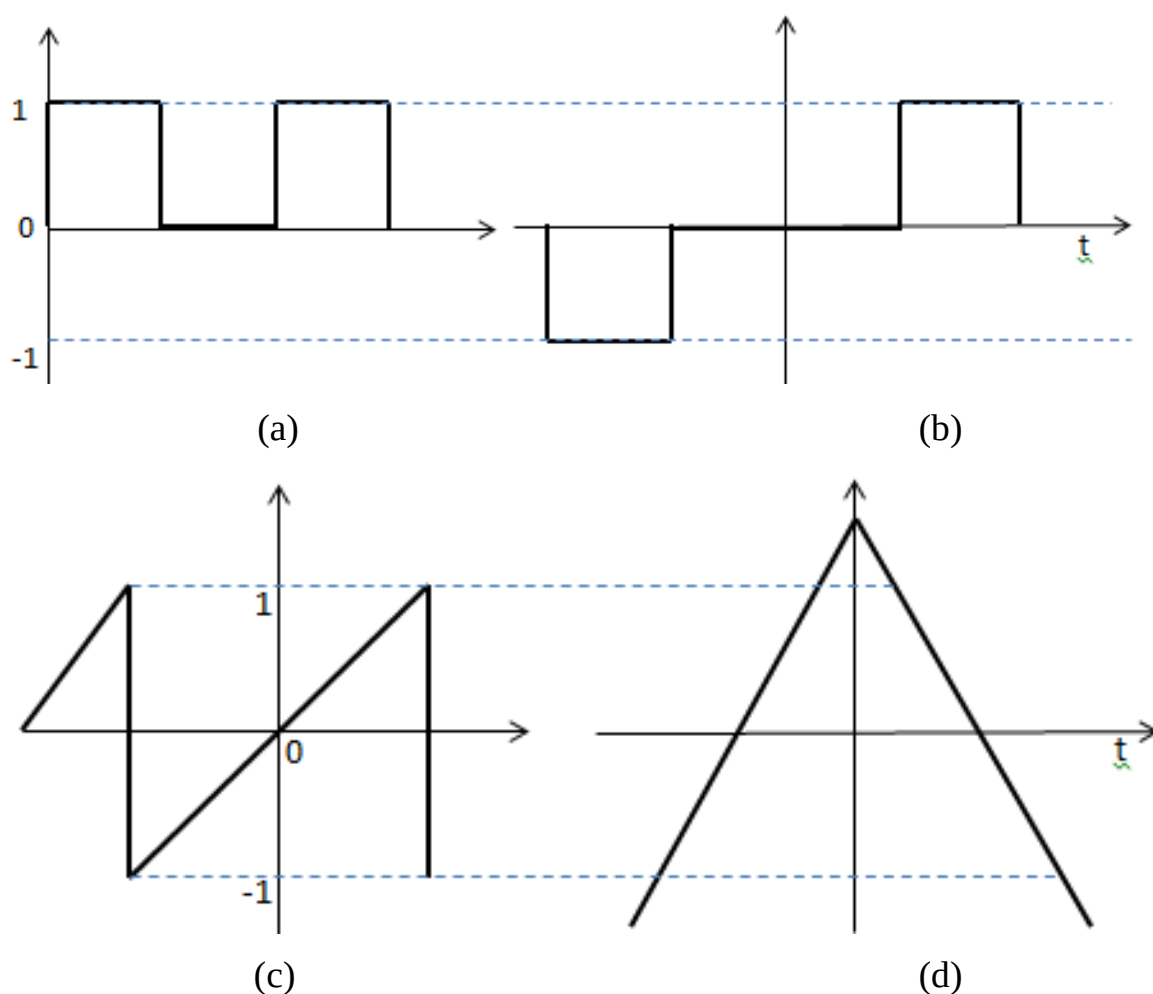
$$\cos \alpha = \frac{P}{S}$$
(1.90)

Barcha hollarda $\cos \alpha < 1$. Kuchlanish va toklarning egri chiziqlarida yuqori garmonikalarning bo'lishi zanjir quvvat koeffisientining pasayishiga olib keladi. Katta quvvatli elektroenergetik tizimlarda manba kuchlanishi egri chizig'ining shakli iloji boricha sinusoidaga yaqin bo'lishi muhim ahamiyatga ega.

Nosinusoidal tok elektr zanjirlarini to'g'ridan – to'g'ri hisoblash ulullari mavjud emas. SHuning uchun nosinusoidal toklar bir nechta sinusoidal toklar ko'rinishiga keltirilib, elektr zanjirlarni hisoblashning simvolik usulini qo'llab hisoblanadi. Bundan tashqari, har xil standart ko'rinishdagi (uchburchak, to'rtburchak ko'rinishdagi) signallarni hisoblashda Fure qatorlaridan foydalaniladi. Bunday standart signallarni Fure qatorlarga yoyilgan ifodalarini ko'rib chiqamiz.

(1.91) ifoda 1.7–rasm (a) da ko‘rsatilgan musbat to‘g‘ri to‘rtburchak ko‘rinishidagi, (1.92) ifoda 1.7–rasm (b) da ko‘rsatilgan koordinata boshiga nisbatan simmetrik bo‘lgan to‘rtburchak ko‘rinishidagi, (1.93) ifoda 1.7–rasm (c) da ko‘rsatilgan arrasimon ko‘rinishidagi, (1.94) ifoda esa 1.7–rasm (d) da ko‘rsatilgan teng yonli uchburchak ko‘rinishidagi davriy o‘zgaruvchan funksiya grafigini ifodalaydi.

$$f(x) = \frac{1}{2} + \frac{1-(-1)}{\pi} \sin x + \frac{1-(-1)^2}{2\pi} \sin 2x + \frac{1-(-1)^3}{3\pi} \sin 3x + \dots = \frac{1}{2} + \frac{1-(-1)^n}{n\pi} \sin nx \quad (1.91)$$



1.7-rasm. Standart signallarni Fure qatoriga yoyish.

$$f(x) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} (\cos \frac{n\pi}{2} - \cos n\pi) \sin nx \quad (1.92)$$

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} (-1)^{n+1} \sin nx \quad (1.93)$$

$$f(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2x+1)x}{(2x+1)^2} \quad (1.94)$$

Tarmoq kuchlanishi sinusoidalligini buzilishi nosinusoidallik koeffitsienti bilan aniqlanadi va bu ko'rsatkich elektr energiyasining asosiy sifat ko'rsatkichlaridan biri hisoblanadi. Kuchlanishni nosinusoidallik koeffitsienti quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$K_{cuH} = \frac{U_{y.g}}{U_{n.f}} \cdot 100\% = 1 - \frac{\sum U_i}{U_{n.f}} \quad (1.95)$$

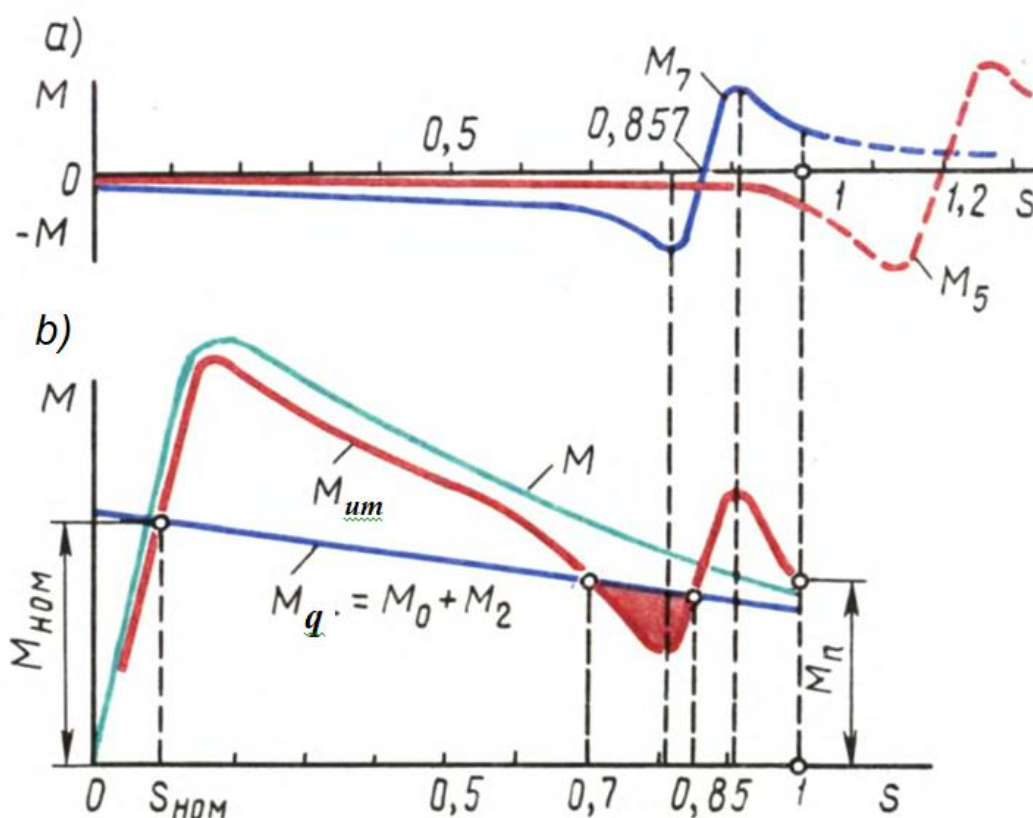
$U_{y,g}$ —yuqori garmonika toklarning yig'indi effektiv qiymati, V; i - garmonika tartibi.

Garmonikalar tarkibi va yuqori garmonikalarni effektiv qiymati energetik tadqiqotlar vaqtida garmonik analizatorlar vositasida aniqlanadi yoki garmonik qatorga yoyib hisoblanadi. Nosinusoidal miqdorlarni Fure qatoriga yoyishda asosan Chebishevning grafoanalitik usuldan foydalanib hisoblanadi.

Tarmoq kuchlanishi buzilishidan hosil bo'lgan yuqori garmonikalar o'zgaruvchan tok mashinalari havo oralig'ida garmonika tartibiga teng bo'lgan aylanuvchan magnit maydonlar hosil qiladi. Ayrim garmonikalar asosiy maynit maydon aylanishiga mos, ayrimlari teskari aylanuvchi magnit maydonlarni hosil qiladi. Masalan, uchinchi garmonika toklari keyingi faza uchinchi garmonika toklari bilan teskari fazada bo'lgani uchun o'zaro yo'qotiladi va asosiy magnit maydonga ta'sir ko'rsatmaydi. 5 va 7 garmonika toklari esa teskari aylanuvchan magnit maydonlarni (1.8-rasm, a) hosil qiladi. 7 –garmonika toklari rotor tezligi nominal tezlikning 1.7 tezligiga chiqquncha asosiy magnit maydonga mos yo'nalishda aylanuvchan magnit maydon hosil qiladi. Bu motor yurg'izish momentini oshishiga olib keladi (1.8-rasm, b). Bu tezlikdan oshgandan keyin 7-garmonika toklari teskari aylanuvchan maydon hosil qiladi va motor aylantiruvchi momentini kamaytiradi.

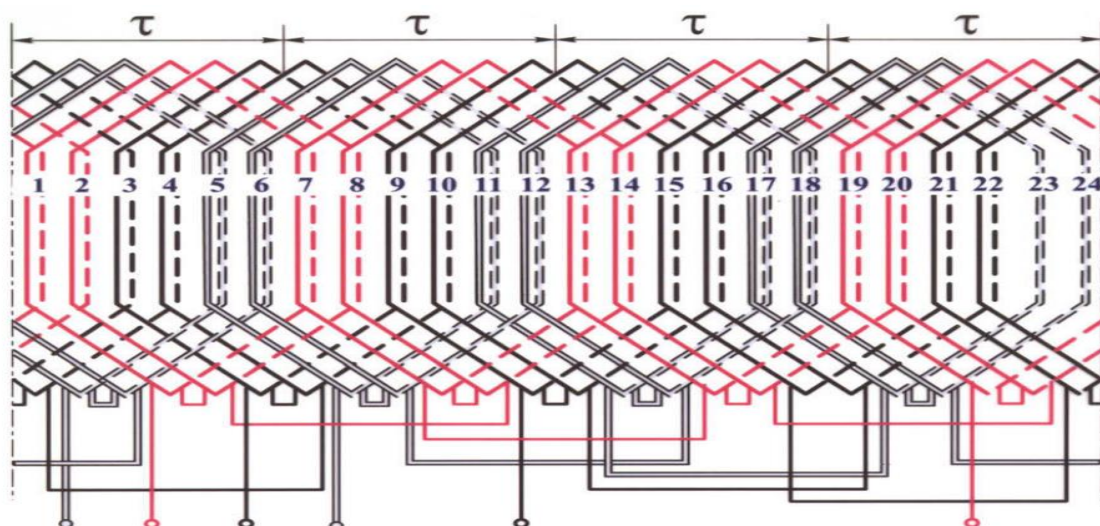
Chulg'amlarda magnit maydondagi yuqori garmonikalarni ta'sirini yo'qotish uchun chulg'am qadami qisqartiriladi. Agar, chulg'am qadami 1/5 qadamga qisqartirilsa 5 garmonika qisqaradi, chulg'am qadami 1/7 qadamga

qisqartirilsa 7 garmonika qisqaradi va hokazo. Chulg'am qadami qisqarishi bilan hosil bo'ladigan EYuK ham qisqaradi. Bu qisqartirish k_{qis} - koeffitsienti bilan hisobga olinadi. $k_{qis} = 0.97$ ekani bu chulg'am qadami qisqatirilgan chulg'am mujassamlangan chulg'amning 97% EYuK ini hosil qilishini bildiradi. Qisqartirish k_{qis} - koeffitsienti va k_{taq} - taqsimlash koeffitsienti ko'paytmasi chulg'am koeffitsienti deyiladi. Yu'ni, $k_{ch} = k_{qis} \cdot k_{taq}$ bo'lib chulg'amni tavsiflovchi asosiy kattalik hisoblanadi.

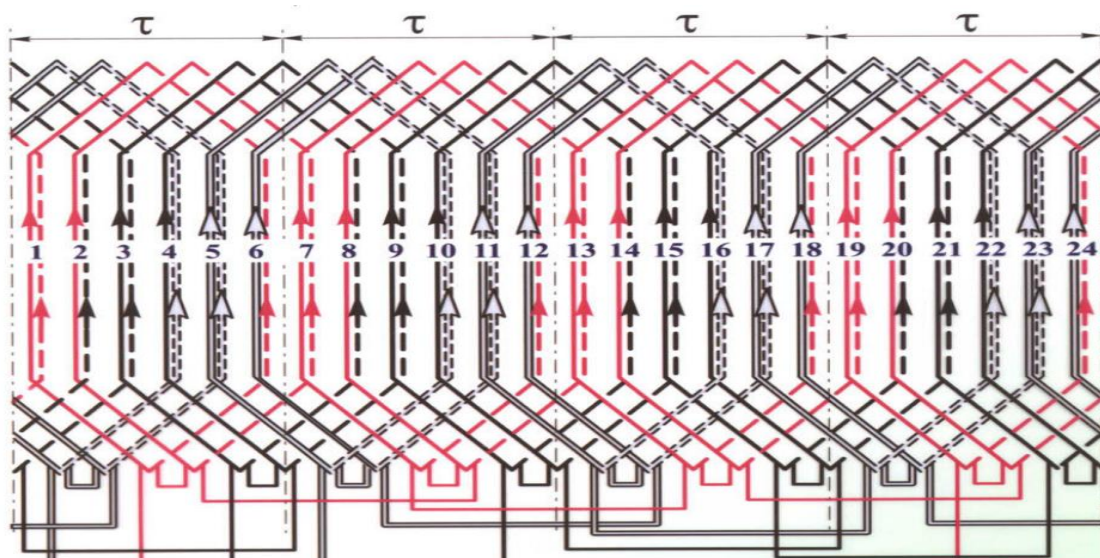


1.8-rasm. Asinxron motor havo oralig'idagi elektromagnit momentga yuqori garmonikalarning ta'siri: a) 5 va 7 garmonikalar hosil qilgan momentlar, b)-hosil bo'lgan umumiy moment.

Chulg'am qadamini qisqartirish uchun ikki qatlamli chulg'amlardan foydalaniladi. 1.9 –rasmda “qadami qisqartirilmagan ikki qatlamli” va 1.10 – rasmda esa, “qadami qisqartirilgan ikki qatlamli” chulg'am ko'rsatilgan.



1.9-rasm. Ikki qatlamli uch fazali chulg'am sxemasi.



1.10-rasm. Ikki qatlamli qadami qisqartirilgan uch fazali chulg'am sxemasi.

Rotor va stator tish hamda pazlarida magnit maydon turlicha taqsimlangani uchun pulsatsiyalanuvchi EYuK va toklar paydo bo'ladi. Bu o'z navbatida po'latda qo'shimcha isroflar sirt isroflari va pulsatsiyalanuvchi isroflarni vujudga keltiradi. Sirt isroflari havo oralig'ida magnit oqim o'zgarishlaridan vujudga keladigan induksiyadan hosil bo'ladi [11]. Bu o'zgarishlar havo oralig'ining kengligini o'zgarishiga stator va rotordagi pazlar soniga bog'liq bo'ladi. Bu o'zgarishlar tufayli tishlarni havo oralig'i bilan tutashgan yuzalarida uyurmaviy EYuK lar va toklar paydo bo'ladi o'z navbatida qo'shimcha isroflarni keltirib chiqaradi. Pulsatsiyalanish chastotasi tishlar soni va rotorni aylanish tezligiga proporsional

bo'ladi. Tish kallagini yuqori yuzasida uyurmaviy toklar hosil qiladi va isroflarni vujudga keltiradi.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Fur'e qatorlari nima?
2. Nochiziqli qarshilik nima?
3. Dirixle sharti nima?
4. Fure qatoridagi koeffitsientlarini yozib bering.
5. Yuqori garmonika nima?
6. Nosinusoidal tokning effektiv va o`rtacha qiymati nima?
7. Standart signallarni garmonikalarga yoyish tartibini izohlang.

II-BOB. ELEKTROMEXANIK O'ZGARISH JARAYONLARINI TAHLIL QILISH MATEMATIK METODLARI

2.1. Energiyani elektromexanik o'zgarishlarini tahlil qilishda vektorlar algebrasidan foydalanish

Kalit so'zlar: vektorlar, skalyar kattalik, vektor moduli, kollinear vektorlar, vektorlarni qo'shish, vektorni ko'paytirish, vektor koordinatalari, vektor oqimi, vektorlarning skalyar ko'paytmasi, fazoviy vektor, vektor diagrammasi.

Elektr mashinalarni elektromagnit va elektromexanik jarayonlarni tadqiq qilishda ularni elektr zanjirlari ko'rinishiga keltirib, ularni hisoblashda elektr zanjirlar nazariyasi qonuniyatlari hamda hisoblash usullaridan keng foydalaniladi. Jumladan, elektr mashinalarni tavsiflovchi o'zgaruvchan kattaliklarni vektorlar yoki vektor diagrammalari ko'rinishida ifodalash tadqiqotchiga keng imkoniyatlar yaratadi [8]. Elektr mashinalarda uchraydigan barcha kattaliklarni ikki turga: skalyar va vektor kattaliklarga ajratiladi. Faqat sonli qiymatlari bilan aniqlanadigan kattaliklar skalyarlar deb ataladi. Masalan, mashinalar massasi va o'lchamlari, vaqt, FIK, magnit maydon kuchlanganligi, qutblar soni skalyarlar bo'ladi. Skalyarlar a, v, s kabi belgilanadi. Sonli qiymati va yo'nalishi bilan aniqlanadigan kattaliklar vektorlar deyiladi. Masalan, tok, kuchlanish, magnit induksiya vektor kattaliklar bo'ladi. Vektorlar $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ kabi belgilanadi. $\vec{a}$ vektorning sonli qiymati uning *moduli* yoki *uzunligi* deb ataladi va $|\vec{a}|$ kabi belgilanadi. Geometrik nuqtai-nazardan vektorlar yo'naltirilgan kesmalar singari qaraladi. Yo'naltirilgan kesmaning boshi A va oxiri B nuqtada bo'lsa, tegishli vektor $\overrightarrow{AB}$ kabi belgilanadi. Bunda A nuqta vektorning boshi, B nuqta esa vektorning uchi, kesma uzunligi vektor uzunligi deyiladi, ya'ni $|AB| = |\overrightarrow{AB}|$.

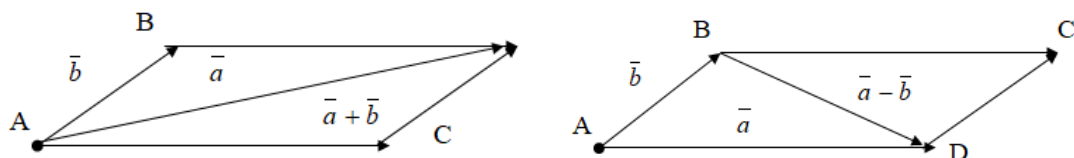
Vektor fazoning ikkita nuqtasi uning boshi va oxiri bilan aniqlanadi. Agar, barcha vektorlar fazoning birdan-bir nuqtasi - koordinata boshidan boshlansa, u holda bu vektorni aniqlash uchun faqat birta nuqtani, ya'ni uning oxirini ko'rsatish yetarli bo'ladi. Bu nuqta o'z novbatida uning koordinatalari bo'lmish uchta son orqali ifodalanadi.

Boshi va uchi birta nuqtadan iborat bo'lgan vektor nol vektor deyiladi. Nol vektor $\vec{0}$ kabi belgilanib, uning moduli $|\vec{0}|=0$ bo'ladi. Bu vektor yo'nalishi to'g'risida so'z yuritib bo'lmaydi. Bir to'g'ri chiziqda yoki parallel to'g'ri chiziqlarda joylashgan vektorlar *kollinear* vektorlar deb ataladi.

Masalan, ABCD parallelogramm bo'lsa, $\overrightarrow{AD}$ va $\overrightarrow{BC}$, $\overrightarrow{AB}$ va $\overrightarrow{CD}$ vektorlar kollinear, $\overrightarrow{AD}$ va $\overrightarrow{AB}$, $\overrightarrow{AC}$ va $\overrightarrow{AB}$ vektorlar esa, kollinear bo'lmaydi. Nol vektor $\vec{0}$ har qanday $\vec{a}$ vektorga kollinear deb hisoblanadi.

Ikkita $\vec{a}$, $\vec{b}$ vektorlar teng deyiladi va $\vec{a}=\vec{b}$ kabi belgilanadi, agarda quyidagi uchta shart bajarilsa: $\vec{a}$ va $\vec{b}$ vektorlar kollinear; $\vec{a}$ va $\vec{b}$ vektorlar bir xil uzunlikka ega, ya'ni $|\vec{a}|=|\vec{b}|$; $\vec{a}$ va $\vec{b}$ bir xil yo'nalishga ega. Masalan, ABCD parallelogrammda $\overrightarrow{AD}=\overrightarrow{BC}$, $\overrightarrow{AB}=\overrightarrow{DC}$ bo'ladi. Bu yerdan vektorlarni parallel ko'chirish mumkinligi kelib chiqadi.

Endi ikkita $\vec{a}$ va $\vec{b}$ vektorlarni qo'shish va ayirish amalini kiritamiz. Buning uchun parallel ko'chirish orqali ularning boshlarini birta A nuqtaga keltiramiz. Unda bu vektorlarni $\vec{a}=\overrightarrow{AD}$, $\vec{b}=\overrightarrow{AB}$ kabi belgilab, ABCD parallelogrammni hosil qilamiz. Bu holda $\vec{a}$ va $\vec{b}$ vektorlarning yig'indisi deb parallelogrammning A uchidan chiquvchi diagonalidan hosil qilingan $\overrightarrow{AC}$ vektorga aytiladi va $\vec{a}+\vec{b}$ kabi belgilanadi. Bu vektorlarning $\vec{a}-\vec{b}$ ayirmasi parallelogrammning B uchidan chiquvchi diagonalidan hosil qilingan $\overrightarrow{BD}$ vektorga aytiladi.



2.1-rasm. Vektorlarni qo'shish va ayirish qoidasi

Vektorlarni qo'shish amali quyidagi xossalarga ega:

$$1. \vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a} \quad 2. (\vec{a} + \vec{b}) + \vec{c} = \vec{a} + (\vec{b} + \vec{c}) \quad 3. \vec{a} + \vec{0} = \vec{a} \quad (2.1)$$

$\vec{a}$ vektorni λ songa (skalyarga) ko'paytmasi deb, $\lambda \vec{a}$ kabi belgilanadigan va quyidagi shartlar bilan aniqlanadigan vektorga aytiladi:

$$1. |\lambda \vec{a}| = |\lambda| \cdot |\vec{a}|, \text{ ya'ni vektorning uzunligi. } |\lambda| \text{ marta o'zgaradi;}$$

$$2. \lambda \vec{a} \text{ va } \vec{a} \text{ vektorlar kollinear;}$$

$$3. \lambda > 0 \text{ bo'lsa } \lambda \vec{a} \text{ va } \vec{a} \text{ bir xil yo'nalgan,}$$

$$\lambda < 0 \text{ bo'lsa } \lambda \vec{a} \text{ va } \vec{a} \text{ qarama-qarshi yo'nalgan.}$$

Masalan, ABCD trapetsiya bo'lib, uning asoslari $AD=8$ va $VS=4$ bo'lsa, unda $\overrightarrow{AD} = 2\overrightarrow{BC}$ va $\overrightarrow{AD} = -2\overrightarrow{CB}$ tengliklar o'rinli bo'ladi.

$\lambda=0$ bo'lsa, har qanday $\vec{a}$ vektor uchun $0 \cdot \vec{a} = \vec{0}$ bo'ladi.

Vektorning songa ko'paytirish amali quyidagi xossalarga ega:

$$1. \lambda(\beta \vec{a}) = \beta(\lambda \vec{a}) \quad 2. (\lambda \pm \beta) \vec{a} = \lambda \vec{a} \pm \beta \vec{a} \quad 3. \lambda(\vec{a} \pm \vec{b}) = \lambda \vec{a} \pm \lambda \vec{b} \quad (2.2)$$

Bu yerda α va β ixtiyoriy sonlar, $\vec{a}$ va $\vec{b}$ ixtiyoriy vektorlardir.

(-1) $\vec{a}$ vektor $\vec{a}$ vektorga qarama-qarshi vektor deyiladi va $-\vec{a}$ kabi belgilanadi. Bunda doimo $\vec{a} + (-\vec{a}) = \vec{0}$ bo'ladi.

Endi bir tekislikda joylashgan vektorlarning koordinatalari tushunchasini kiritamiz. Buning uchun bu tekislikda XOY koordinatalar tizimini olamiz. OX(OY) koordinata o'qida joylashgan, musbat yo'nalishda yo'nalgan va uzunligi birga teng bo'lgan $\vec{i}(\vec{j})$ vektorni kiritamiz. Kiritilgan $\vec{i}$ va $\vec{j}$ vektorlar ort vektorlar yoki qisqacha ortlar deb ataladi. Endi berilgan $\vec{a}$

vektorni yo'naltirilgan kesma sifatida qarab, uning OX va OY o'qdagi proektsiyalarini qaraymiz. Bu proektsiyalar ham yo'naltirilgan kesma bo'lib, ular $\vec{a}$ vektorning OX va OY o'qdagi proektsiyalari deb ataladi va $\vec{a}_x$, $\vec{a}_y$ kabi belgilanadi. Unda, vektorlarni qo'shish ta'rifidan foydalanib, $\vec{a} = \vec{a}_x + \vec{a}_y$ tenglikni yozish mumkin.

Endi $\vec{a}$ vektor proektsiyalarining uzunligini $|\vec{a}_x| = |x|$, $|\vec{a}_y| = |y|$ kabi belgilaymiz. $\vec{a}_x$ va $\vec{i}$ ort ($\vec{a}_y$ va $\vec{j}$ ort) kollinear vektorlar bo'ladi, chunki ular OX(OY) koordinata o'qida joylashgan. Unda $|\vec{i}| = |\vec{j}| = 1$ bo'lgani uchun, vektorlarni songa ko'paytmasi ta'rifiga asosan, $\vec{a}_x = x\vec{i}$ va $\vec{a}_y = u\vec{j}$ deb yozish mumkin. Bu yerda $\vec{a}_x$ va $\vec{i}$ ort bir xil yo'nalgan bo'lsa, $x = |\vec{a}_x|$ deb, qarama-qarshi yo'nalgan bo'lsa, $x = -|\vec{a}_x|$ deb olinadi. Xuddi shunday tarzda u qiymati $\pm |\vec{a}_y|$ kabi olinadi. Bu holda tekislikdagi ixtiyoriy $\vec{a}$ vektorini $\vec{i}$ va $\vec{j}$ ortlar orqali

$$\vec{a} = x\vec{i} + u\vec{j} \quad (2.3)$$

ko'rinishda yozish mumkin. (2.3) tenglik $\vec{a}$ vektorning ortlar bo'yicha yoyilmasi, x va y sonlari esa, uning koordinatalari deb ataladi va $\vec{a}(x, u)$ kabi ifodalanadi. Masalan, $\vec{a} = 2\vec{i} - 3\vec{j}$ vektorning koordinatalari $x=2$, $u = -3$ bo'ladi. Nol vektor uchun $\vec{0} = 0\cdot\vec{i} + 0\cdot\vec{j}$ bo'lgani uchun uning koordinatalari $x=0$, $u=0$ bo'ladi.

Har qanday $\vec{a}$ vektor uzining x va u koordinatalari bilan (1) tenglik orqali to'liq aniqlanadi. Koordinatalari bilan berilgan vektorlarning tengligi, kollinearligi va ular ustidagi qo'shish, ayirish, songa ko'paytirish amallarining natijalari oson aniqlanadi.

Vektorli tahlil tushunchalari va metodlari ko'pchilik fanlarda: "Elektrotexnikaning nazariy asoslari" (masalan, elektromagnit maydon nazariyasini o'rganishda), "Elektromexikaning asoslari", "Gidromexanika", "Issiqlik texnikasi nazariy asoslari" va boshqa fanlarda keng qo'llaniladi.

Vektor ko'paytirish deb, moduli son jihatdan $\bar{A}$ va $\bar{B}$ vektorlarda qurilgan parallelogramm maydoniga teng, yo'nalishi esa, shu vektorlar ($\bar{A}$ dan $\bar{B}$ ga burilgandagi parma harakati yo'nalishiga mos) yotgan tekislikka perpendikulyar bo'lgan vektorga aytiladi.

Agar vektorning uchta tashkil etuvchilari noldan farqli bo'lsa vektor ko'paytmaning natijasi quyidagicha yoziladi: $[\bar{A} \bar{B}] = (A_y B_z - A_z B_y)\bar{i} + (A_z B_x - A_x B_z)\bar{j} + (A_x B_y - A_y B_x)\bar{k}$.

Vektor oqimi tushunchasi vektorli tahlilning muhim tushunchalaridan biridir.

Vektorni songa ko'paytirish uchun uning koordinatalari shu songa ko'paytiriladi, ya'ni

$$\lambda \cdot (x_1, x_2, x_3) = (\lambda x_1, \lambda x_2, \lambda x_3) \quad (2.4)$$

Shunga o'xshash

$$(x_1, x_2, x_3) \pm (y_1, y_2, y_3) = (x_1 \pm y_1, x_2 \pm y_2, x_3 \pm y_3) \quad (2.5)$$

Vektorning moduli (uzunligi) quyidagicha aniqlanadi:

$$|x| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \quad (2.6)$$

x va u vektorlarning skalyar ko'paytmasi deb ularning modullarining hamda oralaridagi burchak kosinusining ko'paytmasi aytiladi:

$$x \cdot y = |x| \cdot |y| \cos(x, \wedge y) \quad (2.7)$$

Agarda x va u vektorlar moc ravishda (x_1, x_2, x_3) va (y_1, y_2, y_3) koordinatalarga ega bo'lsalar, ularning skalyar ko'paytmasi quyidagicha aniqlanadi:

$$x \cdot y = x_1 y_1 + x_2 y_2 + x_3 y_3 \quad (2.8)$$

Ba'zi hollarda birta vektor o'niga vektorlar tizimi bilan ishlashga to'g'ri keladi. Bunday vektorlar tizimining koordinatalari to'g'ri burchakli jadval ko'rinishiga ega bo'ladi va matritsa deb ataladi. Matritsa

elementlari ikkita raqamli (indeksli) birta harf orqali ifodalanadi (masalan a_{ij}). Bu'larning birinchisi satr raqamini, ikkinchisi esa ustun raqamini bildiradi.

Energiyani elektromexanik o'zgartgich (EEMo') larni tahlil qilishda vektorlarni qo'llashda ma'lum qulayliklar yaratadi. Bir vaqtning o'zida fazoda va vaqt bo'yicha bo'layotgan elektromagnit jarayonlarning matematik tavsiflashda vaqt bo'yicha skalyar funksiyaga ega bo'lgan *fazoviy vektorlar* yordamida o'tkazish maqsadga muvofiq va qulaydir.

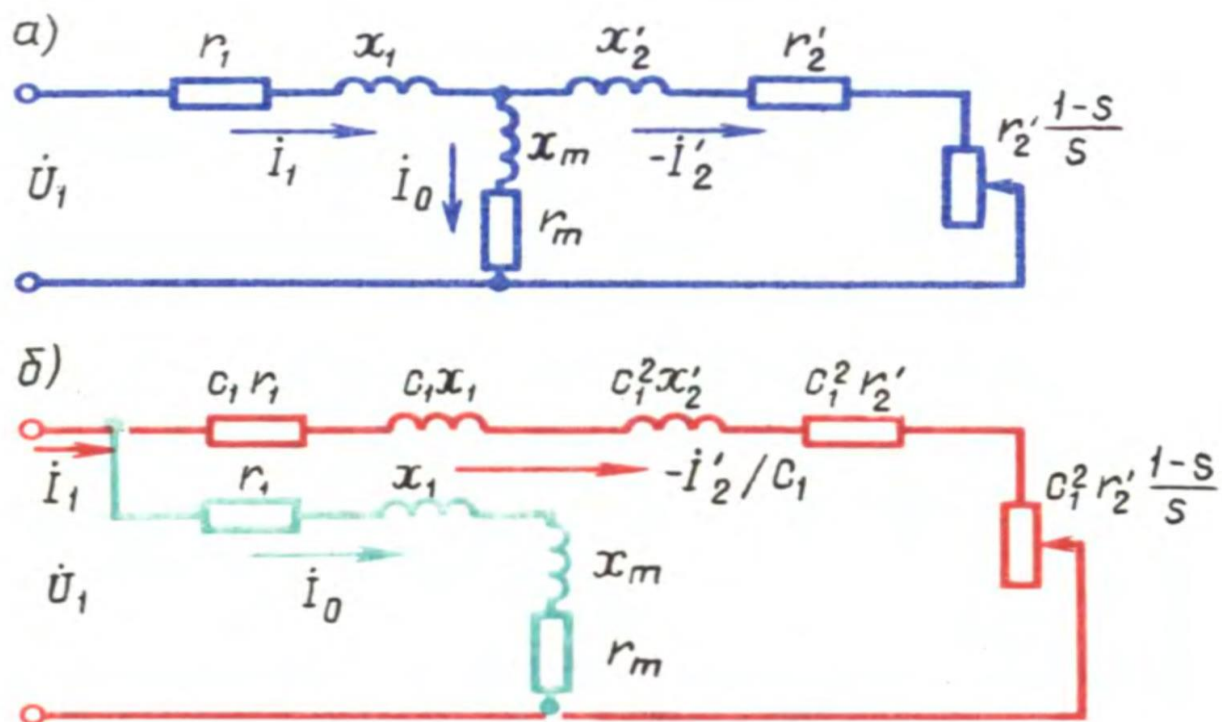
Elektr mashinalardagi elektromagnit jarayonlarni shunday yo'l bilan matema-tik izoqlash fazoviy hodisalarni (chulg'am va maydonlarning fazoda joyini o'zgartirishi, fazoda harakatdagi maydonlarni qo'shishni amalga oshirish, zarurat bo'lganda magnit o'tkazgichning ayon qutbliligini hisobga olish va shunga o'xshashlar) juda ham oddiy va yaqqol hisoblashga imkon beradi. Fazoviy vektorlar apparatidan foydalanishda vektorlar algebrasini, vektorli tahlilni, matrisali algebrani, operasion hisobni va zamonaviy matematikaning boshqa bo'limlarini qo'llash mumkin.

Asinxron motorda kechayotgan jarayonlarni tahlil qilishda ma'lum bir barqaror rejimda alohida o'zgaruvchilari orasidagi bog'lanishlarni ko'rsatmali tasavvo'rni hosil qilish imkonini beruvchi uning vektor diagrammasidan foydalanish maqsadga muvoffiqdir.

Transformatoridagi kabi asinxron motorning ham ish rejimini taxlil qilishda uning almashtirish sxemasidan foydalanish qulaydir. Umuman, asinxron motorning ham transformatoridagi kabi stator va rotor chulgamlarini tegishlicha birlamchi va ikkilamchi chulg'am deb qarash mumkin. Bu chulgamlar orasidagi bog'lanish transformatoridagidek magnit xodisasiga asoslangandir. YUklangan asinxron motorning almashgirish sxemasini kurish uchun aylanayotgan rotor elektr zanjirini unga ekvivalent bo'lgan so'zgalmas rotor zanjiri bilan almashtirish kerak.

Ekvivalent rotor zanjirining parametrlari shunday tanlanishi kerakki, motorning manbadan olayotgan quvvati, rotorga uzatilayotgan elektromagnit quvvat o'zgarmas bo'lishi kerak. Buning uchun rotorning ekvivalent va haqiqiy zanjiri-

ridagi tok I_2 va EYUK E_2 orasidagi faza siljish burchagi bir xil bo'lishi kerak, SHunday sharoitdagina ekvivalent va haqiqiy mashinalar rotor va stator chulgamlarining umumiy magnitlovchi kuchi bir xil bo'ladi.



2.2-rasm. Asinxron mashinalarning a) T-simon, b) G-simon keltirilgan sxemalari.

2.2-rasmda ekvivalent qo'zg'olmas rotorning almashtirish sxemasi ko'rsatilgan. Bu yerda rotorning aktiv qarshiligi ikkita tashkil etuvchi sifatida berilgan. Bular asinxron motorning to'la almashtirish sxemasini tuzishga imkon beradi. Asinxron mashinalarning barqaror rejimdagi vektor diagrammasi asinxron mashinalarning keltirilgan sxemasiga Kirxgofning 2-qonuni bo'yicha yozilgan kuchlanishlar tenglamasi orqali aniqlanadi. Buning uchun rotor zanjiridagi parametrlar quyidagi ifodalar orqali stator zanjiriga keltiriladi.

Rotor chulg'amidagi keltirilgan EYUK:

$$E'_2 = E_2 k_e, \text{ где } k_e = \frac{k_{o61} w_1}{k_{o62} w_2} \quad (2.9)$$

Toklarni transformatsiyalash koeffitsienti:

$$k_i = \frac{I_2}{I'_2} = \frac{m_1 w_1 k_{o\delta 1}}{m_2 w_2 k_{o\delta 2}} \quad (2.10)$$

Bu yerdan rotor chulgʻamining keltirilgan toki:

$$I'_2 = \frac{I_2}{k_i} \quad (2.11)$$

Ikkilamchi (rotor) chulgʻamning aktiv va induktiv qarshiliklari:

$$\begin{aligned} r'_2 &= r_2 k_\epsilon k_i \\ x'_2 &= x_2 k_\epsilon k_i \end{aligned} \quad (2.12)$$

Rotor toki va EYUK si orsidagi siljish burchagi:

$$\psi_2 = \arctg\left(\frac{x'_2 s}{r'_2}\right) \quad (2.13)$$

Stator va rotor kuchlanishlari, toklari tenglamalari:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1 \\ \dot{E}_2' - j\dot{I}_2' x_2 - \dot{I}_2' r_2' - \dot{I}_2' r_2' \frac{(1-s)}{s} &= 0 \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2' \end{aligned} \quad (2.14)$$

Olingan tenglamalar asosida asinxron motorning vektor diagrammasini quramiz. Almashtirish sxemasidan qarshiliklardagi quvvat isrofi stator va rotor chulgʻamlaridagi elektrik quvvat isrofiga teng ekanligi kelib chiqadi:

- qarshilikdagi quvvat isrofi statorning poʻlat oʻzagidagi magnit quvvat isrofiga teng, yaʼni asinxron motorning shaklidagi almashtirish sxemasi koʻrsatilgan.

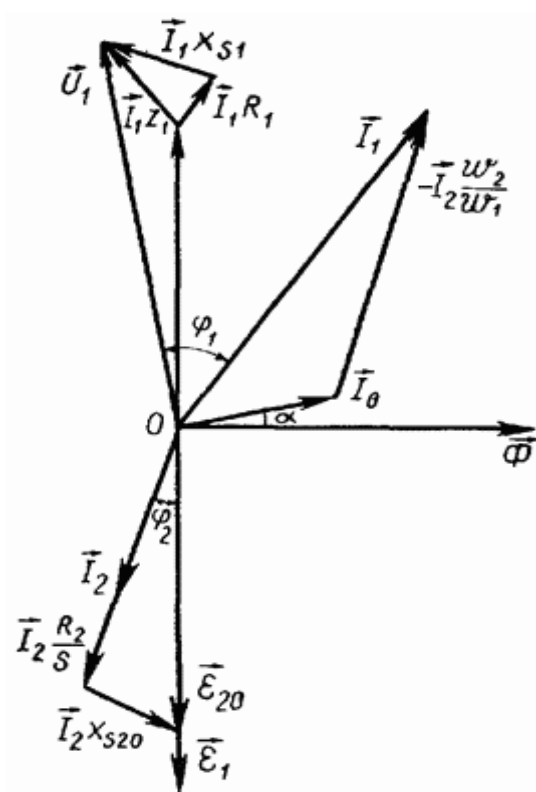
Asinxron motorning vektor diagrammasi magnit oqim F vektorini koʻrishdan boshlanadi chunki magnit oqimi stator va rotor uchun umumiydir.

Stator va rotor chulgamlarida induksiyalangan E va E'_2 EYUK lar magnit oqimidan $/2$ burchakka orqada koladi. Umumiy vektor diagrammasini qurishda qoʻzgʻalmas ekvivalent rotorning EYUK asos qilib olinadi, chunki uning chastotasi

manba chastotasiga tengdir. Ma'lumki, asinxron motorlarda salt ishlashdagi tok stator chulgamidagi nominal tokning 40—60% ini tashkil etadi. Salt ishlash tokining vektori magnit oqimi vektoridan δ_p burchakka, po'lat o'zakdagi isroflar tufayli, siljigan bo'ladi. Odatda, $\delta_p = 3^\circ \text{ t } 5^\circ$ bo'ladi.

Asinxron motorni tormozlovchi momentning rotordagi tok qiymatiga va fazasiga ta'siri, rotor chulgami aktiv qarshiligining o'zgarishi bilan aniqlanadi. SHuning uchun ko'zgalmas rotorning chulgamidagi tok EYUK E'_2 dan burchakka kechikadi. Bu burchak asinxron motorning yuklanganligini ko'rsatadi va sirpanishning kamayishi bilan kamayib boradi.

Asinxron motorlarda salt ishlash tokining qiymati nisbatan katta bo'lgani uchun faza siljish burchagining qiymati ham katta bo'ladi. Bunda motorning nominal quvvat koeffitsienti 0,7 - 0,8 ga teng bo'ladi.



2.3-rasm. Asinxron motorning vector diagrammasi

SHu tartibda noayon qutbli sinxron mashinalar uchun ham vektor diagrammalarni quramiz. Buning uchun sinxron mashinalarning yakor zanjiri uchun quyidagi tenglamalarni yozamiz:

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{sa} - I_a r_a \text{ yoki}$$

$$\dot{U} = \dot{E} - jI_a x_{sa} - I_a r_a = \dot{E}_0 + \dot{E}_a - jI_a x_{sa} - I_a r_a, \quad (2.15)$$

Bu yerda esa – yakorning sochiluvchi oqimi tufayli hosil bo‘lgan EYUK; x_{sa} – ushbu oqim tufayli hosil bo‘lgan induktiv qarshilik.

Dastlab EYUK vektorini kuchlanishlar tushuvlaridan kelib chiqib quyidagi ifodadan ko‘ramiz:

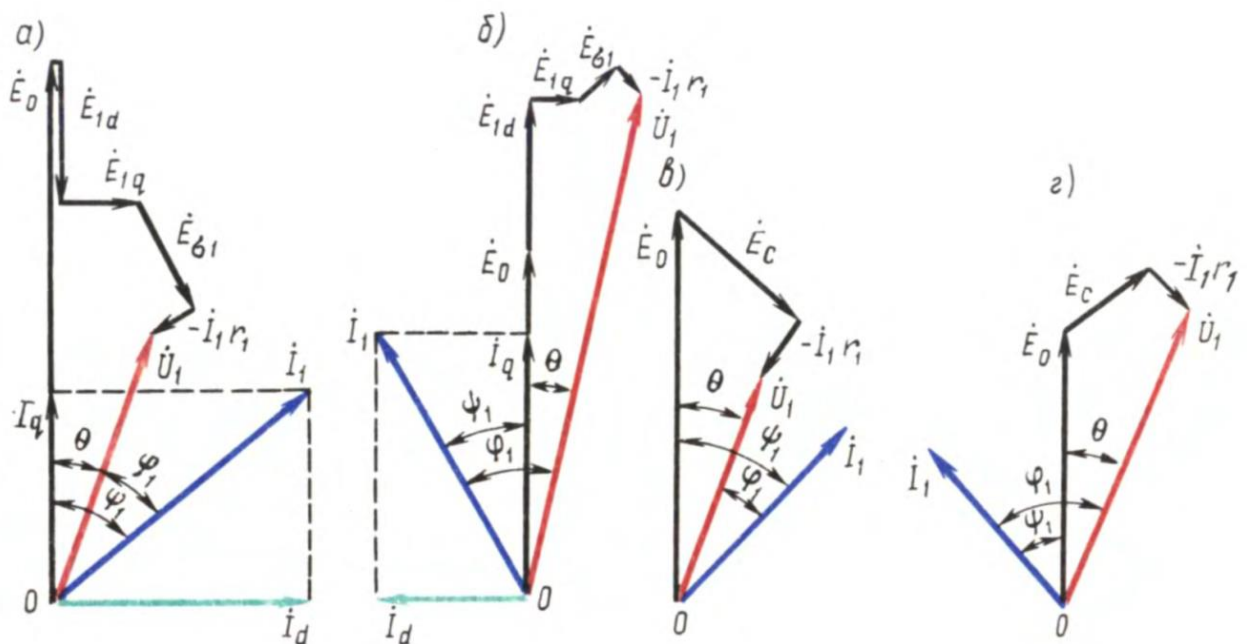
$$\dot{E} = \dot{U} + I_a r_a + jI_a x_{sa} \quad (2.16)$$

Agar sinxron mashinalarning magshnit zanjiri to‘yinmagan bo‘lsa vektoro diagrammani quyidagi soddalashtirilgan tenglamadan qurish mumkin.

$$\dot{U} = \dot{E} - jI_a x_{sa} - I_a r_a = \dot{E}_0 + \dot{E}_a - jI_a x_{sa} - I_a r_a \quad (2.17)$$

Nofyon qutbli mashinalarda stator chulg‘amidagi kuchlanish tushuvi nisbatan kichik bo‘lgani uchun vektor diagrammani qurishda hisobga olmasa ham bo‘ladi.

Quyida ayon qutbli (a) va noayon qutbli-(b) sinxron mashinalarning vektor diagrammalari keltirilgan:



2.4-rasm. Ayon qutbli (a va b), noayon qutbli (v va g) sinxron generatorlarning vektor diagrammalari: a va v –aktiv-induktiv yuklamada; b va g – aktiv - sig‘im yuklamada.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. vektor va skalyar kattaliklarni tushuntiring?
2. kollinear vektorlar nima?
3. Vektorlarni qo‘shish va ayirish amallari.
4. Asinxron mashinani vektor diagrammasini nima?

2.2. Elektromagnit maydonning vektor tahlil elementlari. Maksvell tenglamalari

Kalit so‘zlar: *skalyar miqdor, sath sirti, skalyar maydonning gradient, Ostrogradskiy formulasi, vektor maydonining divergensiyasi, vektor maydon uyurmasi, Maksvell tenglamalari, elektromagnit maydon nazariyasi.*

Elektr mexanikasidagi ko‘pgina masalalarni yechishda skalyar va vektor kattaliklar bilan ish ko‘rishga to‘g‘ri keladi. Fazoning biror qismi (yoki butun fazoning) har bir M nuqtasida biror $\{u\}$ skalyar miqdorning son qiymati aniqlangan bo‘lsa, bu miqdorning skalyar maydoni berilgan deyiladi. Masalan, harorat maydoni, bir jinslimas muxitda zichlik maydoni, kuch maydon potentsiali. Skalyar maydonning sath sirti deb, fazoning shunday nuqtalari to‘plamiga aytiladiki, unda maydon funksiyasi $u=u(x,u,z)$ o‘zgarmas qiymatga ega bo‘ladi.

Agar, maydon

$$u=x^2+u^2+z^2=S, \quad (S>0) \text{ bo'lsa,}$$

sfera sath sirti vazifasini bajaradi.

Skalyar maydonning muhim tushunchasi berilgan yo‘nalish bo‘yicha hosiladir. Faraz qilaylik, skalyar maydonning differensiallanuvchi funksiyasi $u=u(x,u,z)$ berilgan bo‘lsin.

$u=u(x,u,z)$ funksiyalarning $\vec{l}$ yoʻnalish boʻyicha $M(x,u,z)$ nuqtadagi hosilasi deb,

$$\lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta_l u}{\Delta l}$$

limitga aytiladi, bu limit $\frac{\partial u}{\partial l}$ tarzida belgilanadi. Shunday qilib,

$$\frac{\partial u}{\partial l} = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta_l u}{\Delta l}$$

Agar M nuqta tayinlangan boʻlsa, u holda hosilaning kattaligi faqat $\vec{l}$ noʻrning yoʻnalishigagina bogʻliq boʻladi.

$\vec{l}$ yoʻnalish boʻyicha hosila xususiy hosilalarga oʻxshash $\{u\}$ funksiyaning mazkur yoʻnalishdagi oʻzgarish tezligini harakterlaydi. Hosilaning $\vec{l}$ yoʻnalish boʻyicha absolyut miqdori $\left| \frac{\partial u}{\partial l} \right|$ tezlikning kattaligini aniqlaydi, hosilaning ishorasi

esa $\{u\}$ funksiya oʻzgarishining harakterini aniqlaydi: agar $\frac{\partial u}{\partial l} > 0$ boʻlsa, u holda

funksiya bu yoʻnalishda oʻsadi, agar $\frac{\partial u}{\partial l} < 0$ boʻlsa, kamayadi.

$u=u(x,u,z)$ differensiallanuvchi funksiya bilan berilgan skalyar maydonning $M(x,u,z)$ nuqtadagi gradienti deb, $grad u$ bilan belgilanuvchi vektorga aytilib, uning proeksiyalari vazifasini shu funksiya xususiy xosilalarining qiymatlarini bajaradi, yaʼni:

$$gradu = \frac{\partial u}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial u}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial u}{\partial z} \vec{k} \quad (2.18)$$

Gradientning proeksiyalari $M(x,u,z)$ nuqtani tanlashga bogʻliq boʻladi va shu nuqtaning koordinatalari oʻzgarishi bilan oʻzgaradi.

$u(x,u,z)$ skalyar maydonning gradienti deb, bu maydon oʻzgarishining eng katta tezligini ifodalovchi vektorga aytiladi.

Geometrik nuqtai-nazardan skalyar maydonning har bir nuqtasidagi gradienti berilgan nuqtadan o'tuvchi sath sirtiga o'tkazilgan urinma tekislikka perpendikulyar bo'ladi.

Ko'pgina masalalarni yechishda skalyar kattaliklardan tashqari vektor kattaliklarga ham murojaat qilishga to'g'ri keladi. Har bir M nuqtasiga $\vec{a}$ vektor mos qo'yilgan fazoning biror qismi (yoki butun fazo) vektor maydon deyiladi. Kuch maydoni (og'irlik kuch maydoni), elektr maydoni, elektromagnit maydon, oqayotgan suyuqlikning tezliklari maydoni vektor maydonga misol bo'la oladi.

Agar Oxuz koordinatalar tizimi kiritilsa va $\vec{a}$ vektorning koordinatalar o'qidagi proeksiyalarini P, Q, R bilan belgilasak

$$P=P(x,y,z), \quad Q=Q(x,y,z), \quad R=R(x,y,z)$$

u holda $\vec{a}$ vektorni quyidagicha ifodalash mumkin :

$$\vec{a} = \vec{a}(M) = \vec{a}(x,y,z) = P\vec{i} + Q\vec{j} + R\vec{k} \quad (2.19)$$

Agar P, Q, R - o'zgarmas kattaliklar bo'lsa, u holda $\vec{a}$ vektor o'zgarmas bo'ladi, bunday vektor maydon bir jinsli deyiladi, masalan, ogirlik kuchi maydoni bir jinslidir.

$\vec{a}(M)$ vektorning σ sirt orqali o'tuvchi P oqimi deb quyidagi ikkinchi tur sirt integraliga aytiladi :

$$P = \iint_{\sigma} [P(x,y,z)dydz + Q(x,y,z)dzdx + R(x,y,z)dxdy] \quad (2.20)$$

yoki sirt integrallari yordamida

$$P = \iint_{\sigma} [P(x,y,z)\cos\alpha + Q(x,y,z)\cos\beta + R(x,y,z)\cos\gamma] d\sigma \quad (2.21)$$

yoki yanada soddaroq

$$P = \iint_{\sigma} \vec{a} \cdot \vec{n}_0 d\sigma \quad (2.22)$$

ko'rinishda yozish mumkin. Bu yerda $d\sigma$ - sirt yuzining elementi.

Vektor maydon oqimining fizik ma'nosi σ sirt orqali utayotgan $\vec{a}$ tezlik vektori $\{P\}$ oqimi, shu sirt orqali vaqt birligi ichida sirt orientatsiyalangan yo'nalishda oqib o'tgan suyuqlik miqdoridir. Agar

$$\vec{a}(M) = P(x, y, z)\vec{i} + Q(x, y, z)\vec{j} + R(x, y, z)\vec{k} \quad (2.23)$$

vektor maydon proeksiyalari ω sohada o'zining birinchi tartibli xususiy hosilasi bilan birga uzluksiz bo'lsa, u holda σ yopiq sirt orqali $\vec{a}$ vektor oqimini shu sirt bilan chegaralangan ω xajm bo'yicha uch karrali integralga quyidagi formula bo'yicha almashtirish mumkin:

$$\iint_{\sigma} P(x, y, z)dydz + Q(x, y, z)dzdx + R(x, y, z)dxdy = \iiint_{\omega} \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} \right) dxdydz \quad (2.24)$$

bu yerda integrallash σ sirtning tashqi tomoni bo'yicha amalga oshiriladi (sirtga o'tkazilgan normal fazoning tashqi tomoniga yo'nalgan). (6.1) formula Ostrogradskiy formulasi deyiladi.

Oxuz fazoning ω sohasida

$$\vec{a}(M) = P(x, y, z)\vec{i} + Q(x, y, z)\vec{j} + R(x, y, z)\vec{k} \quad (2.25)$$

vektor maydon berilgan bo'lsin va unda $P=P(x, y, z)$, $Q=Q(x, y, z)$, $R=R(x, y, z)$ – differensiallanuvchi funksiyalar bo'lsin. $\vec{a}(M)$ vektor maydonining divergensiya deb M nuqtaning skalyar maydoniga aytiladi. U $\text{div } \vec{a}(M)$ ko'rinishida yoziladi va

$$\text{div } \vec{a}(M) = \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} \quad (2.26)$$

formula bilan aniqlanadi. Bunda xususiy xosilalar M nuqtada xisoblanadi.

Divergensiyaning (6.2) ifodasidan foydalanib, (6.1) formulani vektor shaklida quyidagicha ko'rinishda yozish mumkin :

$$\iint_{\sigma} \vec{a} \cdot \vec{n}_0 d\sigma = \iiint_{\omega} \text{div } \vec{a}(M) d\omega \quad (2.27)$$

formulani quyidagicha ifodalash mumkin: yopiq sirt orqali o'tuvchi $\vec{a}$ vektor maydon oqimi shu sirt bilan chegaralangan hajm bo'yicha maydon divergensiya bilan olingan uch karrali integralga teng.

Divergensiyaning hisoblashda quyidagi xossalardan foydalaniladi :

$$\operatorname{div}(\vec{a}(M) + \vec{b}(M)) = \operatorname{div} \vec{a}(M) + \operatorname{div} \vec{b}(M); \quad (2.28)$$

$\operatorname{div} C \cdot \vec{a}(M) = C \cdot \operatorname{div} \vec{a}(M)$, bunda S - o'zgarmas son;

$$\operatorname{div} \vec{u}(M) \cdot \vec{a}(M) = u(M) \operatorname{div} \vec{a}(M) + \operatorname{div} \vec{a}(M) \cdot \operatorname{grad} u(M); \quad (2.29)$$

bunda $u(M)$ - skalyar maydonni aniqlovchi funksiya.

Divergensiyaning (2.28) formula yordamida aniqlash koordinata o'qlarini tanlash bilan bog'liq. Ostrogradskiy (2.29) formulasining o'ng qismida uch karrali integral turibdi. O'rta qiymat haqidagi ma'lum teorema ko'ra bu integral hajm bilan integral osti funksiyasining ω soxaning biror M_1 nuqtasidagi ko'paytmasiga teng. Shuning uchun (6.3) formulani quyidagicha yozish mumkin:

$$\iint_{\sigma} \vec{a} \cdot \vec{n}_0 d\sigma = V \cdot \operatorname{div} \vec{a}(M_1), \quad (2.30)$$

$$\text{yoki } \operatorname{div} \vec{a}(M_1) = \frac{1}{V} \iint_{\sigma} \vec{a} \cdot \vec{n}_0 d\sigma. \quad (2.31)$$

Agar ω soha M nuqtaga tortilsa yoki $V \rightarrow 0$ bo'lsa, u holda M_1 nuqta M ga intiladi. Natijada limitga o'tib, quyidagini hosil qilamiz:

$$\lim_{M_1 \rightarrow M} \operatorname{div} \vec{a}(M_1) = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \iint_{\sigma} \vec{a} \cdot \vec{n}_0 d\sigma, \quad (2.32)$$

yoki

$$\operatorname{div} \vec{a}(M) = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\iint_{\sigma} \vec{a} \cdot \vec{n}_0 d\sigma}{V} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\Pi}{V}. \quad (2.33)$$

Endi divergensiyaning koordinata o'qlarini tanlashga bog'liq bo'lmagan invariant ta'rifini berish mumkin:

M nuqtada vektor maydonning divergensiya deb, M nuqtani o'rab olgan yopiq sirt orqali o'tuvchi maydon oqimining shu sirt bilan chegaralangan qismning V hajmiga nisbatining bu hajm nuqtaga tortilgandagi, ya'ni $V \rightarrow 0$ dagi limitiga aytiladi.

Faraz qulaylik, Oxyz fazoning ω sohasida quyidagi vektor maydon berilgan bo'lsin:

$$\vec{a}(M) = P(x, y, z)\vec{i} + Q(x, y, z)\vec{j} + R(x, y, z)\vec{k} \quad (2.34)$$

$\vec{a}(M)$ vektor maydonning uyurmasi (yoki rotori) deb, M nuqtaning $\text{rot } \vec{a}(M)$ bilan belgilanadigan va

$$\text{rot } \vec{a}(M) = \left(\frac{\partial R}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial z} \right) \cdot \vec{i} + \left(\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial R}{\partial x} \right) \cdot \vec{j} + \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) \cdot \vec{k} \quad (2.35)$$

formula bilan aniqlanadigan vektor maydoniga aytiladi, bunda xususiy hosilalarni $M(x, y, z)$ nuqtada topamiz. Demak,

$$\text{rot } \vec{a} = 2y\vec{i} + 2z\vec{j} + 2x\vec{k} \quad (2.36)$$

Uyurma tushunchasidan foydalanib, (2.35) Stoks formulasini vektor shaklida quyidagicha yozish mumkin:

$$\oint_L \vec{a} \cdot d\vec{r} = \iint_{\sigma} n \cdot \text{rot } \vec{a} \cdot d\sigma, \quad (2.36)$$

va bunday ifodalash mumkin: $\vec{a}$ vektorining σ sirtini chegaralovchi L kontorni aylanib chiqishning musbat yo'nalishi bo'yicha sirkulyasiyasi $\text{rot } \vec{a}$ vektorining shu sirt orqali o'tadigan oqimiga teng.

Vektor maydon uyurmasi deb, shunday vektorga aytiladiki, uning biror yo'nalishga bo'lgan proeksiyasi shu yo'nalishga perpendikulyar bo'lgan D yassi yuzning L kontur bo'yicha vektor maydon sirkulyasiyasining S yuzning kattaligiga nisbatiga teng, bunda yuzning o'lchamlari nolga intiladi ($S \rightarrow 0$), yuzning o'zi esa nuqtaga tortiladi.

Vektor maydon uyurmasi tushunchasining fizik ma'nosini beramiz. Qattik jismning qo'zg'almas nuqta atrofidagi harakatini qarab chiqamiz. Kinematikada tezliklar maydoni $\vec{v}$ istalgan momentda

$$\vec{v} = \omega \times \vec{r} \quad (2.37)$$

formula bilan aniqlanadi, bunda ω - oniy burchak tezlik, $\vec{r}$ - jismning ixtiyoriy M nuqtasining radius vektori. Agar

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k} \quad (2.38)$$

$$\vec{\omega} = \omega_x \vec{i} + \omega_y \vec{j} + \omega_z \vec{k} \quad (2.39)$$

ekani ma'lum bo'lsa, u holda quyidagiga ega bo'lamiz.

$$\vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ x & y & z \end{vmatrix} = (\omega_y z - \omega_z y)\vec{i} + (\omega_z x - \omega_x z)\vec{j} + (\omega_x y - \omega_y x)\vec{k} \quad (2.40)$$

Endi $\text{rot} \vec{v}$ vektorning proeksiyalarini topamiz:

$$np_x(\text{rot} \vec{v}) = \frac{\partial}{\partial y}(\omega_x y - \omega_y x) - \frac{\partial}{\partial z}(\omega_x z - \omega_z x) = \omega_x + \omega_x = 2\omega_x; \quad (2.41)$$

$$np_y(\text{rot} \vec{v}) = \frac{\partial}{\partial z}(\omega_y z - \omega_x y) - \frac{\partial}{\partial x}(\omega_x y - \omega_y z) = \omega_y + \omega_y = 2\omega_y; \quad (2.42)$$

$$np_z(\text{rot} \vec{v}) = \frac{\partial}{\partial x}(\omega_z x - \omega_x z) - \frac{\partial}{\partial y}(\omega_y z - \omega_z y) = \omega_z + \omega_z = 2\omega_z; \quad (2.43)$$

SHunday qilib,

$$\text{rot} \vec{v} = 2\omega_x \cdot \vec{i} + 2\omega_y \cdot \vec{j} + 2\omega_z \cdot \vec{k} = 2\vec{\omega} \quad (2.44)$$

ekanini hosil qildik.

Demak, $\vec{v}$ tezlik maydoni uyurmasi qattik jism aylanishining oniy burchak tezligi vektoriga kollinear vektordir:

$$\text{rot} \vec{v} = \vec{\omega} \quad (2.45)$$

Faraz qilaylik, quyidagi vektor maydon berilgan bo'lsin:

$$\vec{a} = P(x, y, z)\vec{i} + Q(x, y, z)\vec{j} + R(x, y, z)\vec{k} \quad (2.46)$$

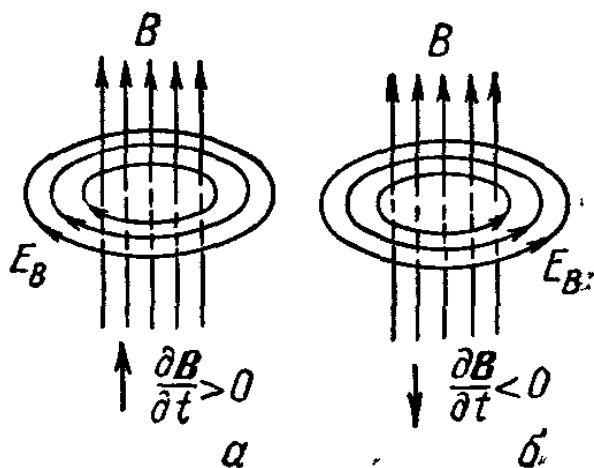
R, Q, R funksiyalar o'zlarining birinchi tartibli xususiy hosilalari bilan birga Oxuz fazoning hammasida, yoki fazoning biror ω sohasida uzluksiz bo'ladi deb faraz qilamiz.

Faraz qilaylik, A va V nuqtalar ω sohaning ikkita ixtiyoriy nuqtasi bo'lsin. ω sohada yotuvchi A hamda V nuqtalarni tutashtiruvchi turli egri chiziqlarni qarab chiqamiz. Agar

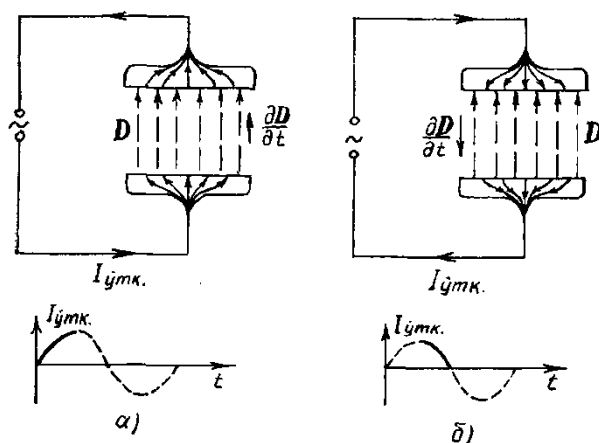
$$\int_L P(x, y, z)dx + Q(x, y, z)dy + R(x, y, z)dz \quad (2.47)$$

chiziqli integral bu yo'llarning ixtiyoriysi bo'yicha ayni bir xil qiymatlar qabul qilsa, u integralning yo'liga bog'lik bo'lmaydi deyiladi.

Olingan tenglamalar asosida elektromagnit maydon uchun Maksvell tenglamalarini yozamiz. Maksvellning yagona elektromagnit maydon nazariyasiga muvofiq, o'zgaruvchan elektr maydoni, o'zgaruvchan magnit maydonini, o'zgaruvchan magnit maydoni esa, o'zgaruvchan elektr maydonini vujudga keltiradi. Bu ikkala o'zgaruvchan maydonlar uyurmali harakterga ega, ya'ni vujudga keltirayotgan maydonning kuch chiziqlari, vujudga kelayotgan maydonning kuch chiziqlari bilan konsentrik o'rab olingan. Natijada o'zaro o'ralgan elektr va magnit maydonlar tizimi hosil bo'ladi.



2.5-rasm. Magnit maydon induksiyasi



2.6-rasm. Kondensator zaryadlanishi

Magnit maydon induksiyasi chiziqlarining yo'nalishi shu maydonning vujudga kelishiga sababchi bo'layotgan elektr maydon induksiya vektorining vaqt davomida o'zgarishini harakterlovchi dD/dt vektorning yo'nalishi bilan o'ng parma qoidasi asosida bog'langan (2.5-rasm).

Elektr maydon kuchayib borayotgan bo'lsa, D vektorining vaqt o'tishi bilan o'zgarishini harakterlovchi dD/dt vektorining yo'nalishi V vektorning yo'nalishi bilan mos keladi. Aksincha, elektr maydon susayayotgan bo'lsa, dD/dt vektorning yo'nalishi D vektorning yo'nalishiga qarama-qarshi bo'ladi. Elektr maydonning o'zgarishi va bu o'zgarish tufayli vujudga kelayotgan magnit maydon orasidagi

miqdoriy bog‘lanishni topish uchun Maksvell *siljish toki* deb ataladigan tushunchani kiritadi. Siljish toki bilan yaqinroq tanishish maqsadida yassi kondensatorli zanjirdan o‘zgaruvchan tok oqqandagi jarayonlarni tekshiraylik. U holda kondensator plastinkalarini birlashtiruvchi o‘tkazgichlar orqali *o‘tkazuvchanlik* toki o‘tadi, lekin plastinkalar oralig‘idagi dielektrikdan o‘tmaydi. U holda o‘zgaruvchan tokning zanjir bo‘ylab oqishi kondensatorning zaryadlanishlari (2.6, a-rasm) va razryadlanishlaridan (2.6, b-rasm) iborat bo‘ladi.

Maksvell tashqi zanjirda oquvchi o‘tkazuvchanlik toki kondensator ichida alohida tok - *siljish toki bilan tutashadigan* o‘z g‘oyasini ilgari surdi, siljish toki elektr maydon induksiya vektorining o‘zgarish tezligi $\left(\frac{\partial D}{\partial t}\right)$ proporsional va tashqi zanjirdagi o‘tkazuvchanlik tokiga teng bo‘ladi.

Zanjirdan o‘tayotgan tokning oniy qiymati I bo‘lsin, kondensator qoplamalaridagi zaryadning sirt zichligini $\sigma = \frac{q}{S}$ deb olaylik. U holda kondensator plastinkasi ichidagi o‘tkazuvchanlik toki zichligining qiymati

$$j_{utk} = \frac{I}{S} = \frac{dq}{S} \frac{1}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{q}{S} \right) = \frac{d\sigma}{dt} \quad (2.48)$$

yoki

$$j_{utk} = \frac{d\sigma}{dt} \quad (2.49)$$

bo‘ladi.

Ikkinchi tomonidan shu momentdagi plastinkalar oralig‘idagi elektr maydon kuchlanganligining qiymati

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} \quad (2.50)$$

teng edi.

Maydonning elektr induksiyasi esa,

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon E = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} = \sigma \quad (2.51)$$

ga teng. Vaqt o'tishi bilan plastinkalardagi zaryadning sirt zichligi o'zgaradi. Bu esa plastinkalar oralig'idagi elektr maydon induksiyasi qiymatining o'zgarishiga sababchi bo'ladi, ya'ni:

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{d\sigma}{dt} \quad (2.52)$$

Hamma vaqt $\frac{\partial D}{\partial t}$ ning yo'nalishi o'tkazuvchanlik tokining yo'nalishi bilan bir xil

bo'ladi. $\frac{\partial D}{\partial t}$ ning birligi

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{K_{\epsilon}}{m^2} \cdot \frac{1}{c} = \frac{A}{m^2} \quad (2.53)$$

bo'ladi.

$\frac{\partial D}{\partial t}$ kattalik Maksvell gipotezasiga asosan, siljish tokining zichligidir, ya'ni:

$$j_{silj} = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.54)$$

Shunday qilib, o'zgaruvchan tok zanjirida o'tkazgichlardagi o'tkazuvchanlik tokining chiziqlari kondensator plastinkalari oralig'idagi siljish tokining chiziqlariga ulanib ketadi.

Maksvell nazariyasining asosini uning nomi bilan ataladigan to'rtta tenglama tashkil etadi.

1. Qo'zg'almas zaryad q atrofida fazoda elektr maydon hosil qiladi. Bu maydon potensial maydondir. Bu maydon kuchlanganlik vektori E_q ning ixtiyoriy berk kontur bo'yicha sirkulyatsiyasi nolga teng:

$$\oint_l E_q dl = 0 \quad (2.55)$$

Ungarmaviy elektr maydon kuchlanganligi E_v ning chiziqlari doimo berk. Shuning uchun, E_v - vektorining ixtiyoriy berk kontur bo'yicha sirkulyatsiyasi noldan farqli

$$\oint_l E_{Bl} dl = - \int_s \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right)_n dS \quad (2.56)$$

Natijaviy maydon kuchlanganligi E_q va E_v maydon kuchlanganliklarning yig'indisidan iborat bo'lishi kerak, ya'ni

$$E = E_q + E_v$$

(2.55) va (2.56) tenglamalarni qo'shsak

$$\oint_l E_l dl = - \int_s \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right)_n dS \quad (2.57)$$

Bu ifodaning chap tomonidagi integral ixtiyoriy berk kontur bo'yicha, o'ng tomonidagi integral esa, shu konturga tiralgan ixtiyoriy sirt bo'yicha olinadi. Bu *Maksvellning birinchi tenglamasidir*.

2. Magnit maydon harakatdagi zaryadlar atrofida emas, balki fazoning vaqt davomida o'zgarib turuvchi elektr maydon mavjud bo'lgan barcha sohalarida ham vujudga keladi. O'zgaruvchan elektr maydon induksiyasi vektorining o'zgarish tezligini harakterlovchi $\frac{\partial D}{\partial t}$ kattalikni siljish tokining zichligi j_{silj} deb yuritilishi bilan yuqorida tanishdik ((13.44) qarang). Agar zanjirdagi to'liq tok zichligini j_T deb belgilasak

$$j_T = j_{utk} + j_{silj} = j_{utk} + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.58)$$

hosil bo'ladi. (13.48) dan foydalansak, magnit maydon kuchlanganlik vektorining ixtiyoriy berk kontur bo'yicha sirkulyatsiyasi uchun quyidagini yozamiz:

$$\oint_l H_l dl = - \int_s \left(j_{utk} + \frac{\partial D}{\partial t} \right)_n dS \quad (2.59)$$

Bu ifoda *Maksvellning ikkinchi tenglamasi* deb ataladi. U magnit maydon kuchlanganlik vektori H ning ixtiyoriy berk kontur bo'yicha sirkulyatsiyasi, shu konturga tiralgan ixtiyoriy S - sirtni teshib o'tuvchi makroskopik va siljish toklarining algebraik yig'indisiga tengligini ko'rsatadi.

3. Elektr induksiya vektori D ning ixtiyoriy berk sirt orqali oqimi shu sirt ichidagi barcha erkin zaryadlarning algebraik yig'indisiga teng:

$$\oint D_n dS = \int_V q dV \quad (2.60)$$

bundagi ρ - berk sirt ichida joylashgan zaryadlarning hajmiy zichligi. *Bu Maksvellning uchinchi tenglamasidir.*

4. Magnit maydon qanday usul bilan hosil qilinmasin magnit induksiya chiziqlari doimo berk bo‘ladi. Shuning uchun umumiy holda:

$$\oint B_n dS = 0 \quad (2.61)$$

Bu Maksvellning to‘rtinchi tenglamasidir. Yuqoridagi to‘rtta tenglama integral ko‘rinishdagi Maksvell tenglamalaridir.

Endi Maksvell tenglamalarining differensial ko‘rinishini yozaylik:

$$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.62)$$

$$\text{rot}H = j_{\text{utk}} + \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.63)$$

$$\text{div}D = \rho \quad (2.64)$$

$$\text{div}B = 0 \quad (2.65)$$

Maksvellning bu tenglamalari tabiat qonunlarining ifodasidir.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Skalyar maydonning gradient nima?
2. Ostrogradskiy formulasini nimani tavsiflaydi?
3. Vektor maydonining divergensiya nima?
4. Vektor maydon uyurmasi nima?
5. Maksvell tenglamalarini yozing.

2.3. Energiyaning elektromexanik o‘zgarishlarini tahlil qilishda matritsali metodlarni qo‘llash.

Kalit so‘zlar: *matritsa, matrisali metod, kvadrat matritsa, matrisaning tartibi, matritsalarini qo‘shish, matritsalarini ko‘paytirish, kvadrat matritsa,*

matritsaning vektorga ko'paytirish, birlik matritsa, teskari matritsa, ko'p o'lchovli matritsa.

Elektr mashinalari ko'pchilik holda juda murakkab elektromexanik sistemalarga tashkil qiluvchi bo'lib kiradi. Ularni analiz va sintez qilish uchun hisoblash texnikasi jalb qilingan holda zamonaviy matematik apparat qo'llaniladi. Bunday holda har xil elektr mashinalarning statikada va ayniqsa dinamikadagi ish rejimlarini aniq matematik tavsiflash masalalari hozirgi zamonda ayniqsa muhimdir. Elektr mashinalarining tahlili bilan bog'langan masalalarning ko'pchilik qismi uchun zanjirlar tenglamalarini va elementar matrisa algebrasini bilish talab qilinadi. Elektr zanjirlarining murakkablashishi tahlilning matrisa metodining paydo bo'lishiga olib keldi [17, 22].

Matritsali metod ma'lum afzalliklaridan tashqari boshqa metodlar bilan yechish imkoniyati bo'lmagan masalalarni yechish mumkin bo'ladi [21]. Fizik (masalan, elektromagnit) jarayonni tavsiflovchi tenglamalar tizimining matrisa ko'rinishda yozuvi odatda juda ixcham, yechish algoritmi ham yaqqol bo'lib chiqadi.

Sonlarning to'g'ri burchakli jadvaliga *matritsa* deyiladi. Matritsani lotin alfavitining katta harflari (A, V, S va boshq.) bilan belgilaydilar. Matritsani tashkil etuvchi sonlar a_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$), uning elementlari deyiladi. Matritsaning gorizonttal qatordagi elementlari uning *satrlari* deyiladi, vertikalda joylashganlari esa – *ustunlari* deyiladi.

Agar satrlar soni ustunlar soniga teng ($m=n$) bo'lsa *kvadrat matrisa* deyiladi. Bunda satrlar soni matrisaning tartibini yoki *rangini* begilaydi.

Matritsalarda uchta matematik amal: qo'shish, ko'paytirish va matrisani songa ko'paytirish bajariladi.

$A = (a_{ij})_{m,n}$ va $V = (b_{ij})_{m,n}$ matrisalarni qo'shish natijasida quyidagi matrisa olinadi, ya'ni: $A+V = (a_{ij})_{m,n} + (b_{ij})_{m,n} = (a_{ij} + b_{ij})_{m,n}$.

Matritsalarini ko'paytirish. Quyida berilgan ikkita matrisani ko'paytiramiz:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} & a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} & a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} \end{vmatrix} \quad (2.66)$$

Matritsani o'zgaras songa ko'paytirish uchun shu sonni matrisaning har birta elementiga ko'paytirish lozim.

Matritsalarini bo'lish usuli mavjud emas va bunday amalni bajarish uchun tenglamaning ikkala qismini teskari matrisaga ko'paytirish yo'lini ishlatadilar.

Matritsali algebra elementlari va matrisalar bilan bajariladigan asosiy amallar, matrisali tahlilga asoslangan metodlarning afzalliklari.

m ta satr va n ta ustundan iborat to'g'ri to'rtburchak shakldagi $m \cdot n$ ta sondan tuzilgan jadval $m \times n$ tartibli matritsa deb ataladi.

Matritsalar A, B, C kabi bosh lotin harflar bilan, ularni tashkil etuvchi sonlar esa a_{ij}, v_{ij}, s_{ij} kabi belgilanadi. Bu sonlar shu matritsaning elementlari deb ataladi. Bu yerda i - element joylashgan satrni, j esa ustunning tartib raqamini bildiradi.

Agarda A matritsaning tartibini ko'rsatishga extiyoj bo'lsa, u $A_{m \times n}$ ko'rinishda yoziladi.

$A_{m \times n}$ matritsada $m = n$ bo'lsa, u kvadrat, $m \neq n$ bo'lsa to'g'ri to'rtburchakli matritsa deyiladi. Bunda, agar $m = 1$ bo'lsa, satr matritsaga va $n = 1$ bo'lsa, ustun matritsaga ega bo'lamiz. $m=1$ va $n=1$ bo'lganda matritsa birta sonni ifodalaydi. Demak, matritsa ma'lum bir ma'noda son tushunchasini umumlashtiradi.

A va B matritsalar teng deyiladi ($A=B$ deb yoziladi), agarda ular bir xil tartibli va ularning mos elementlari o'zaro teng bo'lsa, ya'ni $a_{ij} = v_{ij}$ shart bajarilsa, $A = B$ deb yozish mumkin.

$A = \{a_{ij}\}$ matritsada a_{ii} ko'rinishdagi elementlar diagonal elementlar deyiladi. Barcha diagonal elementlari birga teng ($a_{ii} = 1$), qolgan barcha elementlari esa nolga teng ($a_{ij} = 0, i \neq j$) bo'lgan kvadrat matritsa birlik matritsa deyiladi va E kabi belgilanadi. Diagonali 1 sonidan iborat matritsa birlik matritsa deyiladi. Barcha elementlari nolga teng ($a_{ij} = 0$) bo'lgan matritsa nol matritsa deyiladi va 0 kabi belgilanadi.

Bir xil $m \times n$ tartibli A va B matritsalar yig'indisi yoki ayirmasi deb shunday $m \times n$ tartibli C matritsaga aytiladiki, uning elementlari $s_{ij} = a_{ij} \pm v_{ij}$ kabi aniqlanadi va $S=A+V$ deb yoziladi.

Matritsalar yig'indisi uchun $A+B=B+A$ (kommutativlik),

$A+(V+S) = (A+V)+S$ (assotsiativlik) qonunlari o'rinli bo'ladi.

Bundan tashqari $A - A = 0$, $A \pm 0 = A$, $A+A=2A$ tengliklar ham o'rinli bo'ladi.

Ixtiyoriy $m \times n$ tartibli $A = \{a_{ij}\}$ matritsaning λ songa ko'paytmasi deb $\{\lambda a_{ij}\}$ matritsaga aytiladi va u λA kabi belgilanadi.

Matritsalar qo'shish va songa ko'paytirish amallari uchun quyidagi tengliklar o'rinli bo'ladi:

$$\lambda (A \pm V) = \lambda A \pm \lambda V, (\lambda \pm \mu) A = \lambda A \pm \mu A, \quad (2.67)$$

$$0 \cdot A = O, \lambda \cdot O = O$$

$A_{m \times r}$ va $V_{q \times n}$ matritsalar uchun $p=q$ shart bajarilganda ularning ko'paytmasi (AB) deb shunday $S_{m \times n}$ matritsaga aytiladiki, uning s_{ij} elementlari ($i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$) ushbu

$$s_{ij} = \sum_{k=1}^p a_{ik} v_{kj} \quad (2.68)$$

tenglik bilan aniqlanadi.

Shunday qilib, s_{ij} element A matritsaning i – satr elementlarini B matritsaning j -ustun mos elementlariga ko'paytirib, ularni qo'shib chiqishdan hosil qilinadi, ya'ni “satrni ustunga ko'paytirish” qoidasi bilan topiladi.

Matritsa elementlari ikki tomonidan qavslar yoki ikkita vertikal to'g'ri chiziq, orasiga olib yoziladi. Masalan, uchta satr va to'rtta ustundan iborat (3×4 tartibli) matritsa quyidagicha yoziladi:

$$A_{i,j} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{pmatrix} \quad (2.69)$$

Bu matritsani uchta to'rt o'lchovli vektor satrlar tizimi sifatida yoki to'rtta uch o'lchovli vektor ustunlar tizimi sifatida qarash mumkin.

Ko'pincha ustunlari va satrlari soni bir xil bo'lgan matritsalar uchraydi. p ta ustun va p ta satrdan iborat matritsani p - tartibli kvadrat matritsa deyiladi.

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (2.75)$$

Bunday matritsa «birlik» deb atalishiga asosiy sabab ixtiyoriy kvadrat matritsa A uchun

tenglik o'rinli.

Ko'pchilik hollarda teskari matritsa tushunchasi ham ishlatiladi. A matritsaga teskari A^{-1} matritsa deb shunday matritsaga aytiladiki, uning uchun

tenglik o'rinlik bo'ladi.

Yuqorida keltirilganlardan foydalanib, chiziqli tenglamalar tizimini matritsalar yordamida ifodalaymiz.

tizim berilgan bo'lsin. A bilan noma'lumlar oldidagi koeffitsientlardan tashkil topgan matritsani belgilaymiz:

V bilan ozod hadlardan iborat vektor ustunni, X bilan esa noma'lumlardan iborat vektor ustunni belgilaymiz:

$$B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_n \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{pmatrix}$$

U holda berilgan (3.5) tizim quyidagicha yoziladi: $A \cdot X = B$.

Elektr mashinalardagi elektromagnit va elektromexanik jarayonlarni tavsiflovchi differensial tenglamalar ham chiziqli tenglamalar tizimi kabi matritsalar ko‘rinishiga keltiriladi.

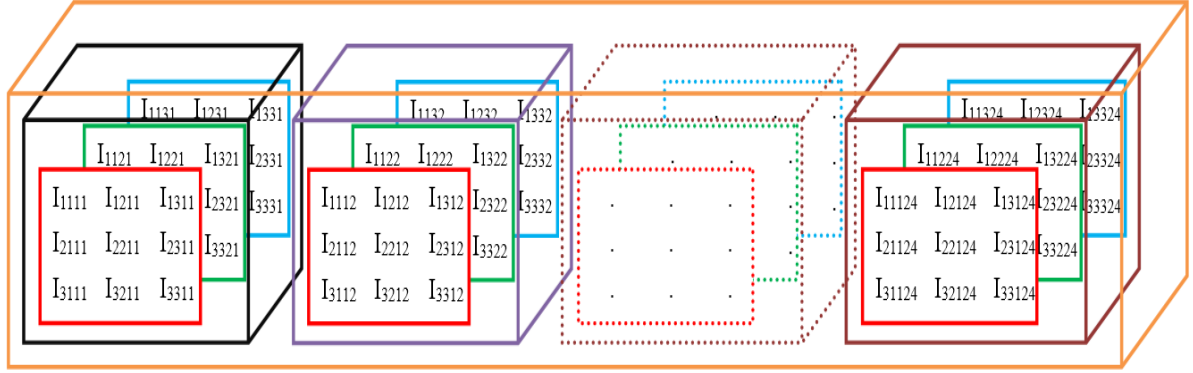
Elektromexanika masalalarida ko‘p o‘lchovli matritsalaridan ham foydalaniladi. Masalan, elektr motor ikki o‘lchovli matritsa ko‘rinishida ifodalanadi. Texnologik mashinalarning elektr yuritmasi tarkibiga bir nechta elektr motor kiradi. Elektr yuritmani yagona matritsa ko‘rinishida ifodalasak ikki o‘lchovli matritsalar birlashib uch o‘lchovli matritsani hosil qiladi.

$$s(j, i, k) = \left\| \begin{array}{ccccc} S_{111} & S_{121} & S_{131} & \dots & S_{1n1} \\ S_{211} & S_{221} & S_{231} & \dots & S_{2n1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ S_{j11} & S_{j21} & S_{j31} & \dots & S_{jn1} \end{array} \middle| \begin{array}{ccccc} S_{112} & S_{122} & S_{132} & \dots & S_{1n2} \\ S_{212} & S_{222} & S_{232} & \dots & S_{2n2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ S_{j12} & S_{j22} & S_{j32} & \dots & S_{jn2} \end{array} \right\| \dots \left\| \begin{array}{ccccc} S_{11m} & S_{12m} & S_{13m} & \dots & S_{1nm} \\ S_{21m} & S_{22m} & S_{23m} & \dots & S_{2nm} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ S_{j1m} & S_{j2m} & S_{j3m} & \dots & S_{jnm} \end{array} \right\| \quad (2.80)$$

m -texnologik mashinalar elektr yuritmasidagi motorlar soni.

Texnologik mashinalar elektr yuritmasi matritsaviy modelini, bir necha tekisliklardan iborat bo‘lgan, kub (yoki parallelepiped) shaklida tasavvur qilish mumkin, ularning soni motorlar soniga teng bo‘ladi (2 rasm). Bunday elektr yuritmalarning hisoblash uchun uch o‘lchamli massiv qo‘llaniladi $R(k, j, i)$, qayerdagi k –elektr yuritmadagi motor raqamini; j va i – ikki o‘lchovli matritsa ko‘rinishidagi motorni muvozanat tenglamasi.

Uch o‘lchamli matritsa texnologik mashinalar elektr yuritmasini ma’lum bir vaqt oralig‘idagi ish rejimi holatini tavsiflaydi. Agar elektr yuritmaning vaqt bo‘yicha ish rejimi o‘rganilsa, bunda to‘rt o‘lchamli matritsa qo‘llaniladi, bunda uch o‘lchamli matritsa vaqt bo‘yicha o‘zgaradi. 3 rasmda bir nechta uch o‘lchamli matritsalaridan tashkil topgan, eng oddiy to‘rt o‘lchamli matritsa ko‘rsatilgan.



Rasm. 2.7. Korxonaning umumlashtirilgan to‘rt o‘lchamli ETT modeli.

Bunda, korxonaning elektr iste‘moli grafigini yorituvchi 4 o‘lchamli matritsa quyidagi shaklda bo‘ladi:

$$S_{ijkl} = \begin{array}{|ccc|ccc|ccc|} \hline S_{1111} & S_{1211} & S_{1311} & S_{1121} & S_{1221} & S_{1321} & S_{1131} & S_{1231} & S_{1331} \\ S_{2111} & S_{2211} & S_{2311} & S_{2121} & S_{2221} & S_{2321} & S_{2131} & S_{2231} & S_{2331} \\ S_{3111} & S_{3211} & S_{3311} & S_{3121} & S_{3221} & S_{3321} & S_{3131} & S_{3231} & S_{3331} \\ \hline S_{1112} & S_{1212} & S_{1312} & S_{1122} & S_{1222} & S_{1322} & S_{1132} & S_{1232} & S_{1332} \\ S_{2112} & S_{2212} & S_{2312} & S_{2122} & S_{2222} & S_{2322} & S_{2132} & S_{2232} & S_{2332} \\ S_{3112} & S_{3212} & S_{3312} & S_{3122} & S_{3222} & S_{3322} & S_{3132} & S_{3232} & S_{3332} \\ \hline \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hline S_{1114} & S_{1214} & S_{1314} & S_{1124} & S_{1224} & S_{1324} & S_{1134} & S_{1234} & S_{1334} \\ S_{2114} & S_{2214} & S_{2314} & S_{2124} & S_{2224} & S_{2324} & S_{2134} & S_{2234} & S_{2334} \\ S_{3114} & S_{3214} & S_{3314} & S_{3124} & S_{3224} & S_{3324} & S_{3134} & S_{3234} & S_{3334} \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{l} \rightarrow (k) \rightarrow (j) = \\ \downarrow \quad \downarrow \\ (i) \quad (t) \end{array} \quad (2.81)$$

bu yerda t – to‘rt o‘lchovli matritsaning oxirgi indeksi bo‘lib elektr iste‘molining sutkali grafigidagi vaqt oralig‘ini anglatadi.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Matritsa va matritsali metod nima?
2. Kvadrat, teskari va birlik matritsa nima?
3. matritsalarini qo‘shish va ayirish qanday bajariladi?
4. ko‘p o‘lchovli matritsa qanday bo‘ladi?

2.4. Umumlashgan elektr mashinalar nazariyasi asoslari.

Kalit so'zlar: *umumlashtirilgan nazariya, Umumlashtirilgan elektr mashinalar, ideallashtirilgan ikki qutbli mashina, elektromexanikaviy ko'pqutblik, elektr mashinalarning matematik modeli, induktiv elektr mashinalar, Ikki fazali umumlashtirilgan elektr mashina, qo'zg'almas koordinatalar tizimi, Park – Gorev tenglamasi.*

Elektr mashinalarining zamonaviy nazariyasida fizik jarayonlardagi bog'lanishni o'rganishda algebraik tenglamalar asosiy vosita sifatida qabul qilinadi, vektor diagramma va ekvivalent sxemalar esa, xususiylar uchun ishlatiladi. Tenglamalarni qo'llash zanjir nazariyasining eng yangi erishilgan yutuqlarga moslashgan va elektr mashinalarining hamma tiplarini hamda ularning rejimlarini qamraydigan *umumiy nazariyasiga olib keladi* [12].

Umumlashtirilgan nazariya rivojlanishida ayon qutbli sinxron mashinalar barqaror rejimi uchun Blondelning "ikki reaksiya nazariyasi"ga R. Park, A. Gorev va Kronlar juda muhim hissa qo'shdilar. Park o'zining ishlarida faqat sinxron mashinaning ikki o'q nazariyasi umumiy tenglamalarini keltirib chiqarish bilan cheklanib qolmasdan, bu tenglamalarni ko'p muhim amaliy masalalarni yechish uchun qanday qilib foydalanish mumkinligini ko'rsatdi [13]. *Kronning umumlashtirilgan nazariyasi* Park almashtirishi tufayli paydo bo'ldi.

Umumlashtirilgan elektr mashinalari – real elektr mashinalari ish jarayonlarini tahlil qilishga imkon beradigan matematik model. Har qanday mashinalar ekvivalent ikki qutbli mashinalar bilan almashtirilishi mumkin. Havo oralig'ida doiraviy maydonli barcha elektr mashinalarini umumlashtirilgan elektr mashinalaridan olish mumkin [10].

Umumlashtirilgan elektr mashinalari ikkita o'qqa quyidagicha keltiriladi. Rotorda ikkita chulg'am fazoda 90 el. gradusga siljigan bo'lib d, q o'qlarida har xil parametrlarga ega bo'lsa ularning i_{dr}, i_{qr} toklarini haqiqiy deb qarab, stator toklarini esa, rotorning d, q o'qlari tizimida ifodalash maqsadga muvofiq bo'ladi.

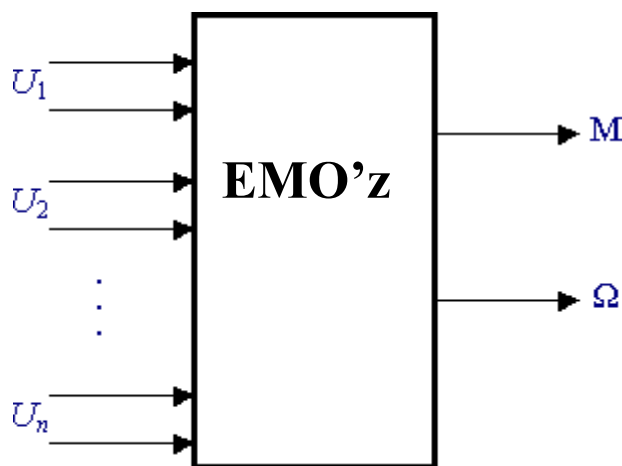
Demak, statorda 90 el. gradusga siljigan ikki α , β fazali va rotorda ikkita d , q fazasi bo'lgan mashinalarni *umumlashtirilgan mashinalar deb qarash mumkin.*

Asosiy tenglamalar tizimi ideallashtirilgan ikki qutbli mashinalar uchun chiqariladi (dastlabki qabul qilingan cheklanishlarda). Umumiy holda bu tizim, toklardan bog'liq bo'lgan kuchlanishning bir necha tashkil etuvchilarining yig'indisiga tenglashtirilgan ko'rinishda berilgan kuchlanish, qo'yilgan moment esa, momentlar tashkil etuvchilarining yig'indisi ko'rinishida keltirilgan.

Bu mashinalarning differensial tenglamalari o'zgaruvchan koeffisientlarga ega. Bu masalani yangi koordinatalar tizimini kiritish yo'li bilan soddalashtirish mumkin. Rotorning aylanayotgan d, q o'qlari bilan qo'zg'almas bog'langan koordinatalar kiritilsa va bu koordinatalar o'qlariga statorning fazoviy tok, oqim ilashish va kuchlanish vektorlari proeksiyalansa statorning yangi o'zgaruvchilari olinadi.

Elektr mashinalarni kirishlariga $u_1, u_2, \dots, u_n$, kuchlanish berilgan, chiqishlari esa, elektromagnit moment va aylanish tezligi bo'lgan elektromexanik ko'p qutblik sifatida qarash mumkin. Elektromexanik o'zgartkichning M va Ω o'zgaruvchilari tizimning mexanik qismi bilan bog'laydi, $u_1, u_2, \dots, u_n$ kuchlanishlar esa, elektr yuritmani boshqaruv tizimi bilan bog'laydi.

Barcha turdagi elektr motorlardagi dinamik jarayonlarni matematik ifodalash uchun umumlashgan elektr mashinalar nazariyasidan foydalaniladi.



2.8.-rasm. Elektromexanikaviy ko'p qutblik

Adabiyotlarda [12, 14, 19] har qanday statori n -faza chulg'amli bo'lgan ko'p fazali elektr mashinalarni stator (rotor) chulg'amlarining to'la qarshiliklari teng bo'lganda dinamik jarayonlarni o'rganish maqsadida ekvivalent ikki fazali elektr mashinalarga keltirish mumkinligi asoslangan.

Elektr mashinalarning matematik modeli –bu energiyani elektromexanikaviy o'zgartirish jarayonlarini ifodalovchi va o'rganilayotgan muammoni qanoatlantiradigan aniqlikda yechimini ta'minlay oladigan soddalashtirishlar bilan olingan tenglamalar tizimidir. Elektr mashinalarning matematik modellari analogli va raqamli hisoblash mashinalarini qo'llash tufayli elektromexanik tizimlarni tadqiq qilishda keng qo'llanilib kelinmoqda. Hozirgi kunda mavjud bo'lgan elektr mashinalarning matematik modellari elektr mexanikasining barcha masalalarini tadqiq qilish imkoniyatini beradi [14, 20].

Uch fazali asinxron motorni stator va rotor zanjirlari uchun Kirxgofning 2-qonuniga ko'ra differensial tenglamalarni yozib chiqamiz. Uch fazali stator chulg'amlari kuchlanishlari muvozanat tenglamalari quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\begin{cases} U_{1a} = i_{1a} \cdot R_1 + \partial \Psi_{1a} / \partial t; \\ U_{1b} = i_{1b} \cdot R_1 + \partial \Psi_{1b} / \partial t; \\ U_{1c} = i_{1c} \cdot R_1 + \partial \Psi_{1c} / \partial t; \end{cases} \quad (2.82)$$

Xuddi shu tartibda rotor chulg'amlari kuchlanishlarining muvozanat tenglamalari:

$$\begin{cases} U'_{2a} = i'_{2a} \cdot R'_2 + \partial \Psi_{2a} / \partial t; \\ U'_{2b} = i'_{2b} \cdot R'_2 + \partial \Psi_{2b} / \partial t; \\ U'_{2c} = i'_{2c} \cdot R'_2 + \partial \Psi_{2c} / \partial t; \end{cases} \quad (2.83)$$

Bu yerda U_{1a} , U_{1b} , U_{1c} , U'_{2a} , U'_{2b} , U'_{2c} – stator va rotor faza kuchlanishlari oniy qiymatlari;

i_{1a} , i_{1b} , i_{1c} , i'_{2a} , i'_{2b} , i'_{2c} – stator va rotor faza toklari oniy qiymatlari;

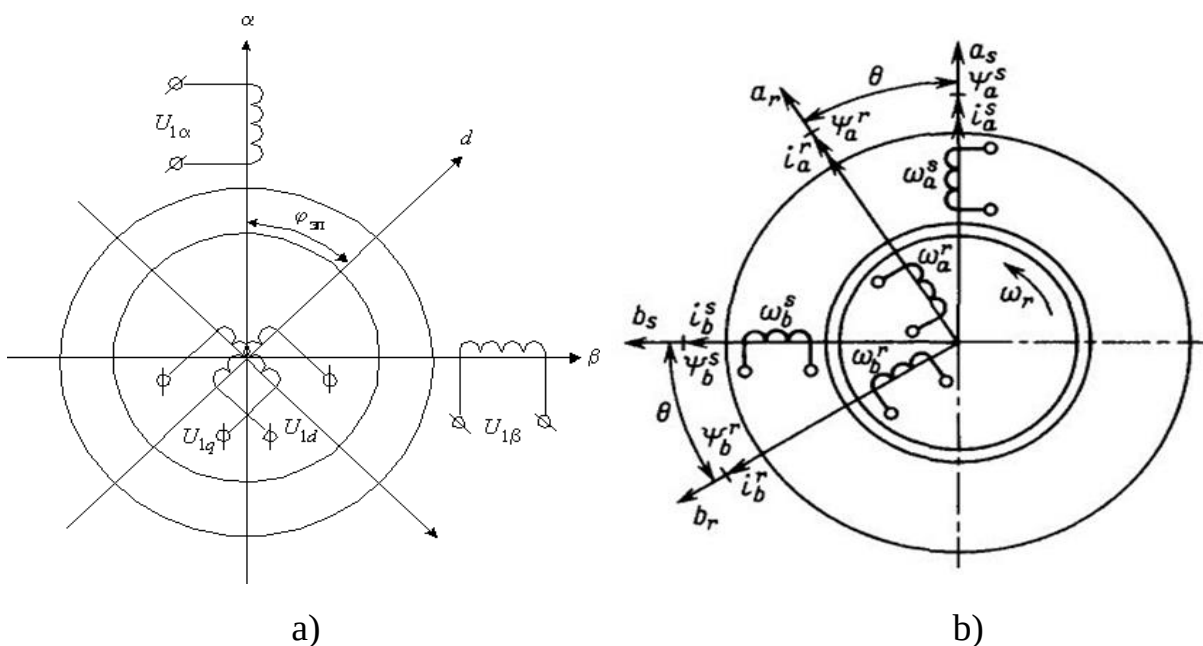
Ψ_{1a} , Ψ_{1b} , Ψ_{1c} , Ψ_{2a} , Ψ_{2b} , Ψ_{2c} – faza chulg'amlarini to'la oqim ilashuvlari;

R_1 , R'_2 – stator va rotor chulg'amlari aktiv qarshiliklari.

Ammo bu tenglamalar koeffitsientlari rotorni aylanishi tufayli davriy o'zgaruvchi (rotor induktivligi) miqdorlardan tashkil topganligi tufayli

tenglamaning yechimini topishni juda murakkablashtiradi. SHuning uchun tenglamalar rotor qo'zg'almas bo'lgan holatda keltirilib yoziladi. Buning uchun umumlashgan elektr mashinalar nazariyasidan foydalaniladi.

Induktiv elektr mashinalarning tuzilishidagi xilma-xillikga qaramasdan havo orlag'ida aylanuvchan magnit maydon hosil qilishga asoslangan barcha elektr mashinalarni umumlashgan elektr mashinalarga keltirish mumkin. Umumlashgan elektr mashinalar –bu stator va rotorda ikki juft chulg'ami bo'lgan ikki qutbli va ikki fazali elektr mashinalar hisoblanadi. Bu mashinalarda magnit maydon energiyasi sinusoida qonuni bo'yicha taqsimlanib, havo oralig'ida mujassamlashgan. Havo oralig'ida aylanuvchi magnit maydonni fazoda siljigan stator va rotor chulg'amlaridagi toklar orqali hosil qilinadi. Umumlashgan elektr mashinalarning sxemasi 2.9–rasmda keltirilgan.



2.9-rasm. Ikki fazali umumlashtirilgan elektr mashinalarning modeli: a) – umumiy ko‘rinishi va (b)-rotor tezligi e‘tiborga olingandagi sxema.

Umumlashtirilgan elektr mashinalarning matematik modelini yaratishda quyidagi soddalashtirishlarni qabul qilish maqsadga muvofiqdir:

- 1) Motor chulg'ami magnitlovchi kuch chiziqlari havo oralig'i bo'ylab tekis taqsimlangan;

- 2) Stator va rotor o'zagida isroflar mavjud emas;
- 3) Stator va rotor chulg'amlari aniq 120^0 ga siljigan va simmetrik holatda joylashgan;
- 4) Magnit zanjirni to'yinishi hodisasi mavjud emas.

Almashtirish sxemasini qurish uchun kuchlanish, tok va oqim ulashuvlar oniy qiymatlari uchun tenglamalar yozish kerak bo'ladi. Buning uchun faraz qilamiz, rotor chulg'ami statorga yaqinlashtirilgan, magnit tizimi to'yinmagan, faza toklari hosil qilgan magnit yurituvchi kuchlar havo oralig'ida sinusoidal taqsimlangan, dvigatelning ish rejimi esa, simmetrik va shu sababdan nolinchi ketma-ketlikdagi toklar bo'lmaydi. Bu esa stator bir fazasi uchun va rotorning bir fazasi uchun kuchlanishning muvozanat tenglamasini yozish imkonini beradi. Statorga tegishli o'zgaruvchilarni 1 raqami bilan rotorga tegishlilarini 2 raqami bilan belgilab, stator A fazasi uchun va rotor a fazasi uchun bu tenglamalarni quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$\begin{aligned} u_{1A} &= R_1 i_{1A} + \frac{d\Psi_{1A}}{dt}; \\ u_{2a} &= R_2 i_{2a} + \frac{d\Psi_{2a}}{dt}, \end{aligned} \quad (2.84)$$

bu yerda u_{1A} , u_{2a} - stator va rotor faza chulg'amlariga qo'yilgan kuchlanishlarning oniy qiymatlari; R_1, R_2 - mos ravishda stator va rotor faza chulg'amlarining aktiv qarshiliklari; i_{1A}, i_{2a} - stator va rotor faza chulg'amlaridagi toklarning oniy qiymatlari; Ψ_{1A}, Ψ_{2a} - qaralayotgan chulg'amdagi va stator hamda rotor boshqa faza chulg'amlaridagi toklar hosil qilgan stator va rotor faza chulg'amlarining to'la oqim ilashuvi

Asinxron dvigatellarda kechadigan elektromagnit jarayonlarni matematik ifodalashda quyidagi shartli talablar bajarilishi kerak:

- uch fazali tizim simmetrik, unda nol tok mavjud emas, faza toklari oniy qiymatlarining yig'indisi nolga teng: $i_{1A} + i_{1B} + i_{1C} = 0$;
- har bir faza chulg'amidan oqib o'tuvchi tok dvigatelni havo oralig'i aylanasi bo'ylab sinusoidal taqsimlangan magnit yurituvchi kuchni hosil qiladi;

- alohida chulgʻamlardagi magnit yurituvchi kuchlarning yigʻindisi dvigatel havo oraligʻi boʻylab sinusoidal taqsimlangan umumiy magnit induktsiyani hosil qiladi;
- elektr mashinalarning magnitlanish harakteristikasi chiziladi.

Ikki fazali umumlashgan elektr mashinalarning faza koordinatalariga keltirilmagan holdagi differensial tenglamalari quyidagi koʻrinishda boʻladi:

$$\left. \begin{aligned} u_{\alpha}^s &= i_{\alpha}^s \cdot r_{\alpha}^s + \frac{d\psi_{\alpha}^s}{dt}; \\ u_{\beta}^s &= i_{\beta}^s \cdot r_{\beta}^s + \frac{d\psi_{\beta}^s}{dt}; \\ -u_{\alpha}^r &= i_{\alpha}^r \cdot r_{\alpha}^r + \frac{d\psi_{\alpha}^r}{dt}; \\ -u_{\beta}^r &= i_{\beta}^r \cdot r_{\beta}^r + \frac{d\psi_{\beta}^r}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (2.85)$$

Bu tenglamalarda:

$u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ – stator kuchlanishi;

$u_{r\alpha}, u_{r\beta}$ – rotor kuchlanishi;

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}$ va $i_{r\beta}$ - mos holda stator va rotor toklari (2.10- rasm);

R_s va R_r - stator va rotor chulgʻamlari aktiv qarshiliklari.

(2.85) tenglamadan chulgʻamlardagi oqim ilashuvlarining tenglamalarini aniqlaymiz:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{\alpha}^s &= L_{\alpha}^s \cdot i_{\alpha}^s + M \cos(\theta) \cdot i_{\alpha}^r + M (\sin \theta) \cdot i_{\beta}^r; \\ \psi_{\beta}^s &= L_{\beta}^s \cdot i_{\beta}^s + M \cos(\theta) \cdot i_{\beta}^r + M (\sin \theta) \cdot i_{\alpha}^r; \\ \psi_{\alpha}^r &= L_{\alpha}^r \cdot i_{\alpha}^r + M \cos(\theta) \cdot i_{\alpha}^s + M (\sin \theta) \cdot i_{\beta}^s; \\ \psi_{\beta}^r &= L_{\beta}^r \cdot i_{\beta}^r + M \cos(\theta) \cdot i_{\beta}^s + M (\sin \theta) \cdot i_{\alpha}^s. \end{aligned} \right\} \quad (2.86)$$

bu yerda, L_s va L_r - stator va rotor chulgʻamlari induktiv qarshiliklari;

M - stator va rotor chulgʻamlari orasidagi oʻzaroinduktivlik.

(2.86) tenglamani (2.85) tenglamaga qoʻysak parametrlari davriy oʻzgaradigan katta hajmdagi tenglamalarni keltirib chiqaradi. SHuning uchun

rotori qo'zg'olmaydigan elektr mashinalarga o'tamiz. Bunda rotordagi EYUKlarni tenglamaga kiritib, parametrlari o'zgarmaydigan tenglamalarni olamiz. Bu almashtirishlar keyingi paragrafda ko'rib chiqiladi.

Qo'zg'almas α va β o'qlardan iborat bo'lgan koordinata o'qlari tizimida oqim ilashuvlari orqali ifodalangan umumlashgan elektr mashinalarning tenglamalari quyidagi ko'rinishda bo'ladi.

$$\left. \begin{aligned} u_{\alpha}^s &= i_{\alpha}^s \cdot r_{\alpha}^s + \frac{d\psi_{\alpha}^s}{dt}; \\ u_{\beta}^s &= i_{\beta}^s \cdot r_{\beta}^s + \frac{d\psi_{\beta}^s}{dt}; \\ u_{\alpha}^r &= i_{\alpha}^r \cdot r_{\alpha}^r + \frac{d\psi_{\alpha}^r}{dt} + \omega_r \psi_{\beta}^r; \\ u_{\beta}^r &= i_{\beta}^r \cdot r_{\beta}^r + \frac{d\psi_{\beta}^r}{dt} - \omega_r \psi_{\alpha}^r. \end{aligned} \right\} \quad (2.87)$$

Qo'zg'almas koordinatalar tizimida tenglamadagi oqim ilashuvlarini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{\alpha}^s &= L_{\alpha}^s \cdot i_{\alpha}^s + M \cdot i_{\alpha}^r; \\ \psi_{\beta}^s &= L_{\beta}^s \cdot i_{\beta}^s + M \cdot i_{\beta}^r; \\ \psi_{\alpha}^r &= L_{\alpha}^r \cdot i_{\alpha}^r + M \cdot i_{\alpha}^s; \\ \psi_{\beta}^r &= L_{\beta}^r \cdot i_{\beta}^r + M \cdot i_{\beta}^s \end{aligned} \right\} \quad (2.88)$$

(2.87) tenglamani elektr mashinalar parametrlari orqali ifodalasak quyidagi ko'rinishdagi tenglamani olamiz.

$$\left. \begin{aligned} u_{s\alpha} &= \frac{L_r R_s}{L_s L_r - M^2} \Psi_{s\alpha} - \frac{L_0 R_s}{L_s L_r - M^2} \Psi_{r\alpha} + \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt}; \\ u_{s\beta} &= \frac{L_r R_s}{L_s L_r - M^2} \Psi_{s\beta} - \frac{L_0 R_s}{L_s L_r - M^2} \Psi_{r\beta} + \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt}; \\ 0 &= \frac{L_s R_r}{L_s L_r - M^2} \Psi_{r\alpha} - \frac{L_0 R_r}{L_s L_r - M^2} \Psi_{s\alpha} + \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + p\nu \Psi_{r\beta}; \\ 0 &= \frac{L_s R_r}{L_s L_r - M^2} \Psi_{r\beta} - \frac{L_0 R_r}{L_s L_r - M^2} \Psi_{s\alpha} + \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} - p\nu \Psi_{r\alpha}; \end{aligned} \right\} \quad (2.89)$$

Motor validagi elektromagnit moment stator oqim ilashuvi va toklari orqali quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$M_e = \frac{m}{2} (\psi_{\alpha}^s i_{\beta}^s - \psi_{\beta}^s i_{\alpha}^s) \quad (2.90)$$

yoki rotorning oqim ilashuvi va toklari orqali quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$M_e = \frac{m}{2} (\psi_\alpha^r i_\beta^r - \psi_\beta^r i_\alpha^r) \quad (2.91)$$

Elektr mashinalarning harakat formulasi quyidagi ko‘rinishda bo‘ladi:

$$M_e = \frac{1}{p} J \frac{d\omega_r}{dt} \pm M_q, \quad (2.92)$$

Bu yerda M_q –motor validagi qarshilik momenti.

Sinxron mashinalarni matematik modeli yozishda quyidagi holatlarni mavjudligi ta’minlanishi kerak bo‘ladi

$$\begin{aligned} u_a &= U_m \cos(\gamma + \beta + \varphi), \\ u_b &= U_m \cos(\gamma + \beta + \varphi - 120), \\ u_c &= U_m \cos(\gamma + \beta + \varphi + 120), \\ i_a &= I_m \cos(\gamma + \beta), \\ i_b &= I_m \cos(\gamma + \beta - 120), \\ i_c &= I_m \cos(\gamma + \beta + 120). \end{aligned} \quad (2.93)$$

Uch fazali tizim uchun quyidagilar to‘g‘ri deb qabul qilamiz:

$$i_a + i_b + i_c = u_a + u_b + u_c = \Psi_a + \Psi_b + \Psi_c = 0$$

Stator faza chulg‘amlari va uyg‘otish chulg‘amlari uchun oqim ilashuvining quyidagi ifodalarni yozamiz:

$$\begin{aligned} \Psi_a &= L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c + M_{af} i_f, \\ \Psi_b &= L_b i_b + M_{ba} i_a + M_{bc} i_c + M_{bf} i_f, \\ \Psi_c &= L_c i_c + M_{ca} i_a + M_{cb} i_b + M_{cf} i_f, \\ \Psi_f &= L_f i_f + M_{af} i_a + M_{bf} i_b + M_{cf} i_c. \end{aligned} \quad (2.94)$$

Stator faza chulg‘amlari o‘zaro induktivli koeffitsientlari quyidagi ko‘rinishda ifodalanadi:

$$\begin{aligned} M_{ab} &= M_{ba} = M_o + M_m \cos(2\gamma - 120), \\ M_{bc} &= M_{cb} = M_o + M_m \cos 2\gamma, \\ M_{ac} &= M_{ca} = M_o + M_m \cos(2\gamma + 120), \\ M_{af} &= -M_f \cos \gamma, \\ M_{bf} &= -M_f \cos(\gamma - 120), \\ M_{cf} &= -M_f \cos(\gamma + 120), \end{aligned} \quad (2.95)$$

Bu yerda: M_o – faza chulg‘amlari o‘zaroinduktivlik koefitsientini o‘rtacha qiymati, M_m – faza chulg‘amlari o‘zaroinduktivlik koefitsientining maksimal qiymati, M_f – faza chulg‘amlari va uyg‘otish chulg‘amlari o‘zaroinduktivlik koefitsientining maksimal qiymati.

Stator fazalari o‘z induksiya koefitsientlari L_a, L_b, L_c quyidagi ifodalardan aniqlanadi:

$$\begin{aligned} L_a &= L_o + L_m \cos 2\gamma, \\ L_b &= L_o + L_m \cos (2\gamma + 120), \\ L_c &= L_o + L_m \cos (2\gamma - 120), \end{aligned} \quad (2.96)$$

Ayrim matematik amallarni bajargandan keyin nazariyada va amaliyotda eng muhim hisoblanadigan *Park – Gorev tenglamalar tizimi* kelib chiqadi.

Sinxron mashinalarni elektrodinamik va elektromexanik o‘tish jarayonlarini tadqiq qilishda rotor o‘qiga mahkamlangan va koordinata o‘qlariga yozilgan ifodalar asosidagi matematik modeldan foydalaniladi. Bunda Park-Gorev tenglamasini to‘la yoki soddalashtirilgan ifodasidan foydalaniladi.

$$\begin{cases} U_d = -\frac{1}{\omega_c} p\psi_d - \psi_q(1-s) - R_s i_d; \\ U_q = -\frac{1}{\omega_c} p\psi_q - \psi_d(1-s) - R_s i_q; \\ U_f = \frac{1}{\omega_c} p\psi_f + R_f i_f; \\ U_{di} = -\frac{1}{\omega_c} p\psi_{di} + R_{di} i_{di}; i = 0 \dots n_d \\ U_{qi} = -\frac{1}{\omega_c} p\psi_{qi} + R_{qi} i_{qi}; i = 0 \dots n_d \end{cases} \quad (2.97)$$

bu yerda u_d, u_q – stator chulg‘ami kuchlanishini bo‘ylama va ko‘ndalang tashkil etuvchilari; ψ_d, ψ_q – bo‘ylama va ko‘ndalang o‘qlar bo‘yicha stator chulg‘ami oqim ilashuvi proeksiyalari; $\psi_f, \psi_{ID}, \psi_{kQ}$ – uyg‘otish chulg‘ami oqim ilashuvi, l-bo‘ylama va k- ko‘ndalang dempfer kontur bo‘yicha; u_f – uyg‘otish chulg‘ami kuchlanishi; i_d, i_q – stator tokining bo‘ylama va ko‘ndalang tashkil etuvchilari; i_f, i_{ID}, i_{kQ} – uyg‘otish chulg‘ami toki, l- bo‘ylama va k- ko‘ndalang o‘qlar bo‘yicha; r, r_f, r_{ID}, r_{kQ} – stator va rotor chulg‘amlarining aktiv qarshiliklari; $\omega_s = 2\pi f$ – sinxron burchak chastota; S – rotor sirpanishi.

Tenglamalarning soddalashtirilgan ifodasi:

$$\begin{cases} U_d = -p\psi_d - \psi_q p\gamma - I_d r; \\ U_q = \psi_d p\gamma - p\psi_q - I_q r; \\ U_0 = -p\psi_0 - I_0, \end{cases} \quad (2.98)$$

bu yerda $U_d = -\sin\delta$; $U_q = \cos\delta$; $p\gamma = \frac{d(\omega_0 + \delta)}{dt} = \omega_0 + \frac{d\delta}{dt}$.

nisbiy birlikdagi koordinatada $\omega_0=1$; bunda $p\gamma = 1 + p\delta$.

Sinxron mashinalarning universal modeli sifatida quyidagi ifodani keltirish mumkin:

$$\begin{cases} U_d = -i_d r - p\psi_d - \omega_s(1 + s)\psi_q; \\ U_q = -i_q r - p\psi_q - \omega_s(1 + s)\psi_d; \\ U_f = i_f r_f + p\psi_f; \\ 0 = i_{ld} r_{ld} + p\psi_{ld}; \\ 0 = i_{lq} r_{lq} + p\psi_{lq}; \\ M_T = J\omega_s p s + 1,5(\psi_d i_q - \psi_q i_d), \end{cases} \quad (2.99)$$

bu yerda J – rotor inersiya momenti; p – differensiallash operatori; M_T – turbinaning mexanik momenti.

Ushbu matematik ifodalar sinxron mashinalarni modellashtirishda foydalaniladi.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Umumlashtirilgan elektr mashina nima?
2. Ideallashtirilgan ikki qutbli mashina qanday bo'ladi?
3. Elektr mashinalarning matematik modeli nima?
4. Induktiv elektr mashinalar nima?
5. Qo'zg'almas koordinatalar tizimi nima?
6. Park – Gorev tenglamalari nimani tavsiflaydi?

2.5. Energiyani elektromexanik o'zgartirishda koordinatalarni almashtirish qoidalari

Kalit so'zlar: α, β koordinata o'qlari, d, q koordinata o'qlari, muvozanat tenglamalari, oqim ilashuvlarining tenglamalari, matematik almashtirishlar, modelning adekvatligi, to'g'ri va teskari almashtirish ifodalarni.

Umumlashgan elektr mashinalar koordinatalari va parametrlarini yozish uchun quyidagi indekslar tizimini qabul qilamiz. Stator kattaliklari uchun 1 raqamini va rotor kattaliklari uchun esa 2 raqamini, α, β koordinata o'qlari stator uchun va d, q o'qlari esa rotor koordinata o'qlarini indeksleri bo'ladi. Umumlashgan elektr mashinalardagi dinamik jarayonlar uning chulg'amlari uchun yozilgan to'rtta elektr muvozanat tenglamalari bilan tavsiflanadi. Stator va rotorning real toklari va kuchlanishlari orqali oqim ilashuvlarining tenglamalari quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

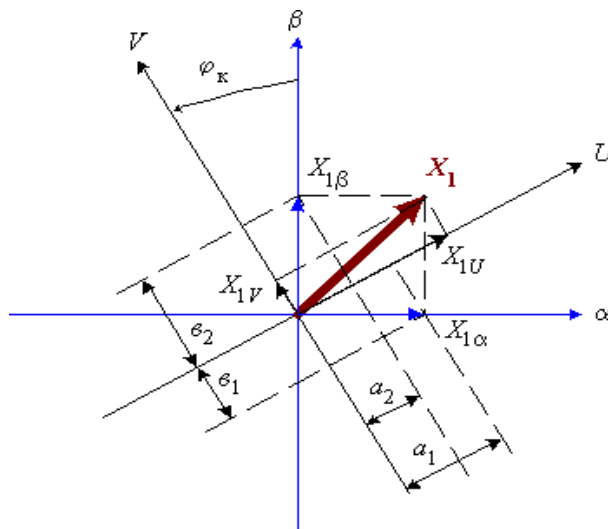
$$\begin{aligned}U_{1\alpha} &= R_1 i_{1\alpha} + \frac{d \Psi_{1\alpha}}{dt}; \\U_{1\beta} &= R_1 i_{1\beta} + \frac{d \Psi_{1\beta}}{dt}; \\U_{2d} &= R_2 i_{2d} + \frac{d \Psi_{2d}}{dt}; \\U_{2q} &= R_2 i_{2q} + \frac{d \Psi_{2q}}{dt},\end{aligned}\quad (2.100)$$

Umumlashgan elektr mashinalar modelida fizik ob'ektning adekvatligini saqlagan holda real kattaliklarni chiziqli matematik almashtirishlar hisobiga yangi o'zgaruvchilarga almashtirish orqali matematik ifodalash bilan energiyani elektromexanik o'zgartirish jarayonlarining matematik ifodalashni ancha soddalashtirish mumkin. Modelning adekvatligi sharti sifatida odatda tenglamalarni almashtirishda quvvatlarning invariantligi talabi qabul qilinadi [18].

Dastlab statorning α, β va rotorning d, q ikkita koordinata o'qlarida ifodalangan fizikaviy o'zgaruvchilarni fazoda ω_k ixtiyoriy tezlikda aylanuvchi birta

koordinata tizimida hisobiy kattaliklarga o'tish imkonini beradigan matematik almashtirishlarni ko'rib chiqamiz.

Bu to'g'ri va teskari almashtirish ifodalarni olish uchun elektr mashinalar o'zgaruvchilarining oniy qiymatlarini vektorlar ko'rinishida ifodalash uslubidan foydalanamiz.



Rasm. 2.10. Stator o'zgaruvchilarini umumlashgan mashinalar o'zgaruvchilariga almashtirish.

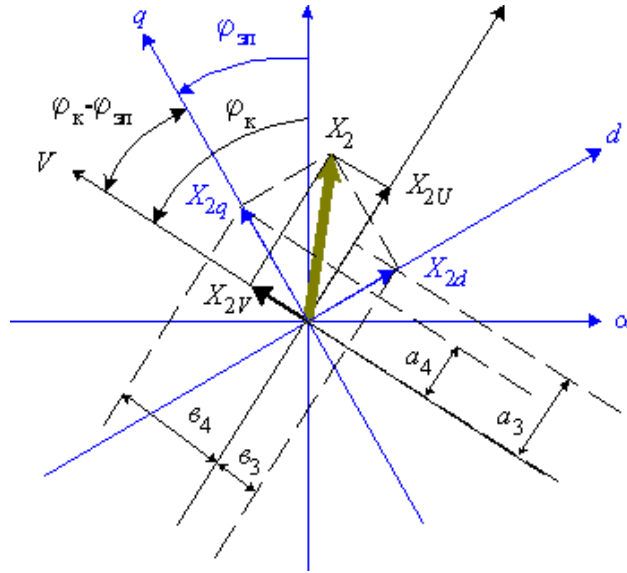
2.10-rasmda stator bilan qattiq bog'langan α , β o'qlarni ω_k tezlikda aylanuvchi u, v ortogonal koordinata tizimi o'zaro joylashuvi ko'rsatilgan hamda stator toki, kuchlanishini va oqim ilashuvini ifodalovchi stator chulg'ami o'zgaruvchisi x_1 ni almashtirilishi keltirilgan.

Qurilgan vektor diagrammaga qarab quyidagi almashtirishlarni yozish mumkin:

$$x_{1u} = a_1 + a_2 = x_{1\alpha} \cos \omega_k t + x_{1\beta} \sin \omega_k t;$$

$$x_{1v} = b_1 + b_2 = -x_{1\alpha} \sin \omega_k t + x_{1\beta} \cos \omega_k t \quad (2.101)$$

2.11-rasmda α , β o'qlarni stator bilan qattiq bog'langan va d , q o'qlarni rotor bilan qattiq bog'langan ω_k tezlikda aylanuvchi u, v ortogonal koordinata tizimi o'zaro joylashuvi ko'rsatilgan hamda rotor toki, kuchlanishini va oqim ilashuvini ifodalovchi rotor chulg'ami o'zgaruvchisi x_2 ni almashtirish keltirilgan.



2.11-rasm. Umumlashgan elektr mashinalar rotori o‘zgaruvchilarini almashtirish sxemasi.

Qurilgan vektor diagrammaga qarab quyidagi almashtirishlarni yozish mumkin:

$$\begin{aligned}
 a_3 &= x_{2d} \cos(\omega_k t - \varphi_{3n}); \\
 a_4 &= x_{2q} \sin(\omega_k t - \varphi_{3n}); \\
 b_3 &= -x_{2d} \sin(\omega_k t - \varphi_{3n}); \\
 b_4 &= x_{1p} \cos(\omega_k t - \varphi_{3n}).
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{aligned}
 x_{2u} &= a_3 + a_4 = x_{2d} \cos(\omega_k t - \varphi_{3n}) + x_{2q} \sin(\omega_k t - \varphi_{3n}); \\
 x_{2v} &= b_3 + b_4 = -x_{2d} \sin(\omega_k t - \varphi_{3n}) + x_{2q} \cos(\omega_k t - \varphi_{3n})
 \end{aligned}
 \quad (2.102)$$

SHunday qilib, o‘zgaruvchilarni ilgarlanma almashtirish ifodalari quyidagi ko‘rinishda bo‘ladi:

$$\begin{aligned}
 x_{1u} &= x_{1\alpha} \cos \omega_k t + x_{1\beta} \sin \omega_k t; \\
 x_{1v} &= -x_{1\alpha} \sin \omega_k t + x_{1\beta} \cos \omega_k t; \\
 x_{2u} &= x_{2d} \cos(\omega_k t - \varphi_{3n}) + x_{2q} \sin(\omega_k t - \varphi_{3n}); \\
 x_{2v} &= -x_{2d} \sin(\omega_k t - \varphi_{3n}) + x_{2q} \cos(\omega_k t - \varphi_{3n})
 \end{aligned}
 \quad (2.103)$$

SHu tartibda o‘zgaruvchilarni teskari almashtirish, ya’ni hisobiy kattaliklardan real kattaliklarga o‘tish ifodalarini ham quyidagi ko‘rinishda yozish mumkin bo‘ladi:

$$\begin{aligned}
 x_{1\alpha} &= x_{1u} \cos \omega_k t - x_{1v} \sin \omega_k t; \\
 x_{1\beta} &= x_{1u} \sin \omega_k t + x_{1v} \cos \omega_k t; \\
 x_{2d} &= x_{2u} \cos(\omega_k t - \varphi_{3n}) - x_{2v} \sin(\omega_k t - \varphi_{3n}); \\
 x_{2q} &= -x_{2u} \sin(\omega_k t - \varphi_{3n}) + x_{2v} \cos(\omega_k t - \varphi_{3n})
 \end{aligned}
 \quad (2.104)$$

Olingan ifodalar asosida umumlashgan elektr mashinalardagi jarayonlarning matematik ifodalarini yozib chiqamiz.

Elektr mashinalardagi elektr muvozanat tenglamasini yozib chiqamiz:

$$\begin{aligned}U_{1\alpha} &= R_1 i_{1\alpha} + \frac{d \Psi_{1\alpha}}{dt}; \\U_{1\beta} &= R_1 i_{1\beta} + \frac{d \Psi_{1\beta}}{dt}; \\U_{2d} &= R_2 i_{2d} + \frac{d \Psi_{2d}}{dt}; \\U_{2q} &= R_2 i_{2q} + \frac{d \Psi_{2q}}{dt},\end{aligned}\tag{2.105}$$

Tenglamadagi real o'zgaruvchilarni (2.104) tenglamalar orqali ifodalab u, v koordinatalar tizimiga o'tkazib yozib chiqamiz:

$$U_{1u} \cos \omega_k t - U_{1v} \sin \omega_k t = R_1 (i_{1u} \cos \omega_k t - i_{1v} \sin \omega_k t) + \frac{d}{dt} (\Psi_{1u} \cos \omega_k t - \Psi_{1v} \sin \omega_k t); \tag{2.106}$$

$$U_{1u} \sin \omega_k t - U_{1v} \cos \omega_k t = R_1 (i_{1u} \sin \omega_k t - i_{1v} \cos \omega_k t) + \frac{d}{dt} (\Psi_{1u} \sin \omega_k t - \Psi_{1v} \cos \omega_k t); \tag{2.107}$$

$$\begin{aligned}U_{2u} \cos(\omega_k t - \varphi_{3\pi}) - U_{2v} \sin(\omega_k t - \varphi_{3\pi}) &= R_2 [i_{2u} \cos(\omega_k t - \varphi_{3\pi}) - i_{2v} \sin(\omega_k t - \varphi_{3\pi})] + \\&\frac{d}{dt} [\Psi_{2u} \cos(\omega_k t - \varphi_{3\pi}) - \Psi_{2v} \sin(\omega_k t - \varphi_{3\pi})];\end{aligned}\tag{2.108}$$

$$\begin{aligned}U_{2u} \sin(\omega_k t - \varphi_{3\pi}) - U_{2v} \cos(\omega_k t - \varphi_{3\pi}) &= R_2 [i_{2u} \sin(\omega_k t - \varphi_{3\pi}) - i_{2v} \cos(\omega_k t - \varphi_{3\pi})] + \\&\frac{d}{dt} [\Psi_{2u} \sin(\omega_k t - \varphi_{3\pi}) - \Psi_{2v} \cos(\omega_k t - \varphi_{3\pi})];\end{aligned}\tag{2.109}$$

(2.106) i (2.107) tenglamalardagi differensiallash operatsiyalarini bajarib quyidagi tenglamalarni olamiz:

$$\begin{aligned}U_{1u} \cos \omega_k t - U_{1v} \sin \omega_k t &= R_1 (i_{1u} \cos \omega_k t - i_{1v} \sin \omega_k t) + \frac{d \Psi_{1u}}{dt} \cos \omega_k t - \Psi_{1u} \omega_k \sin \omega_k t - \\&\frac{d \Psi_{1v}}{dt} \sin \omega_k t - \Psi_{1v} \omega_k \cos \omega_k t);\end{aligned}\tag{2.110}$$

$$\begin{aligned}U_{1u} \sin \omega_k t - U_{1v} \cos \omega_k t &= R_1 (i_{1u} \sin \omega_k t - i_{1v} \cos \omega_k t) + \frac{d \Psi_{1u}}{dt} \sin \omega_k t + \Psi_{1u} \omega_k \cos \omega_k t + \\&\frac{d \Psi_{1v}}{dt} \cos \omega_k t - \Psi_{1v} \omega_k \sin \omega_k t);\end{aligned}\tag{2.111}$$

(2.110) tenglamani $\cos \omega_k t$ ga (2.111) tenglamani esa $-\sin \omega_k t$ ga ko‘paytirib keyin ularni qo‘shamiz. Bu almashtirishlarni bajargandan so‘ng $\cos^2 \omega_k t + \sin^2 \omega_k t = 1$ ekanligini hisobga olib quyidagi tenglamani olamiz:

$$U_{1u} = R_1 i_{1u} + \frac{d \Psi_{1u}}{dt} - \omega_k \Psi_{1v}. \quad (2.112)$$

Agar (2.110) tenglamani $-\sin \omega_k t$ ga (2.111) tenglamani esa $\cos \omega_k t$ ga ko‘paytirsak v o‘qi bo‘yicha quyidagi stator tenglamalarini olish mumkin:

$$U_{1v} = R_1 i_{1v} + \frac{d \Psi_{1v}}{dt} + \omega_k \Psi_{1u}. \quad (2.113)$$

Rotor chulg‘ami uchun ham elektr muvozanat tenglamalarini shu tartibda olish mumkin. Umumlashgan elektr mashinalar chulg‘amlaridagi elektr muvozanat tenglamalar tizimi quyidagi ko‘rishga keladi:

$$\begin{aligned} U_{1u} &= R_1 i_{1u} + \frac{d \Psi_{1u}}{dt} - \omega_k \Psi_{1v}; \\ U_{1v} &= R_1 i_{1v} + \frac{d \Psi_{1v}}{dt} + \omega_k \Psi_{1u}; \\ U_{2u} &= R_2 i_{2u} + \frac{d \Psi_{2u}}{dt} - (\omega_k - \Omega_{3n}) \Psi_{2v}; \\ U_{2v} &= R_2 i_{2v} + \frac{d \Psi_{2v}}{dt} + (\omega_k - \Omega_{3n}) \Psi_{2u} \end{aligned} \quad (2.114)$$

Oqim ilashuvlarining 1α , 1β , va $2d$, $2q$ real koordinata o‘qlari bo‘yicha tenglamalari quyidagi ko‘rinishda bo‘ladi:

$$\begin{aligned} \Psi_{1\alpha} &= L_1 i_{1\alpha} + L_{12} \cos \varphi_{3n} i_{2d} - L_{12} \sin \varphi_{3n} i_{2q}; \\ \Psi_{1\beta} &= L_1 i_{1\beta} + L_{12} \sin \varphi_{3n} i_{2d} - L_{12} \cos \varphi_{3n} i_{2q}; \\ \Psi_{2d} &= L_2 i_{2d} + L_{12} \cos \varphi_{3n} i_{1\alpha} - L_{12} \sin \varphi_{3n} i_{1\beta}; \\ \Psi_{2q} &= L_2 i_{2q} - L_{12} \cos \varphi_{3n} i_{1\alpha} - L_{12} \sin \varphi_{3n} i_{1\beta}. \end{aligned} \quad (2.115)$$

Shu tartibda (2.94) tenglama yordamida (2.115) oqim ilashuvi tenglamasini ham almashtirish mumkin. Natijada quyidagi ifodani olamiz:

$$\begin{aligned}
\Psi_{1u} &= L_1 i_{1u} + L_{12} i_{2u}; \\
\Psi_{1v} &= L_1 i_{1v} + L_{12} i_{2v}; \\
\Psi_{2u} &= L_2 i_{2u} + L_{12} i_{1u}; \\
\Psi_{2v} &= L_2 i_{2v} + L_{12} i_{1v}
\end{aligned}
\tag{2.116}$$

Umumlashgan mashinalarning ω_k tezlikda aylanuvchi u, v koordinatalar tizimida elektr mashinalarning stator va rotor chulgʻamlari oʻzaro qoʻzgʻalmas boʻladi. SHuning uchun har qaysi chulgʻamning oqim ilashuvi chulgʻamlarning aynan oʻsha oʻqdagi xususiy induktivligi va oʻzaro induktivligi orqali aniqlanadi. Chulgʻamlardagi toklar oʻzaro 90° elektr burchakka siljiganligi uchun boshqa chulgʻamlar bilan oʻzaro taʼsirlar mavjud boʻlmaydi.

Quvvat va tezlik oʻzgarmaganligi tufayli muvofiq ravishda momentning ham invariantligi talabi bajarilayotganini tekshirib koʻramiz.

Ifodalarni soddalashtirish uchun quyidagi tenglikni qabul qilamiz:

$$U_{2d} = U_{2q} = 0.$$

Bunda elektr mashinalarga toʻla quvvat stator orqali quyidagi ifoda boʻyicha uzatiladi:

$$Q_1 = U_{1\alpha} i_{1\alpha} + U_{1\beta} i_{1\beta} \tag{2.117}$$

(2.117) tenglamani (2.103) ifodalar orqali oʻzgaruvchilarni oʻrin almashtirishlarini bajarsak, quyidagi tenglamani olamiz:

$$\begin{aligned}
Q_1 &= (U_{1u} \cos \omega_k t - U_{1v} \sin \omega_k t) \cdot (i_{1u} \cos \omega_k t - i_{1v} \sin \omega_k t) + \\
&+ (U_{1u} \sin \omega_k t + U_{1v} \cos \omega_k t) \cdot (i_{1u} \sin \omega_k t + i_{1v} \cos \omega_k t) = \\
&= U_{1u} i_{1u} (\cos^2 \omega_k t + \sin^2 \omega_k t) + U_{1v} i_{1v} (\cos^2 \omega_k t + \sin^2 \omega_k t) = \\
&= U_{1u} i_{1u} + U_{1v} i_{1v}.
\end{aligned}
\tag{2.118}$$

SHunday qilib bajarilgan almashtirishlar doirasida invariantlik sharti bajarilmoqda.

Real oʻzgaruvchilar bilan elektromagnit moment quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$M = p_n L_{12} [(i_{1\beta} i_{2d} - i_{1\alpha} i_{2q}) \cos \varphi_{3\pi} - (i_{1\beta} i_{2q} - i_{1\alpha} i_{2d}) \sin \varphi_{3\pi}] \tag{2.119}$$

(2.104) tenglamadan foydalanib, real oʻzgaruvchilarni almashtirilganlari bilan ifodalab quyidagi tenglamalarni olamiz:

$$\begin{aligned}
M = p_{\pi} L_{12} \cos \varphi_{3\pi} & \left\{ (i_{1u} \sin \omega_k t + i_{1v} \cos \omega_k t) [i_{2u} \cos(\omega_k t - \varphi_{3\pi}) - i_{2v} \sin(\omega_k t - \varphi_{3\pi})] - \right. \\
& \left. - (i_{1u} \cos \omega_k t - i_{1v} \sin \omega_k t) \cdot [i_{2u} \sin(\omega_k t - \varphi_{3\pi}) + i_{2v} \cos(\omega_k t - \varphi_{3\pi})] \right\} \\
- p_{\pi} L_{12} \sin \varphi_{3\pi} & \left\{ (i_{1u} \sin \omega_k t + i_{1v} \cos \omega_k t) [i_{2u} \sin(\omega_k t - \varphi_{3\pi}) + i_{2v} \cos(\omega_k t - \varphi_{3\pi})] + \right. \\
& \left. + (i_{1u} \cos \omega_k t - i_{1v} \sin \omega_k t) \cdot [i_{2u} \cos(\omega_k t - \varphi_{3\pi}) - i_{2v} \sin(\omega_k t - \varphi_{3\pi})] \right\} \quad (2.120) \\
& = p_{\pi} L_{12} (i_{1v} i_{2u} - i_{1u} i_{2v})
\end{aligned}$$

(2.120) tenglamadagi almashtirishlarni va (2.116) tenglamani hisobga olib elektromagnit momentni aniqlashning quyidagi ifodalarini olish mumkin:

$$M = p_{\pi} (i_{1v} \Psi_{1u} - i_{1u} \Psi_{1v}) \quad (2.121)$$

$$M = p_{\pi} \frac{L_{12}}{L_2} (i_{1v} \Psi_{2u} - i_{1u} \Psi_{2v}) \quad (2.122)$$

$$M = p_{\pi} \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} (\Psi_{1v} \Psi_{2u} - \Psi_{1u} \Psi_{2v}) \quad (2.123)$$

Olingan energiyani elektromexanik o'zgartirish tenglamalaridan o'zaro qo'zg'almas chulg'amlar modeliga o'tish dinamik jarayonlarni matematik ifodalashni ancha soddalashtirishini ko'rish mumkin bo'ladi. Elektromagnit momentni hisoblash formulalari ham ancha soddalashadi.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. α , β va d , q koordinata o'qlari nima uchun qo'llaniladi?
2. oqim ilashuvlarining muvozanat tenglamalarini yozing.
3. Modelning adekvatligi nima?
4. To'g'ri va teskari almashtirish ifodalari nima?

III-BOB. ELEKTROMEXANIK JARAYONLARNI TADQIQ QILISHDA MATRITSAVIY VA VEKTOR TAHLIL METODLARI

3.1. Elektr mashinalarni tadqiq qilishda vektor tahlilini qo'llash

Kalit so'zlar: vektorli ifodalash, fazoviy vektor moduli, simmetrik rejim, nosimmetrik rejim, induktivlik matritsasi, sinxron tezlik, kuchlanish vektori.

Hozirgi kunda o'zgaruvchan tok motorlarida kechadigan elektromagnit jarayonlarni matematik ifodalash uchun kuchlanish, tok va oqim ilashuvlarining fazoviy vektorlaridan keng foydalanilmoqda. Ushbu fazoviy vektorlarning modullari mos kattaliklarning amplituda qiymatlariga teng bo'ladi. Ma'lumki, sinusoidal kattaliklarning amplituda va effektiv qiymatlari o'zaro $\sqrt{2}$ koeffitsient orqali bog'langan bo'ladi. Shuning uchun fazoviy vektotrlarning modullarini $|\tilde{U}|$, $|\tilde{I}|$, $|\tilde{\Psi}|$ kabi belgilab $|\tilde{U}| = \sqrt{2}U$; $|\tilde{I}| = \sqrt{2}I$; $|\tilde{\Psi}| = \sqrt{2}\Psi$, kabi yozishimiz mumkin, bu yerda U , I , Ψ - kattaliklarning ta'sir etuvchi qiymatlaridir [8, 12].

Vektorli ifodalashda fazoviy vektor moduli stator chulg'amidagi kuchlanish va tokning amplituda qiymati kabi aniqlanadi, xususan, faza kuchlanishi va toki uchun:

$$\begin{aligned} |\tilde{U}_1| &= \sqrt{2}U_1 = (\sqrt{2}/\sqrt{3})U_{1Y} = \sqrt{2}U_{1\Delta}; \\ |\tilde{I}_1| &= \sqrt{2}I_1 = \sqrt{2}I_{1Y} = (\sqrt{2}/\sqrt{3})I_{1\Delta}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

bu yerda U_1 , I_1 - mos ravishda faza kuchlanishi va tokining effektiv qiymatlari.

Fazoviy vektorlarni qurish uchun kuchlanish, tok va oqim ilashuvlar oniy qiymatlari uchun tenglamalar yozish kerak bo'ladi. Buning uchun faraz qilamiz, rotor chulg'ami statorga yaqinlashtirilgan, magnit tizimi to'yinmagan, faza toklari hosil qilgan magnit yurituvchi kuchlar havo oralig'ida sinusoidal taqsimlangan, dvigatelning ish rejimi esa, simmetrik va shu sababdan nolinchi ketma-ketlikdagi toklar bo'lmaydi. Bu esa, stator bir fazasi uchun va rotorning bir fazasi uchun kuchlanishning muvozanat tenglamasini yozish imkonini beradi. Statorga tegishli

o'zgaruvchilarni 1 raqami bilan rotorga tegishlilarini 2 raqami bilan belgilab, stator A fazasi uchun va rotor a fazasi uchun bu tenglamalarni quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$\begin{aligned} u_{1A} &= R_1 i_{1A} + \frac{d\psi_{1A}}{dt}; \\ u_{2a} &= R_2 i_{2a} + \frac{d\psi_{2a}}{dt}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

bu yerda u_{1A} , u_{2a} - stator va rotor faza chulg'amlariga qo'yilgan kuchlanishlarning oniy qiymatlari; R_1, R_2 - mos ravishda stator va rotor faza chulg'amlarining aktiv qarshiliklari; i_{1A}, i_{2a} - stator va rotor faza chulg'amlaridagi toklarning oniy qiymatlari; ψ_{1A}, ψ_{2a} - qaralayotgan chulg'amdagi va stator hamda rotor boshqa faza chulg'amlaridagi toklar hosil qilgan stator va rotor faza chulg'amlarining to'la oqim ilashuvi:

$$\begin{aligned} \psi_{1A} &= L_{AA} i_{1A} + L_{AB} i_{1B} + L_{AC} i_{1C} + L_{Aa} i_{2a} + L_{Ab} i_{2b} + L_{As} i_{2c}; \\ \psi_{2a} &= L_{aA} i_{1A} + L_{aB} i_{1B} + L_{aC} i_{1C} + L_{aa} i_{2a} + L_{ab} i_{2b} + L_{as} i_{2c}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

bu yerda L_{AA}, L_{aa} -mos ravishda stator fazasining va rotor fazasining to'la induktivligi, u asosiy oqim ilashuvlari hamda A va a fazalardagi oqim ilashuvlari orqali aniqlanadi; $L_{AB}, L_{AC}, L_{ab}, L_{as}$ -stator A faza chulg'ami va unga nisbatan 120 va 240 el.grad.ga siljigan boshqa ikkita chulg'amlari orasidagi, hamda rotorning a chulg'ami va ikkita boshqa chulg'ami orasidagi o'zinduktsiya koeffitsienti; $L_{Aa}, L_{Ab}, L_{As}, L_{aA}, L_{aB}, L_{aC}$ - vaqtning har bir onida statorga nisbatan rotor holatiga bog'liq bo'lgan statorning A chulg'ami va rotor chulg'amlari, hamda rotorning a faza chulg'ami va stator chulg'amlari orasidagi o'zinduktsiya koeffitsienti,

$$L_{AB} = L_{AC} = L_{ab} = L_{ac} = L_{mf} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = L_{mf} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) = -0,5L_{mf}. \quad (3.4)$$

Stator fazasidagi va rotor fazasidagi to'la induktivlikni quyidagi formula orqali topamiz:

$$L_{AA} = L_{mf} + L_{1\sigma}; \quad L_{aa} = L_{mf} + L_{2\sigma}, \quad (3.5)$$

bu yerda L_{mf} -fazalarning asosiy induktivligi; $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ -mos ravishda stator fazasi va rotor fazasi sochilishlarining induktivligi.

Vektorli ifodalashni amalga oshirish uchun esa, asinxron mashinalar hamma fazalarini, rotorning uch fazasini va statorning uch fazasini birgalikda qarab chiqish kerak. Stator va rotor faza chulg'amlarining o'zaro joylashuvlari 1.1-rasmda tasvirlangan. Statorning B va C faza chulg'amlari elektrik fazoda A faza chulg'amiga nisbatan mos ravishda $2\pi/3$ va $4\pi/3$ burchakga siljigan. Xuddi shuningdek rotorning b va c faza chulg'amlari a faza chulg'amiga nisbatan siljigan bo'ladi. Ushbu siljishlarni hisobga olgan holda A va a fazalar uchun yozilgandek ((1.1)-(1.4) formulalarga q.) B, b, C, c o'zgaruvchilarning oniy qiymatlari uchun ifodalarni yozib, hamda tashqi kuchlanish ham statorga ham rotor qo'yilgan deb qarab natijani matritsa ko'rinishida taqdim qilishimiz mumkin:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 &= R_1 \mathbf{i}_1 + \frac{d\Psi_1}{dt}; \\ \mathbf{u}_2 &= R_2 \mathbf{i}_2 + \frac{d\Psi_2}{dt}; \\ \Psi_1 &= \mathbf{L}_1 \mathbf{i}_1 + \mathbf{L}_{12} \mathbf{i}_2; \\ \Psi_2 &= \mathbf{L}_{21} \mathbf{i}_1 + \mathbf{L}_2 \mathbf{i}_2, \end{aligned} \quad (3.6)$$

bu yerda $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \Psi_1, \Psi_2$ –mos ravishda stator va rotorning kuchlanishi, toki va oqim ilashuvlari oniy qiymatlarining ustunli vektorlari; $\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2$ –mos ravishda stator va rotor induktivligining matritsasi.

Ustunli matritsa quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\mathbf{u}_1 = \begin{bmatrix} u_{1A} \\ u_{1B} \\ u_{1C} \end{bmatrix}; \mathbf{u}_2 = \begin{bmatrix} u_{2a} \\ u_{2b} \\ u_{2c} \end{bmatrix}; \mathbf{i}_1 = \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{1B} \\ i_{1C} \end{bmatrix}; \mathbf{i}_2 = \begin{bmatrix} i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{2c} \end{bmatrix}; \Psi_1 = \begin{bmatrix} \Psi_{1A} \\ \Psi_{1B} \\ \Psi_{1C} \end{bmatrix}; \Psi_2 = \begin{bmatrix} \Psi_{2a} \\ \Psi_{2b} \\ \Psi_{2c} \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Induktivlik matritsasi $\mathbf{L}_1$ stator fazasi oqim ilashuvining stator tokiga bog'liqligini ifodalaydi, $\mathbf{L}_2$ induktivlik matritsasi esa, rotor fazasi oqim ilashuvining rotor tokiga bog'liqligini ifodalaydi:

$$\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} L_{mf} + L_{1\sigma} & -0,5L_{mf} & -0,5L_{mf} \\ -0,5L_{mf} & L_{mf} + L_{1\sigma} & -0,5L_{mf} \\ -0,5L_{mf} & -0,5L_{mf} & L_{mf} + L_{1\sigma} \end{bmatrix}; \quad (3.8)$$

$$\mathbf{L}_2 = \begin{bmatrix} L_{mf} + L_{2\sigma} & -0,5L_{mf} & -0,5L_{mf} \\ -0,5L_{mf} & L_{mf} + L_{2\sigma} & -0,5L_{mf} \\ -0,5L_{mf} & -0,5L_{mf} & L_{mf} + L_{2\sigma} \end{bmatrix}; \quad (3.9)$$

Ushbu matritsalarining birinchi qatorlari (3.2) tenglamadagi stator faza toklari oniy qiymatlari va (3.6) tenglamadagi rotor toklari oniy qiymatlari uchun olingan koeffitsientlardan tashkil topgan. $\mathbf{L}_1$ matritsaning keyingi ikki qatorlari A fazaga nisbatan B va C fazalarning fazoviy siljishlarini hisobga olgan holda, $\mathbf{L}_1$ matritsada esa, a fazaga nisbatan b va c fazalarning fazoviy siljishlarini hisobga olgan holda tuzilgan.

Rotor toklarining stator oqim ilashuviga va stator toklarining rotor oqim ilashuviga ta'sirini hisobga olish uchun mos ravishda $\mathbf{L}_{12}$ va $\mathbf{L}_{21}$ matritsalar xizmat qiladi:

$$\mathbf{L}_{12} = L_{mf} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \cos(\theta_2 + 2\pi/3) & \cos(\theta_2 - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_2 - 2\pi/3) & \cos \theta_2 & \cos(\theta_2 + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_2 + 2\pi/3) & \cos(\theta_2 - 2\pi/3) & \cos \theta_2 \end{bmatrix}; \quad (3.10)$$

$$\mathbf{L}_{21} = L_{mf} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \cos(\theta_2 - 2\pi/3) & \cos(\theta_2 + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_2 + 2\pi/3) & \cos \theta_2 & \cos(\theta_2 - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_2 - 2\pi/3) & \cos(\theta_2 + 2\pi/3) & \cos \theta_2 \end{bmatrix}; \quad (3.11)$$

Ushbu matritsalarining birinchi qatorlari (1.3) va (1.4) tenglamalarning o'ng tomonidagi ikkinchi hadlariga kiruvchi koeffitsientlardan tashkil topgan. Matritsalarining ikkinchi va uchinchi qatorlari, darsligimizning 1.1-qismida bayon qilinganidek A va a fazalar uchun keltirilgan almashtirishlarni B , C , b va c fazalar uchun ham bajarish natijasida yozilgan. Matritsa elementlarida kosinuslar mavjud bo'lib, ularning argumentlari sifatida vaqtning funktsiyasi hisoblangan rotor va stator orasidagi burchak kiradi.

Tenglamalar tizimining uchinchi va to'rtinchi tenglamalarining o'ng qismiga o'zgartirish kiritib, $\mathbf{a}$ qatorli matritsaga induktivlik matritsasining kvadratini ko'paytirish kerak. Bunday o'zgartirishlarning tartibini $\mathbf{aL}_1$ ko'paytmani o'zgartirish misolida ko'rsatamiz:

$$\mathbf{aL}_1 = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} L_{mf} + L_{1\sigma} & -0,5L_{mf} & -0,5L_{mf} \\ -0,5L_{mf} & L_{mf} + L_{1\sigma} & -0,5L_{mf} \\ -0,5L_{mf} & -0,5L_{mf} & L_{mf} + L_{1\sigma} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} [L_{mf} + L_{1\sigma} - 0,5(a + a^2)(L_{mf} + L_{1\sigma})a - 0,5L_{mf}(1 + a^2)(L_{mf} + L_{1\sigma})a^2 - 0,5L_{mf}(1 + a)]. \quad (3.12)$$

Bunda $a + a^2 = -1$; $1 + a^2 = -a$; $1 + a = -a^2$, ekanligini hisobga olsak, unda quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\mathbf{aL}_1 = \frac{2}{3} \left[\frac{3}{2} L_{mf} + L_{1\sigma} a \left(\frac{3}{2} L_{mf} + L_{1\sigma} \right) a^2 \left(\frac{3}{2} L_{mf} + L_{1\sigma} \right) \right]. \quad (3.13)$$

Ushbu ifodaga $(3/2)L_{mf} = L_m$; $L_m + L_{1\sigma} = L_1$ belgilash kiritamiz va quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\mathbf{aL}_1 = L_1 \mathbf{a} \quad (3.14)$$

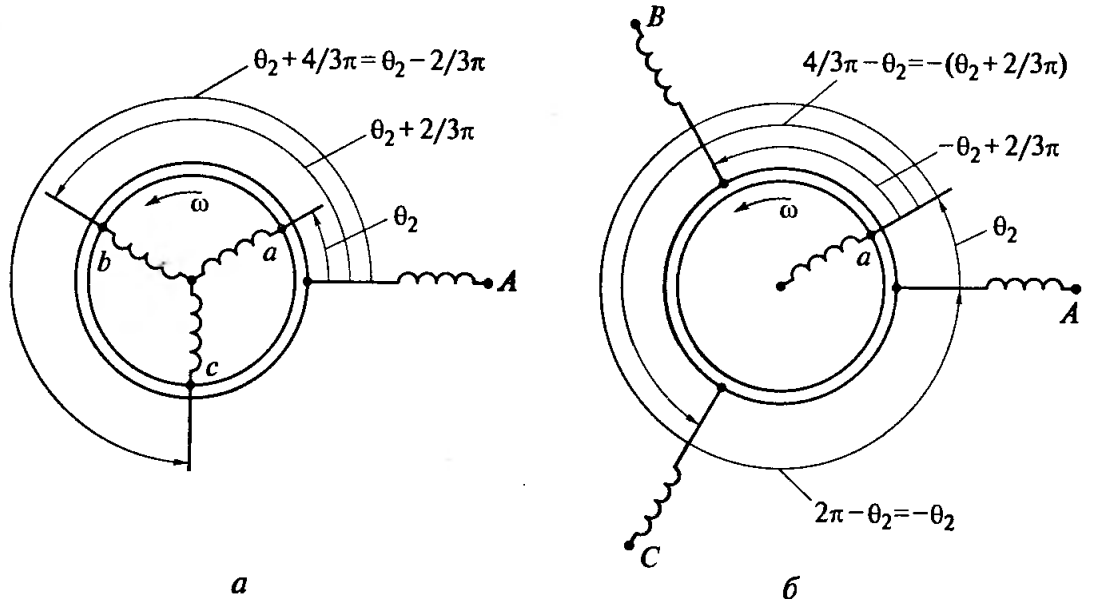
Sinxron tezlik bilan aylanuvchan koordinata tizimida yozilgan (1.23) tenglamalarda tashqi ta'sir ko'rsatuvchi kattaliklar statordagi kuchlanish vektori $\tilde{U}_1$ va ushbu kuchlanish chastotasi ω_{0el} hisoblanadi. Agar faza rotorli dvigatel qaralayotgan bo'lsa, tashqi ta'sir ko'rsatuvchi kattaliklar sifatida rotor kuchlanishi vektori $\tilde{U}_2$ va uning chastotasi ω_r ni qarashimiz mumkin. Agar rotor zanjiri qisqa tutashtirilgan bo'lsa yoki qo'shimcha qarshilik ulangan bo'lsa, unda rotor chastotasi ta'minot kuchlanishi chastotasi va dvigatel tezligining funktsiyasi hisoblanadi $\omega_r = \omega_{0el} - r_p \omega_{0el}$. Matematik ifodalanish talablariga bog'liq ravishda chiquvchi kattalik sifatida toklarning va oqim ilashuvlarning vektorlarini qarash mumkin.

1.1,a rasmda dvigatelning juft qutblar soni $p_n = 1$ va rotorning fazoviy burilish burchagining oniy qiymati θ_2 bo'lganida stator A chulg'aming va rotorning a, b, c , chulg'amlarining o'zaro joylashuvi ko'rsatilgan. Burilish burchagini soat millariga qarshi yo'nalishda hisoblab, rotor faza toklarining statorning A chulg'amidagi oqim ilashuviga ta'sirini harakterlovchi induktivlik koeffitsientini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$L_{Aa} = L_{mf} \cos \theta_2;$$

$$L_{Ab} = L_{mf} \cos(\theta_2 + 2\pi/3);$$

$$L_{Ac} = L_{mf} \cos(\theta_2 + 4\pi/3) = L_{mf} \cos(\theta_2 - 2\pi/3).$$



3.1-rasm. Asinxron dvigatel stator va rotor chulg`amlarining o'zaro bog'lanishlari: a-stator chulg`ami va rotor chulg`amlari; b-rotor chulg`ami va stator chulg`amlari

Stator faza toklarining rotorini a chulg`amidagi oqim ilashuviga ta'sirini harakterlovchi induktivlik koeffitsientini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$L_{aA} = L_{mf} \cos(2\pi - \theta_2) = L_{mf} \cos \theta_2;$$

$$L_{aB} = L_{mf} \cos(2\pi/3 - \theta_2) = L_{mf} \cos(\theta_2 - 2\pi/3); \quad (3.14)$$

$$L_{aC} = L_{mf} (4\pi/3 - \theta_2) = L_{mf} \cos(\theta_2 + 2\pi/3).$$

Yuqoridagilarni hisobga olgan holda stator A fazasi va rotor a fazasi uchun elektromagnit jarayonlarni tavsiflovchi tenglamalar tizimi quyidagi ko'rinishga keladi:

$$u_{1A} = R_1 i_{1A} + \frac{d\Psi \Psi_{1A}}{dt}; \quad (3.15)$$

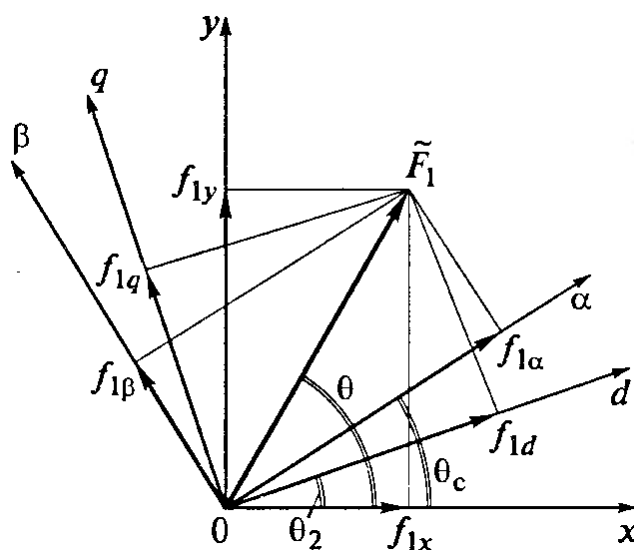
$$u_{2a} = R_2 i_{2a} + \frac{d\Psi \Psi_{2a}}{dt} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \Psi \Psi_{1A} = & (L_{mf} + L_{1\sigma}) i_{1A} - 0,5 L_{mf} i_{1B} - 0,5 L_{mf} i_{1C} + \\ & + L_{mf} [\cos \theta_2 i_{2a} + \cos(\theta_2 + 2\pi/3) i_{2b} + \cos(\theta_2 - 2\pi/3) i_{2c}]; \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\Psi \Psi_{2a} = (L_{mf} + L_{2\sigma}) i_{2a} - 0,5 L_{mf} i_{2b} - 0,5 L_{mf} i_{2c} +$$

$$+L_{mf}[\cos\theta_2 i_{1A} + \cos(\theta_2 - 2\pi/3) i_{1B} + \cos(\theta_2 + 2\pi/3) i_{1C}]. \quad (3.18)$$

Statorli koordinata tizimidan tashqari dvigatelning rotor chulg`ami bilan bog`langan va unga nisbatan qo`zg`almas turgan $d - q$ rotorli koordinata tizimini ham qo`llashimiz mumkin. Bu tizim elektrik fazoda rotor bilan birga aylanadi. Ushbu koordinata tizimida qaralayotgan fazoviy vektorlarni  $d - q$  indeks bilan belgilaymiz, mos ravishda bunday indekslar bilan fazoviy vektorlarni  $d$  va  $q$  o`qlaridagi proektsiyalarini ham belgilaymiz. Rortorga tegishli kattaliklarni 2 indeksi bilan yozish qabul qilinganligi uchun rotorli koordinata tizimi haqiqiy sonlar o`qi  $d$  va statorli koordinata tizimidagi qo`zg`almas  $x$  o`qi orasidagi burchakni θ_2 deb belgilaymiz. Rotorning fizik fazodagi burilishi va elektrik fazodagi burilishi orasidagi farqni nazardan chetga chiqarmaslik kerak. 1.5-rasmda belgilangan barcha burchaklarning o`lchov birligi el.rad. Rasmda tasvirlangan fizik fazoda o`qlarning joylashuv holatlari faqatgina motorning juft qutblar soni $r_p = 1$ teng bo`lganiga mos keladi.



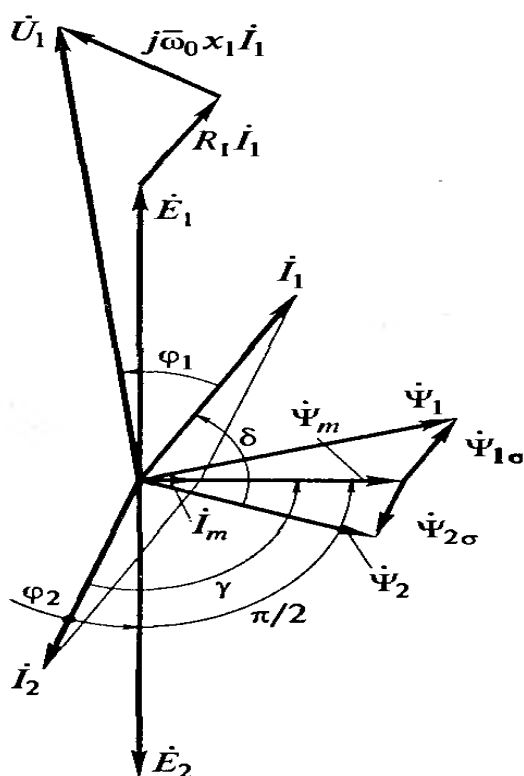
3.2-rasm. Turli koordinata tizimlarida fazoviy vektorning joylashuvi.

Rasmda shuningdek $x - y$ va $d - q$ koordinatalar tizimlariga nisbatan ixtiyoriy yo`naltirilgan yana bir umumiy  $\alpha - \beta$  koordinata tizimi tasvirlangan. Bunday keyingi bayonlarimizda ushbu koordinata tizimi elektrik fazoda ta`minot manbai kuchlanishining burchak chastotasiga teng bo`lgan sinxron burchak tezlik

bilan aylanadigan tizim deb qaraymiz. Statorli koordinata tizimiga nisbatan ushbu tizimning burilish burchagining oniy qiymati θ_s deb belgilangan.

Asinxron motorlarda ideal salt ishlash rejimidan tashqari qolgan barcha rejimlarda ta'minot kuchlanishining burchak chastotasi ω_{0el} va elektrik fazodagi rotorning tezligi $r_p\omega$ turlicha bo'ladi. Statoridagi kuchlanishning burchak chastotasi bilan elektrik fazodagi dvigatelning tezligi orasidagi farq $\omega_{0el} - r_p\omega$ rotor EYuKining burchak chastotasini belgilaydi va bu farq elektr yuritmani matematik ifodalash jarayonida hisobga olinishi kerak.

Fazoviy vektorning o'ziga xos xususiyatiga oid xulosa o'rinda aytishimiz mumkin: vaqtning har bir momentidagi fazoviy vektorning chulg'am o'qidagi proektsiyasi ushbu chulg'am kattaliklarning oniy qiymatlariga teng bo'ladi.



3.3-rasm. Asinxron motorning dvigatel rejimidagi vektor diagrammasi

Motor rejimi uchun qurilgan vektor diagramma 3.3-rasmda ko'rsatilgan. Rasmda abstsissa o'qi bo'ylab magnitlovchi tok vektori $\vec{I}_m$ va u bilan faza jihatdan mos tushuvchi havo oralig'idagi magnit oqimining oqim ilashuvu vektorlari

$\dot{\Psi}_m = L_m \dot{I}_m$ yo'nalgan. Stator va rotorning to'la oqim ilashuvlari (mos ravishdat $\dot{\Psi}_1$ va $\dot{\Psi}_2$) $\dot{\Psi}_m$ oqim ilashuvidan farq qiladi. Ushbu farqning qiymati $\dot{\Psi}_{1\sigma} = L_{1\sigma} \dot{I}_1$ va $\dot{\Psi}_{2\sigma} = L_{2\sigma} \dot{I}_2$ sochilish oqimlaridan oqim ilashuvi qiymatiga teng bo'ladi. Stator EYuKining vektori $\dot{E}_1$, $\dot{\Psi}_m$ vektorga nisbatan $\pi/2$ burchakga oldinga siljishgan bo'ladi. Rotor EYuKi vektori $\dot{E}_2 = -\dot{E}_1$ kabi aniqlanadi.

Ta'minot kuchlanishing vektorini qurish uchun kuchlanish stator EYuKidan stator tokining aktiv qarshilikdagi va stator faza sochilishlari induktiv qarshiliklaridagi kuchlanish tushuvlari qiymatigacha katta bo'lishini nazarda tutish kerak. O'zgaruvchilarning qiymatlari ta'minot kuchlanishi $\dot{U}_1$ va uning chastotasi aniq bo'lgan holda almashtirish sxemasi bo'yicha, shuningdek vektor diagrammasini qurish uchun tanlangan va dvigatelning yuklamasiga bog'liq bo'lgan rotor EYuKining nisbiy chastotasi $\bar{\omega}_r$ orqali hisoblab topiladi. Stator va rotor tokini hisoblash uchun quyidagi ko'rinishda yozilgan (3.6) va (3.8) ifodalardan foydalanishimiz mumkin:

$$\dot{U}_1 = (R_1 + j\bar{\omega}_0 x_1) \dot{I}_1 + j\bar{\omega}_0 x_m \dot{I}_2; \quad (3.19)$$

$$0 = j\bar{\omega}_0 x_m \dot{I}_1 + (\bar{\omega}_0 R_2 / \bar{\omega}_p + j\bar{\omega}_0 x_2) \dot{I}_2,$$

bu yerda

$$\dot{I}_1 = \frac{\bar{\omega}_0 (R_2 / \bar{\omega}_p + jx_2)}{A(\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_p) + jB(\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_p)} \dot{U}_1; \quad (3.20)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{-j\bar{\omega}_0 x_m}{A(\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_p) + jB(\bar{\omega}_0, \bar{\omega}_p)}$$

NAZORAT SAVOLLARI:

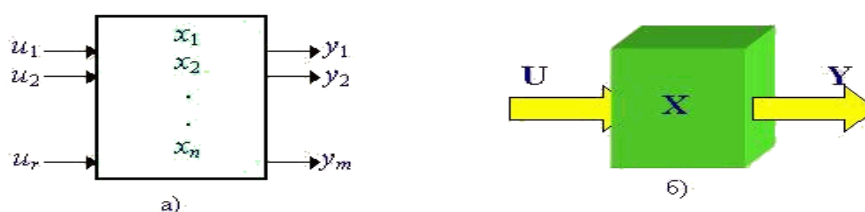
1. Elektr miqdorlarni vektorli ifodalash nima?
2. fazoviy vektor moduli nima?
3. Simmetrik va nosimmetrik rejim nima?
4. Induktivlik matritsasi nima?

3.2. Matritsali tahlil elementlari. Elektr mashinalari va transformatorlarning matritsali tenglamalari.

Kalit so'zlar: barqaror ish rejimi, dinamik ish rejimi, elektromexanik tizim, vektor-matritsali model, kiruvchi ta'sirlar, Chiqish o'zgaruvchilari, Oraliq o'zgaruvchilar, tizimning holat matritsasi, chiqish matritsasi, Kirish va chiqish holat vektorlari, Kuch transformatorining matritsaviy modeli, motor uzatish funksiyasi

Elektromexanik tizimlarni barqaror va dinamik ish rejimlarini tadqiq qilishda vektor-matritsali modellardan keng foydalaniladi. Ayniqsa, elektromexanik tizimlarni boshqaruvini amalga oshirishda ushbu modellar imkoniyatlaridan foydalanish maqsadga muvofiq bo'ladi [21, 22].

Elektromexanik tizimlarning vektor-matritsali modeli. Dinamik tizimlarning vektor-matritsali modelini olish uchun tadqiq qilinayotgan tizim quyidagi "qora yashik" ko'rinishida tasvirlanadi.



3.4-rasm. Dinamik tizimlarni skalyar (a) va vektor (b) "qora yashik" ko'rinishida tasvirlanishi.

Tizimni tavsiflovchi barcha o'zgaruvchilarni quyidagi uch guruhga bo'lish mumkin.

1. *Kiruvchi o'zgaruvchilari yoki kiruvchi ta'sirlar.* Bu o'zgaruvchilar kirish vektorini hosil qiladi.

$$U^T = [u_1, u_2, u_3, \dots, u_r] \quad r\text{-kirishlar soni}$$

2. *Chiqish o'zgaruvchilari.* Kiruvchi o'zgaruvchilarga aks ta'sirni tavsiflovchi o'zgaruvchilar bo'lib chiqish vektorini hosil qiladi.

$$Y^T = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_m] \quad m\text{-chiqishlar soni}$$

3. *Oraliq o'zgaruvchilar* bo'lib tizimning ichki holatini tavsiflovchi o'zgaruvchilar hisoblanadi.

$$X^T = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] \quad n\text{-holatni tavsiflovchi o'zgaruvchilar soni.}$$

Uzluksiz vaqtdagi vektor-matritsaviy modellar. Dinamik tizim umumiy holda quyidagi ikkita matritsaviy tenglama orqali yozish mumkin:

$$\dot{x}(t) = F[x(t), u(t), t], \quad (3.21)$$

$$y(t) = Q[x(t), u(t), t] \quad (3.22)$$

bu yerda F – tizimning n -o'lchovli vektor-funksiyasi; Q – chiqishning m -o'lchovli vektor-funksiyasi.

(3.21) –tenglama tizimining holat tenglamasi deyiladi. (3.22) –tenglama esa, chiqish tenglamasi deyiladi.

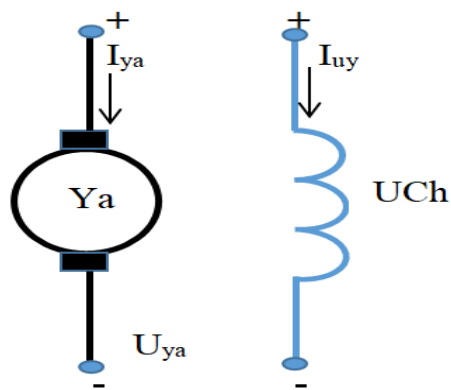
Ayrim hollarda dinamik tizimlarning vektor-matritsaviy tenglamasi quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(t)x + B(t)u, \\ y &= C(t)x + D(t)u, \end{aligned} \quad (3.23)$$

Barqaror ish rejimlari uchun esa, quyidagi tenglamalarni yozish mumkin bo'ladi:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx + Du, \end{aligned} \quad (3.24)$$

Bu yerda A - $n \times n$ - o'lchovli funksional matritsa bo'lib *tizimning holat matritsasi* deyiladi; B - $n \times r$ - o'lchovli funksional matritsa bo'lib *tizimning boshqaruv (kirish) matritsasi* deyiladi; C - $m \times n$ - o'lchovli funksional matritsa bo'lib *tizimning holat bo'yicha chiqish matritsasi* deyiladi; D - $m \times r$ - o'lchovli funksional matritsa bo'lib *tizimning boshqaruv bo'yicha chiqish matritsasi* deyiladi.



3.5-rasm. Mustaqil uygʻotiladigan oʻzgarmas tok motori sxemasi

3.5-rasmda keltirilgan mustaqil uygʻotiladigan oʻzgarmas tok motorini differensial tenglamalari yozib uni vektor-matritsa modeli koʻrinishiga keltiramiz.

Yakor zanjiri tenglamasi:

$$U_y(t) = R_y i(t) + L_y \frac{di(t)}{dt} + E \quad (3.25)$$

Mexanik qismning tenglamasi:

$$M - M_c = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad \frac{d\varphi}{dt} = \Omega \quad (3.26)$$

Bu yerda elektromagnit moment quyidagicha aniqlanadi:

$$M = k\Phi \Omega i = C \Omega i \quad (3.27)$$

Yakor zanjiridagi EYUK:

$$E = k\Phi \Omega = C \Omega \quad (3.28)$$

Kirish va chiqish holat vektorlarini quyidagi koʻrinishda qabul qilamiz:

$$\mathbf{x}^T = [\Omega(t) \quad i(t) \quad \varphi(t)] \quad \mathbf{u}^T = [U_y \quad M_q] \quad \mathbf{y} = [\Omega(t)] \quad (3.29)$$

Bu tenglamalarni quyidagi vektor-matritsa koʻrinishida yozish mumkin:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Omega} \\ \dot{i} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{C}{J} & 0 \\ -\frac{C}{L} & -\frac{R}{L} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Omega \\ i \\ \varphi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{J} \\ -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_y \\ M_q \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Bu yerda () tenglamaning koeffitsientlari quyidagilarga teng boʻladi:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{C}{J} & 0 \\ -\frac{C}{L} & -\frac{R}{L} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{J} \\ -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (3.31)$$

Kuch transformatorining matritsaviy modeli. Uch fazali transformatorlarni o‘zaro induksiya orqali bog‘langan chulg‘amlar tizimi ko‘rinishidagi tenglamalarini olish uchun [22] manbada keltirilgan usuldan foydalanamiz. Faza chulg‘amlarining (xususiy va o‘zaro) induktivlikka ega bo‘lgan kuch transformatorida o‘tish jarayonlarini tavsiflovchi tenglamalar [23, 24] differensial ko‘rinishda quyidagicha 2 ta shaklda bo‘ladi.

1). CHulg‘amlar orasidagi elektromagnit bog‘lanishlar tenglamalari (ulanish sxemasini e‘tiborga olmagan holada) quyidagi ko‘rinishda bo‘ladi:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{B1} \\ V_{C1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_{A1} & & \\ & L_{B1} & \\ & & L_{C1} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} j_{A1} \\ j_{B1} \\ j_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{A12} & & \\ & L_{B12} & \\ & & L_{C12} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} j_{A2} \\ j_{B2} \\ j_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{A1} & & \\ & r_{B1} & \\ & & r_{C1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{A1} \\ j_{B1} \\ j_{C1} \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} V_{A2} \\ V_{B2} \\ V_{C2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_{A21} & & \\ & L_{B21} & \\ & & L_{C21} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} j_{A1} \\ j_{B1} \\ j_{C1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{A2} & & \\ & L_{B2} & \\ & & L_{C2} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} j_{A2} \\ j_{B2} \\ j_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{A2} & & \\ & r_{B2} & \\ & & r_{C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{A2} \\ j_{B2} \\ j_{C2} \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (3.32)$$

2). CHulg‘amlarning elektr bog‘lanishlar tenglamalari:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{B1} \\ V_{C1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{A1} \\ j_{B1} \\ j_{C1} \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} V_{A2} \\ V_{B2} \\ V_{C2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} i_{A2} \\ i_{B2} \\ i_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{A2} \\ j_{B2} \\ j_{C2} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3.33)$$

Tenglamalar birinchi chulg‘am “uchburchak”, ikkinchisi esa, “yulduz” shaklida ulangan deb qabul qilingan holda yozilgan.

Agar faza chulg‘amlarining kuchlanish va toklari uchun quyidagi belgilashlar kiritilsa:

$$[V_1] = \begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{B1} \\ V_{C1} \end{bmatrix}; [V_2] = \begin{bmatrix} V_{A2} \\ V_{B2} \\ V_{C2} \end{bmatrix}; [j_1] = \begin{bmatrix} j_{A1} \\ j_{B1} \\ j_{C1} \end{bmatrix}; [j_2] = \begin{bmatrix} j_{A2} \\ j_{B2} \\ j_{C2} \end{bmatrix} \quad 3.34$$

transformator chulg‘amlari parametrlari ham quyidagicha belgilansa:

$$\begin{aligned}
[L_{11}] &= \begin{bmatrix} L_{A1} & & \\ & L_{B1} & \\ & & L_{C1} \end{bmatrix}; [L_{22}] = \begin{bmatrix} L_{A2} & & \\ & L_{B2} & \\ & & L_{C2} \end{bmatrix}; [L_{12}] = \begin{bmatrix} L_{A12} & & \\ & L_{B12} & \\ & & L_{C12} \end{bmatrix}; \\
[L_{21}] &= \begin{bmatrix} L_{A21} & & \\ & L_{B21} & \\ & & L_{C21} \end{bmatrix}; [r_1] = \begin{bmatrix} r_{A1} & & \\ & r_{B1} & \\ & & r_{C1} \end{bmatrix}; [r_2] = \begin{bmatrix} r_{A2} & & \\ & r_{B2} & \\ & & r_{C2} \end{bmatrix},
\end{aligned} \tag{3.35}$$

Uch fazali transformatorning faza chulgʻamlari orasidagi elektromagnit bogʻlanishlar tenglamalari quyidagi ixchamroq koʻrinishga keladi:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 & \\ & r_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix}. \tag{3.36}$$

Koʻp qutblik uchun umumlashtirilgan uch fazali transformatorga muvofiq keluvchi Shixman formulasi quyidagi koʻrinishga keladi:

$$\begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix}^{(k+1)} = \frac{4}{3} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix}^{(k)} - \frac{1}{3} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix}^{(k-1)} + \frac{2}{3} h \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix}^{(k+1)}. \tag{3.37}$$

tenglamani diskret shaklga keltirish uchun (2.3.) tenglamadan hosila olinadi va (2.4.) tenglamaga qoʻyiladi:

$$\begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix}^{(k+1)} = \frac{4}{3} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix}^{(k)} - \frac{1}{3} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix}^{(k-1)} + \frac{2}{3} h \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}^{(k+1)} - \frac{2}{3} h \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} r_1 & \\ & r_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix}^{(k+1)}, \tag{3.38}$$

(2.5) tenglama $[j]^{(k+1)}$ vektorga nisbatan quyidagi koʻrinishga keladi:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix}^{(k+1)} &= \left(\begin{bmatrix} r_1 & \\ & r_2 \end{bmatrix} + \frac{3}{2h} \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}^{(k+1)} + \frac{2}{h} \left(\begin{bmatrix} r_1 & \\ & r_2 \end{bmatrix} + \frac{3}{2h} \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \right)^{-1} \times \\
&\times \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix}^{(k)} - \frac{1}{2h} \left(\begin{bmatrix} r_1 & \\ & r_2 \end{bmatrix} + \frac{3}{2h} \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix}^{(k-1)}.
\end{aligned} \tag{3.39}$$

(3.39) tenglamani quyidagicha yanada ixchamroq koʻrinishda yozish mumkin boʻladi:

$$\begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_1 \\ j_2 \end{bmatrix}^{(k-1)}, \tag{3.40}$$

yoki yoyilgan holda quyidagi koʻrinishda boʻladi:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} j_{A1} \\ j_{B1} \\ j_{C1} \end{bmatrix}^{(k+1)} &= \begin{bmatrix} y_{A1} & & \\ & y_{B1} & \\ & & y_{C1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{B1} \\ V_{C1} \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} y_{A12} & & \\ & y_{B12} & \\ & & y_{C12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A2} \\ V_{B2} \\ V_{C2} \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} a_{A1} & & \\ & a_{B1} & \\ & & a_{C1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{A1} \\ j_{B1} \\ j_{C1} \end{bmatrix}^{(k)} + \\
&+ \begin{bmatrix} a_{A12} & & \\ & a_{B12} & \\ & & a_{C12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{A2} \\ j_{B2} \\ j_{C2} \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} b_{A1} & & \\ & b_{B1} & \\ & & b_{C1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{A1} \\ j_{B1} \\ j_{C1} \end{bmatrix}^{(k-1)} + \begin{bmatrix} b_{A12} & & \\ & b_{B12} & \\ & & b_{C12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{A2} \\ j_{B2} \\ j_{C2} \end{bmatrix}^{(k-1)} ;
\end{aligned}
\tag{3.41}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} j_{A2} \\ j_{B2} \\ j_{C2} \end{bmatrix}^{(k+1)} &= \begin{bmatrix} y_{A12} & & \\ & y_{B12} & \\ & & y_{C12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{B1} \\ V_{C1} \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} y_{A2} & & \\ & y_{B2} & \\ & & y_{C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A2} \\ V_{B2} \\ V_{C2} \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} a_{A21} & & \\ & a_{B21} & \\ & & a_{C21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{A1} \\ j_{B1} \\ j_{C1} \end{bmatrix}^{(k)} + \\
&+ \begin{bmatrix} a_{A2} & & \\ & a_{B2} & \\ & & a_{C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{A2} \\ j_{B2} \\ j_{C2} \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} b_{A21} & & \\ & b_{B21} & \\ & & b_{C21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{A1} \\ j_{B1} \\ j_{C1} \end{bmatrix}^{(k-1)} + \begin{bmatrix} b_{A2} & & \\ & b_{B2} & \\ & & b_{C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_{A2} \\ j_{B2} \\ j_{C2} \end{bmatrix}^{(k-1)} ,
\end{aligned}$$

Bu yerdan yuqoridagi belgilashlardagi ma'nosi (2.6), (2.7), (2.8) tenglamalarda matritsa koefitsientlarining taqqoslashdan aniq bo'ladi. Chulg'amlardagi (V, j) tok va kuchlanishlardan transformatorning chiqishlaridagi (U, i) tok va kuchlanishlarga o'tish uchun transformatorning (2.2) tenglamasini hisobga olish kerak bo'ladi.

Yuqoridagi $[j_1]$ toklar quyidagi tenglamalar orqali $[i_1]$ toklarga keltiriladi:

$$\begin{bmatrix} j_{A1} \\ j_{B1} \\ j_{C1} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix}. \tag{3.42}$$

Tenglamalarni Gir usulida ikkinchi darajali integrallash uchun (2.9) tenglamada keltirilgan munosabatlardan kelib chiqib, chulg'amlarning ulanish usuli Δ/Y -11 bo'lgan ikki chulg'amli transformatorning diskret tenglamalari quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix}^{(k+1)} &= \begin{bmatrix} y_{A1} + y_{B1} & -y_{B1} & y_{A1} \\ -y_{B1} & y_{B1} + y_{C1} & -y_{C1} \\ -y_{A1} & -y_{C1} & y_{A1} + y_{C1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} y_{A12} & -y_{B12} & 0 \\ 0 & y_{B12} & -y_{C12} \\ -y_{A12} & 0 & y_{C12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix}^{(k+1)} + \\
&+ \frac{1}{3} \begin{bmatrix} a_{A1} + a_{B1} & -a_{B1} & -a_{A1} \\ -a_{B1} & a_{B1} + a_{C1} & -a_{C1} \\ -a_{A1} & -a_{C1} & a_{A1} + a_{C1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} a_{A12} & -a_{B12} & 0 \\ 0 & a_{B12} & -a_{C12} \\ -a_{A12} & 0 & a_{C12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A2} \\ i_{B2} \\ i_{C2} \end{bmatrix}^{(k)} + \\
&+ \frac{1}{3} \begin{bmatrix} b_{A1} + b_{B1} & -b_{B1} & -b_{A1} \\ -b_{B1} & b_{B1} + b_{C1} & -b_{C1} \\ -b_{A1} & -b_{C1} & b_{A1} + b_{C1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix}^{(k-1)} + \begin{bmatrix} b_{A12} & -b_{B12} & 0 \\ 0 & b_{B12} & -b_{C12} \\ -b_{A12} & 0 & b_{C12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A2} \\ i_{B2} \\ i_{C2} \end{bmatrix}^{(k-1)} ;
\end{aligned} \tag{3.43}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} i_{A2} \\ i_{B2} \\ i_{C2} \end{bmatrix}^{(k+1)} &= \begin{bmatrix} y_{A12} & 0 & -y_{A12} \\ -y_{B12} & y_{B12} & 0 \\ 0 & -y_{C12} & y_{C12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} y_{A2} & 0 & 0 \\ 0 & y_{B2} & 0 \\ 0 & 0 & y_{C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A2} \\ U_{B2} \\ U_{C2} \end{bmatrix}^{(k+1)} + \\
&+ \frac{1}{3} \begin{bmatrix} a_{A21} & 0 & -a_{A21} \\ -a_{B21} & a_{B21} & 0 \\ 0 & -a_{C21} & a_{C21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} a_{A2} & 0 & 0 \\ 0 & a_{B2} & 0 \\ 0 & 0 & a_{C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A2} \\ i_{B2} \\ i_{C2} \end{bmatrix}^{(k)} + \\
&+ \frac{1}{3} \begin{bmatrix} b_{A21} & 0 & -b_{A21} \\ -b_{B21} & b_{B21} & 0 \\ 0 & -b_{C21} & b_{C21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix}^{(k-1)} + \begin{bmatrix} b_{A2} & 0 & 0 \\ 0 & b_{B2} & 0 \\ 0 & 0 & b_{C2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A2} \\ i_{B2} \\ i_{C2} \end{bmatrix}^{(k-1)} ,
\end{aligned} \tag{3.44}$$

yoki, ixchamroq ko‘rinishda:

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} y_{TD} & y_{TD} \\ y_{TD} & y_{TD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}^{(k+1)} + \begin{bmatrix} a_{TD} & a_{TD} \\ a_{TD} & a_{TD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} b_{TD} & b_{TD} \\ b_{TD} & b_{TD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}^{(k-1)} . \tag{3.45}$$

Ikkinchi darajali yaqqolmas Gir usuli formulalaridan foydalanib olingan uch fazai ikki chulg‘amli kuch transformatorining diskret tenglamasi transformator chulg‘amlaridagi tok va kuchlanishlarni sonli integrallashni oldingi qadamidagi qiymatlaridan foydalanib, keyingi qadamidagi qiymatini aniqlash imkonini beradi.

Uch fazali asinxron motorlarni matematik ifodalashda ular parametrlarini oniy qiymatlari bilan emas, ular hosil qiluvchi vektorlar bilan ifodalash ancha qulaydir.

Agar, toklarning oniy qiymatlari i_a , i_b , i_c , teng bo‘lsa ularni natijalovchi vektori quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$\bar{i} = 2/3(\bar{a}^0 \cdot ia + \bar{a} \cdot ib + \bar{a}^2 \cdot ic) = 2/3(ia + \bar{a} \cdot ib + \bar{a}^2 \cdot ic), \tag{3.46}$$

Bu yerda $\bar{a}^0 = e^{j0} = 1; \bar{a} = e^{j2\pi/3}; \bar{a}^2 = e^{j4\pi/3}$.

SHu tartibda kuchlanish vektori aniqlanadi:

$$\bar{U} = 2/3(\bar{a}^0 \cdot Ua + \bar{a} \cdot Ub + \bar{a}^2 \cdot Uc), \quad (3.47)$$

SHu tartibda oqim ilashuvi vektori aniqlanadi:

$$\bar{\Psi} = 2/3(\bar{a}^0 \cdot \varphi a + \bar{a} \cdot \varphi b + \bar{a}^2 \cdot \varphi c). \quad (3.48)$$

Natijalovchi vektorlar ifodalaridan foydalanib, () tenglamani birta differensial tenglama ko‘rinishida yozishimiz mumkin. Vektorlarni qo‘shib quyidagi ifodani olamiz:

$$\begin{aligned} 2/3(\bar{a}^0 \cdot U1a + \bar{a} \cdot U1b + \bar{a}^2 \cdot U1c) = 2/3(i1a + \bar{a} \cdot i1b + \bar{a}^2 \cdot i1c)R1 + \\ + 2/3 \cdot \partial / \partial t (\bar{a}^0 \cdot \Psi1a + \bar{a} \cdot \Psi1b + \bar{a}^2 \cdot \Psi1c), \end{aligned} \quad (3.49)$$

YOki vektor ko‘rinishida

$$\bar{U}1 = i1R1 + \partial \bar{\Psi}1 / \partial t. \quad (3.50)$$

SHu tartibda rotor kuchlanishi vektorini ifodasi:

$$\bar{U}2 = i2R2 + \partial \bar{\Psi}2 / \partial t. \quad (3.51)$$

(3.50) va (3.51) tenglamalarda vektorlar statora va rotora koordinata tizimlarida ifodalangan. Bu ifodalarni birgalikda yozish uchun bir koordinatalar tizimiga keltirish kerak bo‘ladi.

Asinxron motordagi o‘tish jarayonlarini tok chastotasi va kuchlanishini boshqarib o‘rganishda aylanuvchan magnit maydonga sinxronlashgan koordinatalar tizimini joriy etish maqsadga muvofiq. Bunda quyidagi tenglik qabul qilinadi:

$$\omega_0' = \omega_1 = 2\pi \cdot f_1, \quad (3.52)$$

bu yerda f_1 – stator kuchlanishi chastotasi, Gs

ω_1 – stator kuchlanishi burchak chastotasi, rad/s.

Bu koordinata tizimida ko‘rilayotgan holat uchun quyidagilarni yozish mumkin:

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = \bar{i}_1 \cdot R_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j \cdot \omega_1 \cdot \bar{\Psi}_1; \\ \bar{U}_2 = \bar{i}'_2 \cdot R'_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j \cdot s \cdot \omega_1 \cdot \bar{\Psi}_2; \end{cases} \quad (3.53)$$

Bu yerda S – elektr motor sirpanishi:

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_1 - p \cdot \omega}{\omega_1}, \quad (3.54)$$

($\omega_0 = \omega_0' / p$ – magnit maydonni sinxron burchak tezligi).

Oqim ilashuvi ifodalari tok va induktivlik orqali yoziladi:

$$\begin{cases} \bar{\Psi}_1 = \bar{i}_1 \cdot L_1 + \bar{i}'_2 \cdot L_m \\ \bar{\Psi}_2 = \bar{i}'_2 \cdot L'_2 + \bar{i}_1 \cdot L_m \end{cases} \quad (3.55)$$

Elektromagnit momentni ifodalash uchun quyidagi $\Psi_1 \times i_1$ vektor ko'paytirishdan foydalaniladi:

$$\bar{M} = \frac{3}{2} p_n (\bar{\Psi}_1 \times \bar{i}_1), \quad (3.56)$$

Yoki $\Psi_2 \times i'_2$, orqali

$$\bar{M} = -\frac{3}{2} p_n (\bar{\Psi}_2 \times \bar{i}'_2). \quad (3.57)$$

(3.55) ifodani (3.56) va (3.57) ifodalar orqali yozadigan bo'lsak:

$$\bar{M} = \frac{3}{2} p_n (\bar{i}_1 \cdot L_1 + \bar{i}'_2 \cdot L_m) \times \bar{i}_1 = \frac{3}{2} p_n L_m (\bar{i}'_2 \times \bar{i}_1), \quad (3.58)$$

$$\bar{M} = -\frac{3}{2} p_n (\bar{i}_1 \cdot L_m + \bar{i}'_2 \cdot L'_2) \times \bar{i}_2 = -\frac{3}{2} p_n L_m (\bar{i}_1 \times \bar{i}_2) \quad (3.59)$$

Asinxron motordagi o'tish jarayonlarni ifodalash uchun qarshilik momenti ifodasini kiritamiz:

$$M - Mc = J \frac{\partial \omega}{\partial t}, \quad (3.60)$$

Asinxron motorni qo'zg'olmas koordinalar tizimida ifodalasak tenglamalar quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\begin{cases} \bar{U}_1 = U_{1\alpha} + jU_{1\beta}; \\ \bar{i}_1 = i_{1\alpha} + ji_{1\beta}; \\ \bar{\Psi}_1 = \Psi_{1\alpha} + j\Psi_{1\beta}; \end{cases} \begin{cases} \bar{U}'_2 = U'_{2\alpha} + jU'_{2\beta}; \\ \bar{i}'_2 = i'_{2\alpha} + ji'_{2\beta}; \\ \bar{\Psi}'_2 = \Psi'_{2\alpha} + j\Psi'_{2\beta}; \end{cases} \quad (3.61)$$

$U_{1\beta 0} = 0$ deb belgilab, quyidagilarga ega bo'lamiz:

$$U_{1\alpha} = \frac{\partial \Psi_{1\alpha}}{\partial t} - \omega_1 \cdot \Psi_{1\beta}, \quad (3.62)$$

$$0 = \frac{\partial \Psi_{1\beta}}{\partial t} + \omega_1 \cdot \Psi_{1\alpha}, \quad (3.63)$$

$$U'_{2\alpha} = i'_{2\alpha} \cdot R'_2 + \frac{\partial \Psi_{2\alpha}}{\partial t} - S \cdot \omega_1 \cdot \Psi_{2\beta}, \quad (3.64)$$

$$U'_{2\beta} = i'_{2\beta} \cdot R'_2 + \frac{\partial \Psi_{2\beta}}{\partial t} - S \cdot \omega_1 \cdot \Psi_{2\alpha}. \quad (3.65)$$

Elektromagnit momentni tok va oqim ilashuvi vektorlari orqali ifodalasak, ifoda quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$M = \frac{3}{2} p_n (\Psi_{1\alpha} + \Psi_{1\beta}) \times (i_{1\alpha} + i_{1\beta}) \quad (3.66)$$

Vektor ko'paytirish qonunlarini qo'llab quyidagi ifodani olamiz:

$$M = \frac{3}{2} p_n (\Psi_{1\alpha} \cdot i_{1\beta} - \Psi_{1\beta} \cdot i_{1\alpha}), \quad (3.67)$$

$$\Psi_{1\alpha} = i_{1\alpha} \cdot L_1 + i'_{2\alpha} \cdot L_m; \quad (3.68)$$

$$\Psi_{1\beta} = i_{1\beta} \cdot L_1 + i'_{2\beta} \cdot L_m. \quad (3.69)$$

SHu tartibda quyidagi ifodalarni ham olamiz:

$$M = \frac{3}{2} p_n (\Psi_{2\alpha} \cdot i'_{2\beta} - \Psi_{2\beta} \cdot i'_{2\alpha}), \quad (3.70)$$

$$\Psi_{2\alpha} = i_{1\alpha} \cdot L_m + i'_{2\alpha} \cdot L'_2; \quad (3.71)$$

$$\Psi_{2\beta} = i_{1\beta} \cdot L_m + i'_{2\beta} \cdot L'_2. \quad (3.72)$$

Rotor toki tashkil etuvchilarini oqim ilashuvi orqali quyidagicha ifodalaymiz:

$$\begin{cases} i'_{2\alpha} = \frac{1}{L''_2} (\Psi_{2\alpha} - k_1 \cdot \Psi_{1\alpha}) \\ i'_{2\beta} = \frac{1}{L''_2} (\Psi_{2\beta} - k_1 \cdot \Psi_{1\beta}) \end{cases}, \quad (3.73)$$

Bu yerda k_1 –statorni elektromagnit bog'liqlik koeffitsienti,

$$k_1 = \frac{L_m}{L_1}, \quad (3.74)$$

$$L''_2 = L'_2 - \frac{L_m}{L_1} \approx L_{1\sigma} + L_{2\sigma}, \quad (3.75)$$

Bu yerda L_1, L'_2 – stator va rotor fazalari to'la ekvivalent induktivligi;

$L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – maydon sochilishi induktivligi;

L_m – asosiy magnit oqim induktivligi;

$$L_m = 3/2 \cdot L_{12}, \quad (3.76)$$

bu yerda L_{12} – stator va rotor chulg‘amlari orasidagi maksimal o‘zaro induktivlik.

Motor uzatish funksiyasini aniqlash uchun moment ifodasini quyidagi shaklga keltiramiz:

$$M = -\frac{3}{2} p_n \cdot k_1 \cdot \bar{\Psi}_1 \times \bar{i}'_2 \quad (3.77)$$

$$\text{yoki } M = -\frac{3}{2} p_n \cdot k_1 (\Psi_{1\alpha} \cdot i'_{2\beta} - \Psi_{1\beta} \cdot i'_{2\alpha}). \quad (3.78)$$

Bundan quyidagi ifodani yozish mumkin:

$$\frac{U_{1\alpha}}{\omega_1} = -\Psi_{1\beta} = \text{const}; \Psi_{1\alpha} = 0. \quad (3.79)$$

Rotori qisqa tutashgan asinxron motor uchun $U'_{2\alpha} = U'_{2\beta} = 0$ deb hisoblab quyidagi ifodalarni yozamiz:

$$0 = i'_{2\alpha} \cdot R'_2 + L''_2 \frac{\partial i'_{2\alpha}}{\partial t} - S \cdot \omega_1 \cdot L''_2 \cdot i'_{2\beta} - k_1 \cdot S \cdot \omega_1 \cdot \Psi_{1\beta}, \quad (3.80)$$

$$0 = i'_{2\beta} \cdot R'_2 + L''_2 \frac{\partial i'_{2\beta}}{\partial t} - S \cdot \omega_1 \cdot L''_2 \cdot i'_{2\alpha}, \quad (3.81)$$

$$M = \frac{3}{2} p_n \cdot k_1 \cdot \Psi_{1\beta} i'_{2\alpha}. \quad (3.82)$$

Asinxron mashinalarni 2.5 paragrafda olingan (2.89) tenglamani elektr mashinalar toklari orqali ifodalab matritsa ko‘rinishida olamiz.

$$\left. \begin{aligned} u_{s\alpha} &= i_{s\alpha} R_s + L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + M \frac{di_{r\alpha}}{dt}; \\ u_{s\beta} &= i_{s\beta} R_s + L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + M \frac{di_{r\beta}}{dt}; \\ 0 &= i_{r\alpha} R_r + L_r \frac{di_{r\alpha}}{dt} + M \frac{di_{s\alpha}}{dt} + p\nu(L_r i_{r\beta} + L_0 i_{s\beta}); \\ 0 &= i_{r\beta} R_r + L_r \frac{di_{r\beta}}{dt} + M \frac{di_{s\beta}}{dt} - p\nu(L_r i_{r\alpha} + L_0 i_{s\alpha}); \end{aligned} \right\} \quad (3.83)$$

(3.83) differensial tenglamani matritsa ko‘rinishida ifodalaymiz:

$$\begin{pmatrix} u_\alpha^s \\ u_\alpha^r \\ u_\beta^r \\ u_\beta^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_\alpha^s + \frac{d}{dt} L_\alpha^s & \frac{d}{dt} M & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt} M & r_\alpha^r + \frac{d}{dt} L_\alpha^r & L_\alpha^r \omega_r & M \omega_r \\ -M \omega_r & -L_\alpha^r \omega & r_\beta^r + \frac{d}{dt} L_\beta^r & \frac{d}{dt} M \\ 0 & 0 & \frac{d}{dt} M & r_\beta^s + \frac{d}{dt} L_\beta^s \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_\alpha^s \\ i_\alpha^r \\ i_\beta^r \\ i_\beta^s \end{pmatrix} \quad (3.84)$$

YUqoridagi vektor-matritsa ko‘rinishidagi differensial tenglamalarni elektr mashinalarni analitik tadqiq qilishda va kompyuterda modellashtirishda foydalaniladi.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Motorning barqaror va dinamik ish rejimlari nima?
2. Elektromexanik tizimlarni vektor-matritsali modeli nima?
3. Tizimning kiruvchi ta’sirlari nima?
4. Nizimning chiqish va oraliq o‘zgaruvchilari nimalar?
5. Kuch transformatorining matritsaviy modeli nima?

3.3. Tenzor algebra va tenzor tahlil to‘g‘risida umumiy ma’lumot.

Kalit so‘zlar: *tenzor, tenzor xossalari, chiziqli algebra, tenzorlar hisobi, tenzorlar analizi, 2-rang tenzor, 3- rang tenzor, R- rang tenzor, invariant tenzorlar Tenzorlarni qo‘shish, tenzorlarni ko‘paytirish, tenzorni yig‘ishtirish, simmetrik tenzorlar.*

Matematikaning tenzorlar va ular ustida bajariladigan amallarni, tenzor xossalari chiziqli algebra hamda matematik analiz vositalari bilan o‘rganuvchi bo‘limiga Tenzorlar hisobi deyiladi. Tenzorlar hisobi vektor hisobi bilan matritsalar nazariyasining taraqqiyoti va umumlashishi natijasida vujudga kelgan bo‘lib, mexanika, elektrodinamika kabi fanlarda keng tatbiq etiladi [8].

Tenzor tabiatli miqdor koordinatalarning har bir tizimida bir necha son bilan aniqlanadi. Tizim o‘zgarishi bilan bu sonlar ham o‘zgaradi va fizik hodisa yoki

ob'jektning o'zini ifodalovchi sonlardan tashqari shunday son — miqdorlar vujudga keladiki, ular shu ob'jekt uchun tasodifiy rol o'ynaydi. Tenzorlar hisobida ana shu miqdorlar ta'siridan qutulish yo'llari ko'rsatiladi. Tenzorlar hisobi ham vektorlar hisobi kabi koordinatalar tizimini tanlashdan ozod qiluvchi matematik apparatdan iborat. Biror tizimda berilgan tenzor komponent (tuzuvchi) lari istalgan boshqa tizimda ham aniqlangan bo'ladi. Tenzorlar ustida hozirgacha qaralgan amallar algebraik amallar bo'lib, tenzorlar analizi (maydoni)da esa, o'zgaruvchan tenzorlar (hosila, xususiy hosila, differensial, integral, kovariant hosila, kovariant differensial) qoraladi. Tenzorlar hisobining bu bo'limi matematika, fizikaning juda ko'p masalalarida muhim tatbiqiy amaliy tushunchalarni vujudga keltirish imkonini beradi.

Tenzorlar hisobi 19-asrda differensial geometriya, fizika ehtiyojlari natijasida vujudga kelgan differensial kvadratik formalar nazariyasi asosida yaratilgan. Shuningdek, Tenzorlar hisobining paydo bo'lishida sirtlar va ko'p o'lchovli fazolar geometriyasidagi izlanishlar juda muhim bo'ldi.

Tenzor (lot. *tensus* — kuchlanish, taranglash) — vektor tushunchasini umumlashtirib, bir necha ma'noda qo'llanib kelinayotgan matematik atama. Bu atama tenzorlar hisobida koordinatalarning bir tizimidan ikkinchi tizimiga o'tganda maxsus qonun bo'yicha o'zgaradigan miqdor (kattalik)larni bildiradi. Mas., tutash muhitlar mexanikasida qayishqoq (egiluvchan) jismning holatini ifodalovchi miqdor (deformatsiya tenzori) yoki qattiq jism massasining olingan nuqtaga nisbatan taqsimlanishini ifodalovchi miqdor (inersiya tenzori), shuningdek, tutash jismning biror nuqtasida kuchlanishlarni ifodalovchi miqdorlar (kuchlanishlar tenzori).

Shunday fizik jarayonlar borki ulardagi tekshirilayotgan obyektning harakteristikalari tenzor tushunchasiga olib keladi. Ravshanki obyektning harakteristikasi invariantlik xususiyatga ega bo'lishi kerak, ya'ni koordinatalar tizimini tanlashga bog'liq bo'lmasligi lozim. Fizikadagi skalyar miqdorlar turkumiga kiruvchi massa, zaryad va h.k. lar invariantligi o'z-o'zidan ravshan.

Tezlik, tezlanish kabi miqdorlar vektor kattaliklar bolib, koordinata tizimiga nisbatan uchlik son orqali beriladi va bu sonlar koordinatalarni burishda vektorlar qonuniyatlar bo'yicha o'zgaradi. Bu miqdorlarning invariantligi shu bilan ifodalanadiki vektor koordinatalari o'zgargani bilan vector yo'nalishga ega bo'lgan kesma, o'zgarmas bo'ladi.

Fizikada skalyar va vektor miqdorlardan tashqari murakkabroq bo'lgan obyektlar ham uchraydi. Misol sifatida aylanma harakat qilayotgan jismning kinetik energiyasini hisoblab ko'raylik.

Matematika, mexanika va fizikada shunday murakkab obyektlar borki ularning koordinatalari bazis almashish jarayonida maxsus qoida bilan o'zgaradi. Masalan, ikki vektor koordinatalarining ko'paytmasidan hosil bo'lgan 9 ta A_i, B_j miqdordan iborat bo'lgan obyektни qaraylik. Vektor koordinatalarini almashish qoidasidan bu 9 miqdor ushbu

$$A'_i B'_j = \alpha_{in} \alpha_{jm} A_n B_m \quad (3.85)$$

qoida bo'yicha almashadi. $A_i B_j = T_{ij}$ belgilash kiritish natijasida $T'_{ijk} = \alpha_{in} \alpha_{jm} T_{nm}$ tenglikka kelamiz. Uch o'lchovli fazoda koordinata tizimini burish jarayonida 9 ta miqdorning bunday almashish qoidasiga **2-rang tenzor** deyiladi. Xuddi shuningdek, 27 ta miqdordan iborat to'plam $T_{ijk} = A_i B_j C_k$ ni qarash mumkin va ularning almashish qoidasi

$$T'_{ijk} = \alpha_{in} \alpha_{jm} \alpha_{kl} T_{nml} \quad (3.86)$$

ko'rinishda bo'ladi. T_{ijk} miqdorlar uch o'lchovli fazoda **uchinchi rang tenzorlar** deyiladi. Bu yerda tenzor ta'rifni biz tushunish qulay bo'lishi uchun vektorlar orqali keltirdik. Tenzorlarning vektorga bog'lanmagan umumiy ta'rifi quyidagicha bo'ladi:

Agar uch o'lchovli fazoda 3^R miqdorlar ortogonal koordinatalar tizimini urishda eski va yangi bazislarda

$$T'_{i_R k_R} = \alpha_{i_1 k_1} \alpha_{i_2 k_2} \dots \alpha_{i_R k_R} T_{k_1 k_2 k_R} \quad (3.87)$$

qoida bo'yicha bog'langan bo'lsa bunday miqdorlarga **R- rang tenzorlar** deyiladi.

Ta'rifga ko'ra nolinchii rang tenzor skalyar bo'lib, u koordinatalar tizimini almashishida o'zgarmaydi. Birinchi rang tenzor vektordan iborat bo'lib, uning koordinatalari (7.23) yo'ki (7.24) qonuniyat bilan o'zgaradi:

$$A'_i = \alpha_{ij} A_j \text{ yoki } A_k = \alpha'_{kj} A'_j$$

2 - rang tenzor uch o'lchovli fazoda 3^2 koordinatalari mavjud bo'ladi. Ularning to'g'ri va teskari almashish qonunlari quyidagicha bo'ladi:

$$B'_{ij} = \alpha_{in} \alpha_{jm} B_{nm}, \quad B_{ij} = \alpha_{in}^T \alpha_{jm}^T B'_{nm} \quad (3.88)$$

3 - rang tenzorning almashish qonunida uchta burish matritsasi ishtirok etadi.

(8.16) ifodalarni matritsa ko'rinishda ifodalash hisoblashlarda qulaylik tug'diradi.

$$B'_{ij} = \alpha_{in} \alpha_{jm} B_{nm} = \alpha_{in} B_{nm} \alpha_{jm} = \alpha_{in} B_{nm} \alpha_{jm}^T = (\alpha \cdot B \cdot \alpha^T)_{ij} \rightarrow B' = \alpha \cdot B \cdot \alpha^T \quad (3.89)$$

Xuddi shuningdek, (3.88) dan teskari almashish qonunini keltirib chiqarish mumkin

$$B = \alpha^T \cdot B' \cdot \alpha \quad (3.90)$$

(7.6) formula yordamida aniqlangan Kroneker belgisining tenzorligini ko'rsataylik.

> Kroneker belgisini Dekart koordinatalardagi ortlarning skalyar ko'paytmasi shaklida ifodalash mumkin: $\sigma'_{mk} = (\vec{e}_m, \vec{e}_k), \delta'_{mk} = (\vec{e}_m, \vec{e}_k)$

Ortlarning almashish qonunidan

$$\delta'_{mk} = (\vec{e}_m, \vec{e}_k) = \alpha_{mn} \alpha_{kl} (\vec{e}_n, \vec{e}_l) = \alpha_n \alpha_m \sigma_{nl} \quad (3.91)$$

Demak, Kroneker belgisi ikkinchi rang tenzor ekan.

$$\delta'_{mk} = \alpha_{mn} \alpha_{kn} = \sigma_{mk} \quad (3.92)$$

Hisoblashni davom ettirsak tenglikka ega bo'lamiz. Kroneker belgisi ikkinchi rang tenzor bo'lishidan tashqari o'z ko'rinishini ham o'zgartirmas ekan. Bunday tenzorlarga **invariant** tenzorlar deyiladi.

Boshlang'ich koordinatalar tizimida 2-rang V tenzorning koordinatalari berilgan bo'lsin:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -2\sqrt{2} \\ 0 & 2\sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.93)$$

z o 'qi atrofida Dekart koordinatalar tizimini 135° ga burish natijasida hosil bo'lgan tizimda tenzor koordinatalarini toping.

>> (8.17) dan foydalansak

$$B = \begin{bmatrix} -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & 0 \\ -\sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -2\sqrt{2} \\ 0 & 2\sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & 0 \\ \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \quad (3.94)$$

$$= \begin{bmatrix} -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & 0 \\ -\sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & 0 \\ -\sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & -2\sqrt{2} \\ 2 & -2 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -2 \\ -1 & 0 & 2 \\ 0 & -2 & 0 \end{bmatrix}$$

Tenzorlar ustida amallar. *Tenzorlarni qo'shish.* Faqat bir xil rangli tenzorlarni qo'shish mumkin va qo'shishda mos koordinatalari qo'shiladi. Tenzorlarni qo'shish natijasida uning rangi o'zgarmaydi.

Masalan, uchinchi rang tenzor quyidagicha qo'shiladi:

$$C_{ijk} = A_{ijk} + B_{ijk} \quad (3.95)$$

C ning uchinchi rang tenzor ekanligini ko'rsatamiz. **A** va **V** uchinchi rang tenzor bo'lgani uchun ularning har birining elementlar soni $3^3 = 27$ ga teng. **A** va **V** tenzorlarning mos elementlari qo'shilgandan so'ng yig'indida yana 27 ta element hosil bo'ladi. Endi C tenzor koordinatalarining almashish qonunini ko'raylik.

$$\alpha_{in} \alpha_{jm} \alpha_{kl} (A_{mnl} + B_{mnl}) = \alpha_{in} \alpha_{jm} \alpha_{kl} C_{mnl} \quad (3.96)$$

Shunday qilib,

$$C'_{nml} = \alpha_{in} \alpha_{jm} \alpha_{kl} C_{mnl} \quad (3.97)$$

Bu munosabat S ning uchinchi rang tenzorligini ko'rsatadi. Ravshanki, ixtiyoriy rangli tenzorlar uchun ham bu qoidaning o'rinaliligi ko'rsatish qiyin emas.

Tenzorlarni ko'paytirish. A tenzor R_1 rangli bo'lib B tenzor R_2 rangli bolsin. Bu tenzorlarni ko'paytirish natijasida $R_1 + R_2$ rangli C tenzor hosil boladi.

Masalan, **A** 1 - rang, **V** 2 - rang tenzorlar bo'lsin. Bu tenzorlarni ko'paytirish natijasida 3 - rang tenzor hosil bo'ladi:

$$A_i \cdot B_{jk} = C_{ijk} \quad (3.98)$$

Haqiqatan ham S ning elementlar soni 27 ga ya'ni 3 – rang tenzor elementlar soniga teng bo'ladi. Endi koordinatalar tizimini burishdagi almashish qonunini tekshiramiz.

$$C'_{ijk} = A'_i \cdot B'_{jk} = \alpha_{in} A_n \cdot \alpha_{im} \alpha_{kl} B_{kl} = \alpha_{in} \alpha_{jm} \alpha_{kl} A_n B_{kl} = \alpha_{in} \alpha_{jm} \alpha_{kl} C_{nml} \quad (3.99)$$

Bundan C ning tenzorligi kelib chiqadi.

Tenzorni yig'ishtirish. A R - rang tenzor bo'lsin. A tenzor koordinatalarini ikki indeksi bo'yicha qo'shishga tenzorni yig'ishtirish deyiladi. R - rang tenzorni yig'ishtirish natijasida $R-2$ nargli tenzor hosil bo'ladi. Tenzorni yig'ishtirish amali tenzorni Kroneker simvoliga ko'paytirish va so'ng ikki indeks bo'yicha qo'shish bilan bir xil bo'lgani uchun tenzorni yig'ishtirish amalini tenzorni Kroneker belgisiga ko'paytirishdan hosil qilsa bo'ladi.

Masalan, A uchinchi rang tenzor bo'lsin. Bu tenzorni oxirgi ikki indeks bo'yicha yig'ishtiraylik, yani A_{ijj} Ikkinchi tomondan $A_{ijk} \delta_{jk} = A_{ijj}$ bo'ladi. Bu yerda j yig'ish indeksi i esa erkin indeks, shuning uchun, $A_{ijk} = B_i$ boladi. Ya'ni uchinchi rang tenzorni yig'ishtirish natijasida 1 - rang tenzor hosil bo'ladi. Haqiqatan ham,

$$A'_{ijj} = \alpha_{im} \alpha_{jn} \alpha_{jk} A_{nmk} = \alpha_{im} A_{mkk} = \alpha_{im} B_m \quad (3.100)$$

S 4 - rang tenzorni oxirgi ikki indeks bo'yicha yig'ishni ko'raylik. Natijaviy tenzorni ikkinchi rangligini isbotlaylik.

$$C'_{ijkk} = D'_{ij} = \alpha_{in} \alpha_{jn} \alpha_{kl} \alpha_{kh} C_{mnlh} = \alpha_{in} \alpha_{jn} \sigma_{lh} C_{mnlh} = \alpha_{im} \alpha_{jn} \alpha_{kl} D_{nm} \quad (3.101)$$

Tenzorni yig'ishtirish amalini qollash uchun tenzor rangi 2 va undan yuqori bolishi kerak. 2-rang tenzorni yig'ishtirish amaliga *tenzorning izi* deyiladi va quyidagicha belgilanadi:

$$Sp(A_{ij}) = Tr(A_{ij}) = A_{ii} \quad (3.102)$$

Koordinata tizimini burishga nisbatan tenzorning izi invariantdir.

Haqiqatan ham

$$Sp(A'_{ij}) = A'_{ij} = \alpha_{ij} \alpha_{ik} \alpha_{jk} A_{jk} = \sigma_{jk} A_{jk} = A_{kk} = Sp(A_{ij}) \rightarrow Sp(A'_{ij}) = Sp(A_{ij}) \quad (3.103)$$

Agar indekslar o'rnini almashtirganda koordinatalari o'zgarmasa, bunday tenzorlarga *simmetrik tenzorlar* deyiladi. Indekslar o'rnini almashtirilganda tenzor koordinatalarining ishorasi tekkariga almashsa, bunday tenzorga *antisimmetrik tenzor* deyiladi:

$$T_{ij} = T_{ji} \rightarrow T_{ij} - \text{simmetrik tenzor,}$$

$$T_{ij} = -T_{ji} \rightarrow T_{ij} - \text{antisimmetrik tenzor.}$$

Yuqori tartibli tenzorlarda simmetriklik va antisimmetrik tushunchalari juft indeksli nisbatan qaraladi. Masalan,

$$F_{ijkl} = F_{kjin} \text{ va } F_{ijkl} = -F_{kjil}$$

tengliklar o'rinli bo'lsa, 4 – rang F tenzor birinchi juft indeks bo'yicha simmetrik bo'lib, 1 - va 3 - indeksli bo'yicha antisimmetrik deyiladi.

Tenzorlarning simmetriklik xossasi tenzorning o'zaro bogliq bo'lmagan elementlar sonining kamayishiga olib keladi. 2 – rang tenzorni 3×3 matritsa bilan qiyoslash mumkin. Simmetrik tenzorda bosh diagonal va undan yuqorida joylashgan elementlar bilan to'la aniqlanadi. Bunday elementlar esa, oltiga teng bo'ladi.

Ikkinchi rang antisimmetrik tenzor koordinatalari bosh diagonaldan yuqorida joylashgan va bu diagonaldan pastda joylashgan koordinatalari ishoralari bilan farq qiladi. Bosh diagonalda joylashgan elementlar nolga teng bo'ladi. Haqiqatan ham, A_{ij} antisimmetrik tenzor bo'lsin: $A_{ij} = -A_{ji}$. Bu tenglikda $i = j$ deb olsak, $A_{jj} = -A_{jj}$ (bu tenglikda j bo'yicha yigindi yo'q) bo'ladi, bundan $A_{jj} = 0$ ekanligi kelib chiqadi. Shuning uchun o'lchovli fazoda antisimmetrik tenzorning bogliq bo'lmagan elementlari uchga teng bo'ladi.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Tenzor xossalarini aytib bering.
2. Ikkinchi rang tenzor nima?
3. uchinchi rang tenzor nima?
4. R - rang va invariant tenzorlar tenzorlar nima?

5. Tenzorlarni qo'shish va ko'paytirish amallari.

6. Simmetrik tenzorlar nima?

3.4. Elektromexanik tizimlarning asosiy tenglamalari. Lagranj – Maksvell tenglamasi.

Kalit so'zlar: umumlashtirilgan koordinatalar, umumlashtirilgan kuchlar, golonom bog'lanishlar, Lagranj tenglamalari, Gamiltonning universal prinsipi, kuch funksiyasi, Fure almashtirishi, Laplas almashtirishi, Laplas metodi

Umumlashtirilgan koordinatalar va kuchlar. Umumlashtirilgan koordinatalarda harakat tenglamalari. k ta golonom bog'lanishlarga qarashli moddiy tizimning holati ($s = 3n - k$) ta mustaqil dekart koordinatalar bilan aniqlanadi. Ammo ko'pchilik hollarda dekart koordinatalaridan foydalanish beso'naqay amallarga olib keladi. Shu sababli moddiy tizimning holatini aniqlash uchun bir-biridan mustaqil bo'lgan boshqa $q_1, q_2, \dots, q_s$ parametrlardan foydalanish mumkin. Bu parametrlar (masalan, burchaklar, yoylarning uzunliklari, yuzalar va sh. o'xsh.) har xil o'lchamlarga ega bo'lishi mumkin. Hamma $3n$ ta dekart koordinatalarini yangi kiritilgan $q_1, q_2, \dots, q_s$ parametrlar orqali ifodalash mumkin: $x_i = x_i(q_1, q_2, \dots, q_s, t)$; $y_i = y_i(q_1, q_2, \dots, q_s, t)$, $z_i = z_i(q_1, q_2, \dots, q_s, t)$, ($i = 1, 2, \dots, n$). Bu funksiyalar bog'lanish tenglamalarining ayniyatiga aylanadilar. Kiritilgan o'zaro mustaqil parametrlar $q_1, q_2, \dots, q_s$ umumlashtirilgan parametrlar deyiladi

Virtual ish ifodasida umumlashtirilgan koordinatalarni o'zgartirishdagi koeffisientlar umumlashtirilgan kuchlar deyiladi.

Umumlashtirilgan koordinatalarda harakat tenglamalari – bu Lagranj tenglamalarining ikkinchi shaklidir:

$$(d/dt) (\partial L / \partial \dot{q}_k) - \partial L / \partial q_k + (\partial D) / (\partial \dot{q}_k) = F_k, \quad (3.104)$$

$$(k = 1, 2, \dots, s).$$

Energiyani elektromexanik o'zgartgichlarni tavsiflash uchun Lagranj tenglamalaridan foydalaniladi.

Umumlashtirilgan mashinalar bog'langan elektromexanik tizimni hosil qiladi: mexanik harakat elektr tizimiga ta'sir qiladi, elektr harakat mexanik sistemasiga ta'sir ko'rsatadi. Mexanik harakatning elektr tizimga ta'siri Faradey qonuni asosida avtomatik ravishda kiritilgan; bunga asosan $u = p\psi$, chunki oqim ilashish ψ mexanik koordinata φ ning funksiyasi sifatida ifodalangan. Shunday qilib, $r\psi$ mexanik harakat yuzaga keltirgan kuchlanishni o'z ichiga oladi. Elektr harakati (tokning oqib o'tishi)ning mexanik harakatga ta'siri Nyuton qonunlariga kirmagan. Demak, elektr hodisalari keltirib chiqargan mexanik momentni topish uchun ayrim yordamchi usullardan foydalanish zarur bo'ladi.

Buning uchun Lagranj tenglamalaridan foydalaniladi. Umumlashtirilgan elektr mashinalarini tavsiflovchi asosiy tenglamalarni keltirib chiqarish uchun *Gamiltonning universal prinsipi (eng kam harakat prinsipi)* orqali ifodalangan jarayonlar orasidagi ancha chuqur bog'lanishdan foydalanish mumkin. Bu prinsipga asosan, tizimning t_1 vaqtdagi birta holatidan t_2 vaqtdagi holatiga o'tishida $\int_{t_1}^{t_2} L dt$ integral o'zining minimumiga erishadi [bunda L – berilgan tizimning *kuch funksiyasi (lagranjian)*]. Agar Lagranjdan (L) tizimning har qaysi umumlashtirilgan koordinatasi q uchun Lagranj tenglamasini:

$$(d/dt) (\partial L / \partial \dot{q}_k) - \partial L / \partial q_k + (\partial D) / (\partial \dot{q}_k) = F_k \quad (3.105)$$

qanoatlantirsa, integralning minimumi amalga oshadi. Bu formulada $\dot{q} = dq/dt$; D – dissipativ funksiya; $F_q - q$ koordinatani o'zgartirishga intiluvchi tashqi umumlashtirilgan kuch koordinata q ni tizimning fizik holatini belgilovchi mustaqil kattaliklar to'plami deb tushuniladi.

Shunday qilib, agar L funksiyasi aniqlangan bo'lsa, yuqorida keltirilgan tenglamani q ning har qaysi koordinatasi uchun yechib tizimning xossasini to'la tavsiflash mumkin.

Umumlashtirilgan mashinalarning modelini tavsiflash uchun Lagranj tenglamasini qo'llashda quyidagilar e'tiborga olinadi, ya'ni mashinalar beshta umumlashtirilgan koordinata bilan harakterlanadi: rotorning burilish burchagi γ va

to'rtta chulg'amdagi zaryadlar (yoki toklar). Tizimga beshta umumlashgan kuch (tashqi mexanik moment M_{mex} va to'rtta chulg'amga berilgan kuchlanishlar) kiradi.

Umumlashtirilgan mashinalarning momentlar muvozanat tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$M_{\text{mex}} = J [(d\dot{\gamma})/(dt)] - M_{\text{em}} + \alpha_{\text{tr}}\omega, \quad (3.106)$$

bunda α_{tr} rotorning ishqalanish qarshiligi koeffisienti.

Shunday qilib, yuqorida keltirilgan formuladan foydalanib, umumlashtirilgan mashinalarda bo'ladigan elektromagnit va mexanik jarayonlarni tavsiflovchi barcha differensial tenglamalari olinadi.

Elektromexanik tizimning harakat tenglamalarini tahlil qilish metodlari.

Elektromexanik tizimning harakat tenglamalarini keltirib chiqarish sistemani tahlil qilishda muhim qadamlardan biridir. Har qanday tizimni tahlil qilishdan maqsad ba'zi bir ta'sirlar ostida bo'lgan har qanday tizimning xossasini aniqlashdan iborat. Bu maqsadga erishish uchun tizimning harakat tenglamasini yechish, yoki hech bo'lmaganda tizimning muhim harakteristikalarini olish kerak bo'ladi.

Elektromexanik tizim harakatining differensial tenglamalari quyidagi klasslarga tegishli bo'lishi mumkin: 1) chiziqli, koeffisientlari o'zgarmas; 2) chiziqli, koeffisientlari o'zgaruvchan; 3) nochiziqli.

Yuqorida eslatilgan tenglamalarning har qaysisini yechish uchun qo'llaniladigan aniq belgilangan metodlari mavjud. Masalan, agar tizim koeffisientlari o'zgarmas chiziqli tenglamalar bilan tavsiflansa, har qanday ta'sirga tizimning reaksiyasini topishga imkon beradigan umumiy analitik metodlar mavjud.

Bu tenglamalarning eng muhim xossasi superpozisiya (ustiga qo'yish) prinsipi bo'lib, yangi yechimni olish uchun integro-differensial tenglamalarni hisoblaganda olingan natijalarni qo'shish imkonini beradi va chiziqli tenglamalarning ko'p muhim ahamiyatli xossalarini aniqlashga imkon beradi. Chiziqli integro-differensial tenglamalarni tadqiqot qilishda keng qo'llaniladigan

umumiy metodlarga: klassik (analitik) metod, Fure almashtirishini foydalanadigan Koshi–Xevisayd operator metodi va Laplas almashtirishi asosidagi metod kiradi. Chiziqli differensial tenglamalarni tadqiqot qilishning analitik metodi yetarli darajada ma'lum, qolgan uchtasidan Laplasning almashtirish metodi umumiydir.

Laplasning almashtirish metodini o'zgarmas koeffisientli chiziqli differensial tenglamalarni yechishda ham qo'llash mumkin (bu tenglamalarni klassik metod yordamida ham yechish mumkin). Laplas metodi differensial tenglamalarni algebraik ko'rinishga almashtirib, ularning yechimini osonlashtiradi, ya'ni uning chiziqli operatori vaqt bo'yicha o'zgaruvchi funksiyani kompleks chastotasi funksiyasiga aylantiradi.

Energiyani elektromexanik o'zgarttirgichlar umumiy holda nochiziqli differensial tenglamalar bilan tavsiflanadi. Shu sababli ularni yechishda asosan sonli metodlar yordamida EHM da yechish mumkin.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Umumlashtirilgan koordinatalar va kuchlar nima?
2. golonom bog'lanishlar qanday bo'ladi?
3. Lagranj tenglamalarini aytib bering
4. Gamiltonning universal prinsipi nima?
5. Laplas almashtirishi va Laplas metodi nima?

IV-BOB. ELEKTR MASHINALARINI ISH HOLATLARINING TAHLIL QILISH METODLARI

4.1. O'zgaruvchan tok elektr mashinalarida aylanuvchan magnit maydonga ta'sir etuvchi omillar tahlili

Kalit so'zlar: *aylanuvchan magnit maydon, ko'p fazali mashina, ikki qutbli magnit maydon, to'rt qutbli magnit maydon, sinxron tezlik, sirpanish, asinxron motor, sinxron motor, ko'p tezlikli motor, mujassamlashgan chulg'am, taqsimlangan chulg'am.*

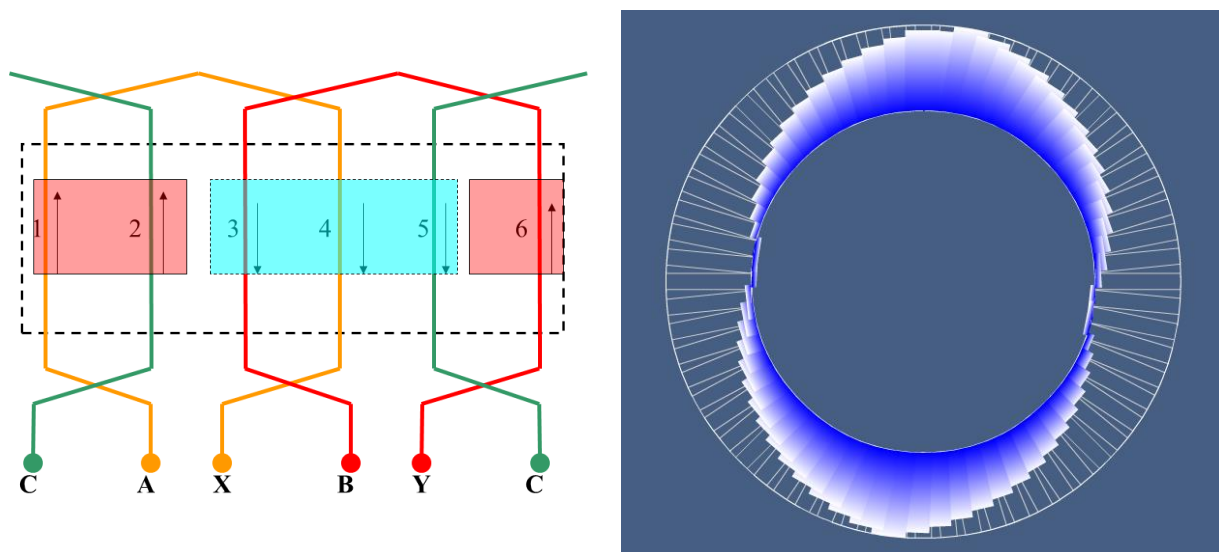
O'zgaruvchan tok mashinalarining ishlash prinsipi aylanuvchan magnit maydon hodisasiga asoslangan. Sinxron va asinxron mashinalarning qo'zg'almas qismi stator tuzilishi bir xil bo'lib aylanuvchan magnit maydon hosil qilish uchun mo'ljallangan. Aylanuvchan magnit maydonning hosil bo'lishini statorining pazlariga uch fazali chulg'am joylashtirilgan asinxron mashinalari misolida ko'rib chiqamiz. Rasmda asinxron motorining uch fazali chulg'ami yakka mujassamlashgan chulg'am sifatida ko'rsatilgan [16].

Stator bilan rotor o'rtasidagi havo oralig'ida aylanuvchan magnit maydon hosil bo'lishi uchun stator chulg'amlari ma'lum bir tartibda joylashtirilishi kerak. Aylanuvchan magnit maydon faza chulg'amlarida tok sinusoida qonuni bo'yicha o'zgaradigan ko'p fazali mashinalarda hosil qilinadi. Bunda fazalar soni ikkidan kam bo'lmasligi kerak. YA'ni, bir fazali elektr mashinalarda aylanuvchan magnit maydon hosil qilib bo'lmaydi. Aylanuvchan magnit maydonni hosil qilishni uch fazali o'zgaruvchan tok mashinalarida ko'rib chiqamiz. Buning uchun stator ichki aylanasi teng uch qismga bo'linadi va uchta faza chulg'amlari stator pazlariga 120^0 geometrik burchak ostida joylashtiriladi. Har bir faza chulg'amiga o'zaro 120^0 elektrik burchakka siljigan sinusoidal kuchlanish beriladi.

Agar stator chulg'ami uch fazali kuchlanish manbaiga ulansa, chulg'am orqali uch fazali tok o'ta boshlaydi. Har bir chulg'andan o'tayotgan tok vaqt bo'yicha sinusoidal qonun bo'yicha o'zgaruvi magnit yurituvchi kuch (MYuK) G'_A, G'_V va G'_S larni xosil qiladi. Ular qo'shib havo oralig'ida sinusoida qonuni bo'icha

taqsimlangan magnit maydonni hosil qiladi. Uch fazali tok hosil qilgan umumiy MYUK ning yoʻnalishini va qiymatini aniqlash uchun faza chulgʻamlaridan oʻtayotgan toklarning vaqt boʻyicha oʻzgarish grafigiga rasmga murojaat qilamiz. Eng oddiy uch fazali chulgʻam bu mujjasamlangan chulgʻam boʻlib uning chulgʻamlari birta oʻramdan iborat boʻladi.

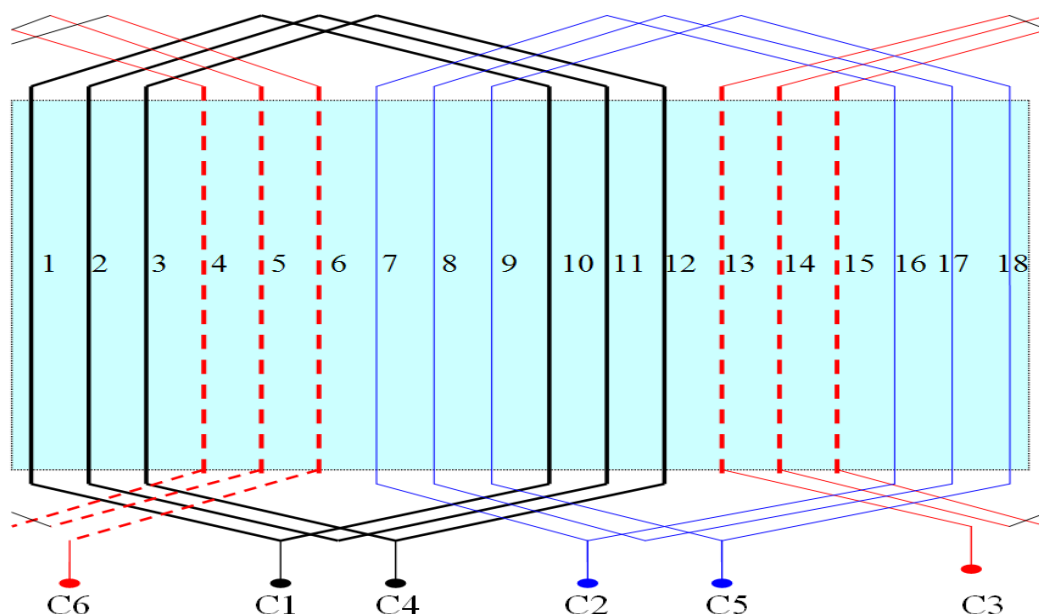
Chulgʻamlardagi kuchlanishlarni oʻzgarish grafiglari 4.3–rasmda koʻrsatilgan. 4.3–rasm (a) grafikda stator chulgʻamining A fazasida “musbat” maksimum va V va S fazalarda esa, “manfiy” oʻrtacha kuchlanishlar berilgan. Bu kuchlanishlar muvofiq ravishda mutanosib toklar va havo oraligʻida magnit maydonni hosil qiladi (4.3-rasm). Endi kuchlanishlar faza boʻyicha 60° elektr gradusga siljigan holatni koʻramiz. Bunda S faza kuchlanishi “manfiy” maksimum, A va V fazalar kuchlanishi esa, “musbat” oʻrtacha qiymatga ega boʻladi. Bu holat havo oraligʻida rasmda koʻrsatilgan magnit maydonni vujudga keltiradi. YA’ni magnit maydon holati ham 60° burchakka buriladi.



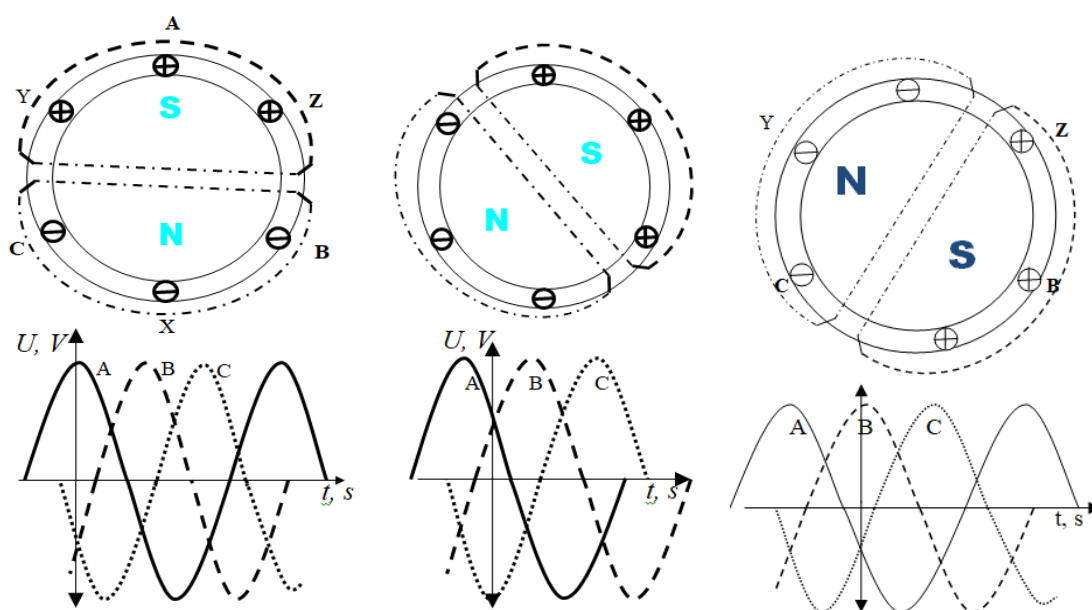
4.1-rasm. Asinxron motorni mujassamlashgan ikki qutbli stator chulgʻami: a)-chulgʻamsxemasi, b)-magnit maydoni.

Bu holatni kuchlanishlar fazasini yana 60° burchakka siljigan holda ham koʻrish mumkin (4.2-rasm). SHunday qilib faza kuchlanishlari qiymati sinusoida qonuni boʻyicha toʻliq oʻzgarganda havo oraligʻidagi magnit maydon stator ichki aylanasi boʻylab bir marta aylanadi. SHuning uchun magnit maydonning aylanish tezligi tok chastotasiga mutanosib boʻladi. Ikki qutbli uch fazali elektr

mashinalarda sekundiga 50 marta yoki minutiga 3000 marta aylanuvchi magnit maydon hosil bo‘ladi.



4.2-rasm. Asinxron motorni taqsimlangan ikki qutbli stator chulg‘ami.



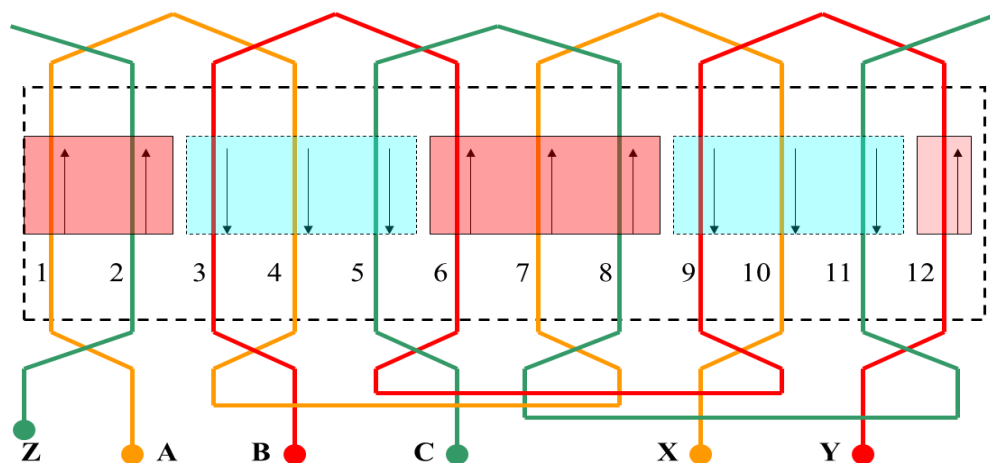
4.3-rasm. Asinxron motorni mujassamlashgan ikki qutbli stator chulg‘ami: a) –magnit maydoni, b)-tarmoq kuchlanishi.

Amaliyotda bu tezlikdan farqli bo‘lgan tezlikka ega bo‘lgan elektr mashinalar mavjud. Bu tezliklar quyidagi tartibda olinadi. Uch fazali chulg‘amli statorning ichki aylanmasining yarmiga joylashtirsak tokning to‘la davrida magnit maydon statorining yarmisi aylanadi. Statorning qolgan ikkinchi yarmisiga ham

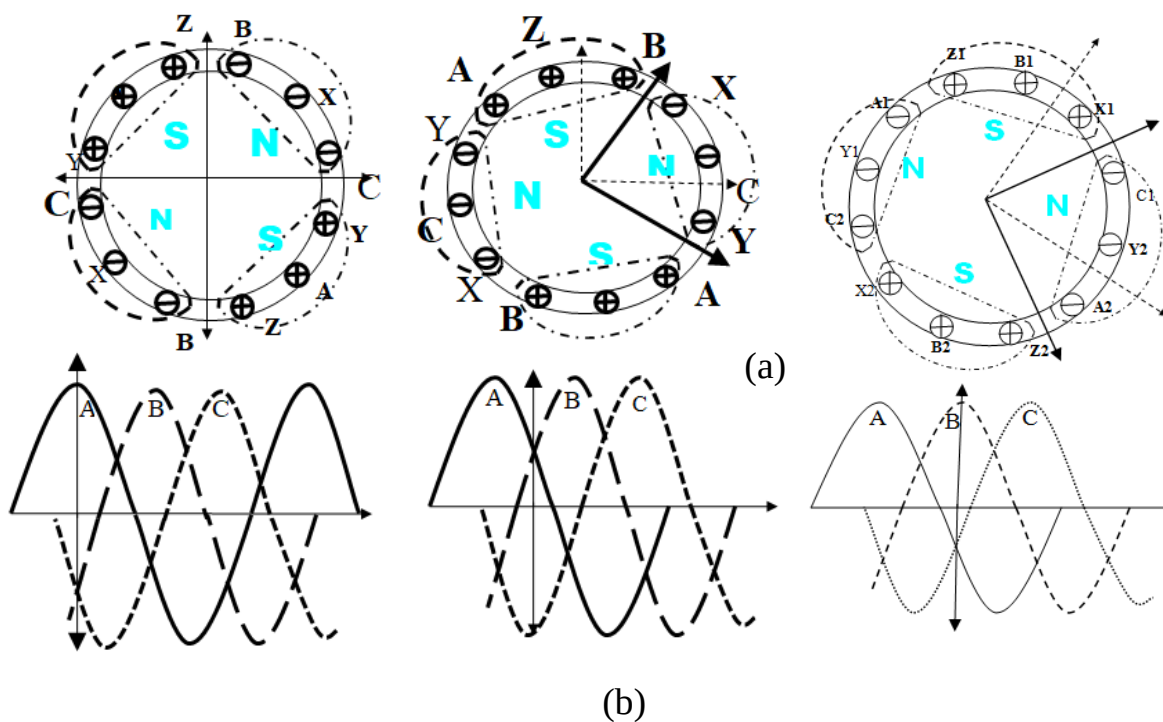
uch fazali chulg'am joylashtiriladi. Bunda havo oralig'idagi aylantiruvchi moment ikki martaga oshadi va aylanish tezligi ikki martaga kamayadi. YA'ni, quyidagi ifodaga ega bo'lamiz:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}, \quad (4.1)$$

bu yerda n_1 —magnit maydonning aylanish tezligi, ayl/min; f_1 —stator toki chastotasi, Gs; p —statorning juft qutblari soni, dona.



4.4-rasm. Asinxron motorstatorini “mujassamlashgan” to’rtqutbli chulg’ami.



4.5-rasm. Asinxron motorni mujassamlashgan to’rt qutbli stator chulg’ami: a) –magnit maydoni, b)-tarmoq kuchlanishi.

4.5-rasmda to'rt qutbli magnit maydonning faza kuchlanishlari qiymati 60^0 burchakka burilgandagi holati ko'rsatilgan. Bunda magnit maydon vektori 30^0 burchakka burilishini ko'rish mumkin. To'rt qutbli magnit maydonni vizuallashtirish holati 4.6-(a) rasmda ko'rsatilgan. Agar statorga 3 ta uch fazali chulg'am joylashtirilsa juft qutblar soni uchga teng bo'ladi va magnit maydon aylanish tezligi uch marta kamayadi va 1000 ayl/min. bo'ladi (4.6 –rasm, b).

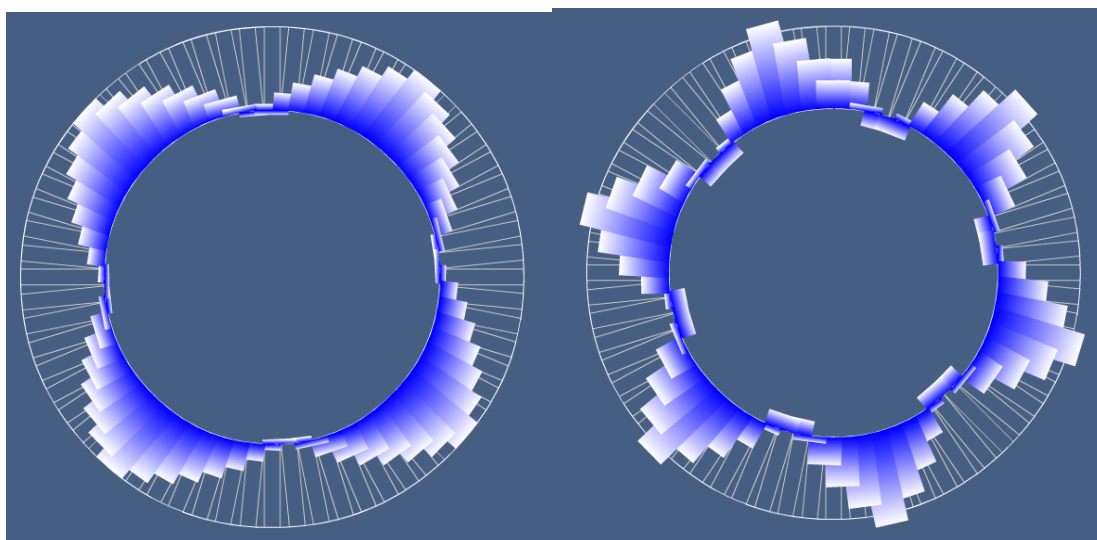
Yuqorida keltirilganlardan shuni xulosa qilib aytish mumkinki, umumiy MYuK vektori doimo o'zgarmas qiymatga ega bo'lgani holda o'zgarmas burchak tezlik bilan aylanar ekan. Stator tokining $1/3$ davrga o'zgarishi natijasida MYuK vektori 120^0 ga buriladi, ya'ni MYUK vektori bir davr mobaynida bir marta to'liq aylanadi. Umumiy magnit yurituvchi kuchning yo'nalishi esa, har doim toki maksimal qiymatga ega bo'lgan fazaning magnit yurituvchi kuchi yo'nalishi bilan mos tushadi (3-rasm).

Shunday qilib, aylanuvchan magnit maydonini hosil qilish uchun, birinchidan, chulg'amlar fazada o'zaro ma'lum bir burchakka siljigan, ikkinchidan esa, shu chulg'amlar orqali o'tayotgan toklar ham ma'lum bir faza siljish burchagiga ega bo'lishi kerak.

Yuqorida keltirilgan shartlardan birortasi bajarilmasa, aylanuvchan magnit maydoni hosil bo'lmaydi. Bizning misolda bir juft qutb stator aylanasi yarmini egallaganligi uchun o'zgaruvchan tokning bir davri mobaynida aylanuvchan magnit maydoni rotor aylanasi yarmiga buriladi. Agar magnit maydoni r juft kutblar soniga ega bo'lsa, aylanuvchan magnit maydon burchakka buriladi. Agar, juft qutblar soni $r = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ bo'lsa, aylanuvchan magnit maydonning aylanishlar tezligi (soni) mos xolda 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500 ayl/min ni tashkil etadi.

Demak, magnit maydonining aylanish tezligi o'zgaruvchan tok chastotasiga va juft qutblar soniga bog'liq ekan. Aylanuvchan magnit maydonining yo'nalishini o'zgartirish (reverslash) uchun fazalar ketma-ketligining tartibi o'zgartiriladi, ya'ni

stator chulgʻamlarining manbaga ulanadigan S_1 , S_2 , S_3 bosh uchlaridan istalgan ikkitasining oʻrni almashtiriladi.



(a)

(b)

4.6-rasm. Statorda 4 qutbli- (a) va 6 qutbli-(b) magnit maydonlarni hosil boʻlishi.

Odatda, motorning pasportida rotorning nominal aylanishlar soni koʻrsatilgan boʻladi. Aylanuvchan magnit maydonining sinxron tezlik qiymatini bilish uchun ω_{nom} ga eng yaqin katta tezlik qiymati qabul qilinadi. Myasalan, $\omega_{nom} = 2860$ ayl/min ga, 3000 ayl/min, $\omega_{non} = 1460$ ayl/min ga, $= 1500$ ayl/min mos keladi.

Amaliyotda stator chulgʻamlarini tashkil etgan qutb chulgʻamlarini oʻzaro ulash sxemalarini oʻzgartirib juft qutblar soni oʻzgaradigan stator chulgʻamlari sxemalari olinib koʻp tezlikli motorlar olinadi. Bundan tashqari, maxsus hisoblashlar orqali motor tezligini oʻzgartirish mumkin boʻladi.

Amaliyotda asinxron motorning stator chulgʻamini yangi aylanish chastotasini oʻrashga togʻri keladi. Motorning aylanish chastotasi oʻzgarganda statorda qutblar sonini oʻzgartirish zarur ketma – ketlikda, pazlar boʻyicha oʻramni boshqa qadamini tanlash, faza va qutbga pazlar soni baʼzi paytlarda hisoblashlar aniq olib borilganda ham aylanish chastotasi oʻzgarganda yangi qutblar soniga qarab qayta oʻralgan rotor qisqa tutashgan motor yomon ishlaydi. Chulgʻam oʻralgandan keyin motor yomon ishlashi quyidagicha tushuntiriladi, demak stator

va rotor pazlar sonini o'zaro mos tushmasligi, qaysikim yurg'izish vaqtida ishda motor tiqishlashadi, aylanishda kechikadi, ish vaqtida shovqin chiqarishi va h.k.

Yangi qutblar sonini qayta hisoblashda bunday vaziyatga tushmasligi uchun stator va rotorning pazlar sonini mosligini tekshirish kerak bo'ladi [11].

Pazlar soni statorda va rotorda mosligi tekshirgandan keyin, pazda effektiv o'tkazgich soni va ularni kesim yuzasi quyidagi ifodalardan aniqlanadi.

$$N_{yangi} = N_{eski} \cdot \frac{n_{eski}}{n_{yangi}} \cdot \frac{a_{eski}}{a_{yangi}} \cdot \frac{k_{\omega,eski}}{k_{\omega,yangi}}, \quad (4.2)$$

$$S_{yangi} = S_{eski} \cdot \frac{N_{eski}}{N_{yangi}}, \quad (4.3)$$

bu yerda: N_{yangi} va N_{eski} - pazda eski va yangi effektiv o'tkazgichlar soni;

S_{yangi} va S_{eski} - o'ramning yangi va eski effektiv o'tkazgich kesim yuzasi;

n_{eski} va n_{yangi} - eski va yangi aylanish chastotasi;

$k_{\omega,eski}$ va $k_{\omega,yangi}$ - eski va yangi o'ramning o'ramlar koeffitsienti

Faza chulg'amidagi yangi o'ramlar soni:

$$\omega_{yangi} = \frac{N_{yangi} \cdot z_1}{6a}. \quad (4.4)$$

Qayta o'ralgan elektr motorning quvvati:

$$P_{yangi} = P_{eski} \cdot \frac{n_{yangi}}{n_{eski}}. \quad (4.5)$$

Bu formuladan ko'rinib turibdiki, kichik aylanish chastotasiga qo'yib, hisoblaganda motor quvvati kamayadi, katta aylanish chastotasiga qo'yib hisoblaganda motor quvvati o'sadi. Katta aylanish chastotasiga qo'yib hisoblaganda stator belchasidagi magnit induksiya o'rnatilgan chegaradan olish mumkin.

Me'yordan o'sgan induksiya natijasida belchada magnitlangan tok darrov o'sadi va motor ishdan chiqishi bo'lib qolishi mumkin.

Stator belchasidagi va havo bo'shlig'idagi magnit induktsiya quyidagi formula bilan aniqlanadi, havo bo'shlig'idagi magnit induktsiya Tl.

$$B_{\sigma} = 6400 \frac{k_e U_f}{k_{\omega} Q_p \omega_f}, \quad (4.6)$$

bu yerda: k_e

0,86 – 0,90 $Q_p = 5000-10000 \text{ mm}^2$ bo'lganda

0,90 – 0,93 $Q_p = 10000-15000 \text{ mm}^2$ bo'lganda

0,93 – 0,95 $Q_p = 15000-40000 \text{ mm}^2$ bo'lganda

0,96 – 0,97 $Q_p = 40000 \text{ mm}^2$ dan yuqori bo'lganda

Q_{II} -qutb bo'linish maydoni, mm^2 .

$$Q_p = \frac{3,14 D_i L_i}{2p}. \quad (4.6)$$

Magnit induktsiya, stator yarmosidan, Tl.

$$B_c = 0,36 B_{\sigma} \frac{\tau}{h_c}. \quad (4.7)$$

h_c -stator yarmosidan balandligi.

Havo bo'shlig'idagi va stator yarmosidagi induktsiya 6 tabl.dagi qiymatdan oshmasligi kerak. Agar stator yarmosidagi induktsiya belgilangan qiymatdan oshsa, unda pazdagi effektiv o'tkazgichlar sonini quyidagicha oshirish kerak:

$$N'_{yangi} = N_{yangi} \frac{B_c}{(1,2-1,7)} \quad 2r=2 \text{ bo'lganda}$$

$$N'_{yangi} = N_{yangi} \frac{B_c}{(1-1,5)} \quad 2r>2 \text{ bo'lganda}$$

Motorni boshqa aylanish chastotasiga qayta o'raganda quyidagilarga e'tibor berish kerak:

Motorning aylanish chastotasi oshishi podshipniklar isishining oshishi bilan bog'liq.

Aylanish chastotasi oshishida aylana o'tkazgich bilan motor o'raganda, shunday o'tkazgich tanlanishi kerakki, u shlits orqali o'tmasin.

Aylanish chastotasi kamayganda elektr motorning sovushi yomonlashadi, buning natijasida olingan quvvat 10-15 % ga kamaytirish taklif qilinadi. Aylanish chastotasi o'tganda tok zichligini 10-15 % ga oshirish va elektr motorning quvvatini oshirish mumkin.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. taqsimlangan culg'am va mujassamlashgan culg'am nima?
2. Aylanuvchan magnit maydonni hosil bolish shartlari nimalar?
3. Asinxron motorning sinxron motordan farqi nima?
4. To'rt qutbli magnit maydonni sinxron tezligi nimaga teng?

4.2. Asinxron motorlar asosiy xossalarining tahlili

Kalit so'zlar: *magnitlovchi tok, quvvat koeffisienti, qarshilik momenti, mexanik tavsif, nominal moment, ishga tushirish momenti, mexanik tafsif, tafsif*

Elektr tarmog'ining kuchlanishi va tok chastotasi nominal bo'lganda asinxron motor yuklanishining ish xossalariga ta'siri muhim amaliy masalalardan biri hisoblanadi. Asinxron motor valiga qo'yilgan yuk o'zgarganda rotorning aylanish chastotasi bir oz kamayganligi sababli sirpanish $M_{ayl} = M_{yuk}$ bo'lgunga qadar oshadi. Aylantiruvchi momentning oshishi rotor tokining oshishiga olib keladi. Sirpanish s ning oshishida rotor toki I'_2 ning fazaviy siljish burchagi oshib motor reaktiv toki I'_{2p} ning oshishiga olib keladi. Rotor va stator toklarining oshishi chulg'amlarda elektr isroflarning oshishiga olib keladi. Motorning validagi quvvat amaliy jihatdan qarshilik momenti M_{yuk} ga proporsional ravishda oshadi.

Motor validagi yukning oshishi tarqoq magnit oqim oshganligidan tarmoqdan olayotgan reaktiv quvvati ham oshadi. Valdagi yuk kamaysa sirpanish, rotor toki va uning fazasi hamda stator toki kamayadi, bu esa tarmoqdan olayotgan aktiv va reaktiv quvvatlarning kamayishiga olib keladi.

Asinxron motor validagi yukning sirpanish, tok va reaktiv quvvatlariga ta'siri. Motorga berilgan kuchlanish va tok chastotasining nominal qiymatlarida valga berilgan yuk o'zgarsa sirpanish s , rotor toki I'_2 va stator toki I_1 o'zgaradi. Magnitlovchi tok I_0 amaliy jihatdan yukning o'zgarishiga bog'liq bo'lmaydi. Kritik sirpanishi $s_{kr} = 5 \div 15 \%$ bo'lgan motorlar uchun rotor chulg'aming aktiv r'_2 va induktiv x'_2 qarshiliklari sirpanish bu oraliqda o'zgarganida unga deyarli bog'liq bo'lmaydilar.

Maksimal momentning karraligi $k_{mn} \geq 1,6$ nominal sirpanish s_n yetarli darajadagi aniqliqda quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi: $s_n \approx s_{kr} / (2 k_m) \approx \{c_1^2 (R_n + \Delta R_{mex}) / [3U_{1n}^2 (1 - s_n)]\} r'_2$. Bu formuladan ko'rinishicha, $k_{mn} \geq 1,6$ bo'lganda nominal sirpanish s_n amaliy jihatdan chulg'amlarning tarqoq induktiv qarshiligidan bog'liq bo'lmay, balki rotorning aktiv qarshiligi bilan aniqlanadi.

$k_{mn} \geq 1,2$ bo'lganda rotor toki amaliy jihatdan valdagi yukka mutanosib ravishda o'zgaradi. Quyidagi $s_n \approx s_{kr} M_{yu*} / (2k_{mn}) = M_{yu*} \cdot s_n$ (bunda $M_{yu*} = M_{yu} / M_n$; M_{yu} – motor validagi qarshilik momenti) tenglikdan ko'rinishicha, $k_{mn} = 1,6$ bo'lganda sirpanish ham amaliy jihatdan valdagi yukka mutanosib ravishda o'zgaradi.

Statora toki $I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2}$ amaliy jihatdan k_{mn} dan bog'liq bo'lmaydi. Unga asosiy ta'sirni magnitlovchi tok ko'rsatadi.

Quvvat koeffisienti ko'p darajada faqat yukdan va magnitlovchi tokka bog'liq bo'lmasdan, maksimal momentning karraligi k_m dan ham bog'liq bo'ladi.

Quvvat koeffisienti ($\cos \varphi_n$) ning ma'lum qiymatida motor iste'mol qiladigan reaktiv quvvatning mos keladigan o'zgarishlarini quyidagi tenglikdan aniqlash mum-kin:

$$Q/Q_n = I_1 / I_{1n} \sqrt{[1 - (\cos \varphi / \cos \varphi_N)^2 \cos^2 \varphi_N / (1 - \cos^2 \varphi_N)]}. \quad (4.8)$$

Asinxron motorga berilgan kuchlanish nominal qiymatidan o'zgarganda Kuchlanish oshganda bo'ladigan jarayonning tahlilini ko'rib chiqamiz. Magnitlovchi tokning kuchlanishga nisbatan o'zgarishi salt ishlash harakte-

ristikasi bo'yicha o'zgaradi. Yuk o'zgaras bo'lganda kuchlanishning oshishida sirpanish amaliy jihatdan kuchlanish kvadratiga teskari proporsional o'zgaradi, kuchlanish kamayganda esa sirpanish ko'proq o'zgaradi.

Rotor toki kuchlanishga teskari proporsional o'zgaradi, kuchlanish kamayganda esa, bu o'zgarish ko'proq bo'ladi.

Stator toki I_1/I_{1n} kuchlanish o'zgarganda magnitlovchi tokka bog'liq bo'lib qolmasdan, maksimal momentning karraligiga ham bog'liq bo'ladi. Kuchlanish oshganda stator tokining karraligi amaliy jihatdan maksimal moment karraligidan bog'liq bo'lmaydi.

Tarqoq oqim tufayli reaktiv tok kuchlanish oshganda kuchlanishning kvadratiga teskari proporsional ravishda o'zgaradi, kuchlanish pasayganda esa ko'proq o'zgaradi [6].

Valdagi yuk o'zgaras (M_{yuk}) bo'lganda stator chulg'amiga berilgan kuchlanish kamaysa, motorning EYuK va magnit oqimi kamayadi va motorning sirpanishi oshadi, natijada rotor toki I'_2 va tarmoq kuchlanishi U_t vektorlari orasidagi siljish burchak oshadi. Kuchlanish kamayganda magnitlovchi tok kamayadi. *Kuchlanish oshganda* EYuK va magnit oqim oshadi, sirpanish va rotor toki kamayadi, magnitlovchi tok esa oshadi. Shunday qilib, kuchlanishning kamayishi hamma vaqt rotor tokining oshishiga, kuchlanishning oshishi esa, rotor tokining kamayishiga olib keladi.

Asinxron motorga berilayotgan tokning chastotasi o'zgarganda kuchlanishni o'zgartirish qonunini aniqlash. Kuchlanish o'zgarishining motor ish rejimi parametrlariga ta'siri nuqtai nazaridan nominal chastotadan farqli ($f = k_f f_n$) chastotada (chastota o'zgarganda) istaltalgan kuchlanish o'zgarishi qonunini aniqlash amaliyot uchun juda muhim masaladir.

Quyidagi kuchlanishni o'zgartirish usullarini qiyoslaymiz: a) motorning o'ta yuk bilan ishlash qobiliyatini saqlash sharti bo'yicha:

$$K_U = K_f \sqrt{M_{\text{to}^*}}, \quad (4.9)$$

(bunda $K_U = U_1 / U_{1n}$);

b) magnit oqimi qiymatini doimiy saqlash sharti bo'yicha: $K_U = K_f$.

Qarshilik momenti nominal bo'lganda kuchlanish o'zgarishining chastotaga bog'liqlik qonunining ikkalasi ham bir xil natijaga olib keladi. Lekin $M_{yu} < M_n$ bo'lganda kuchlanish o'zgarishining chastotaga mutanosib ravishda o'zgarishi ancha qulaydir (chunki bu holda sirpani va rotor toki birinchi usuldagiga qaraganda kam bo'ladi).

Ikkala kuchlanish o'zgarishi qonuni ("a" va "b")da to'la reaktiv quvvatni taqqoslash shuni ko'rsatadiki, chastota va valdagi yukning berilgan qiymatlarida reaktiv quvvatning iste'moli minimal bo'lishi uchun kuchlanish o'zgarishi qonunini aniqlash maqsadga muvofiqdir, ya'ni:

$$K_U \approx K_f \sqrt{M_{\text{yo}^*}} \cdot \sqrt[4]{I_{2H}' / (2K_{MH} I_{0H})}. \quad (4.10)$$

4.7-rasmda asinxron motorning mexanik tavsifi ko'rsatilgan. Mexanik tavsif asinxron motorning asosiy tavsiflaridan biri bo'lib, motorning ish qobiliyatini belgilaydi. Ma'lumki, stator aylanuvchan magnit maydon tezligi bo'lgani uchun rotorning aylanish tezligi bilan sirpanish orasidagi boglanish chiziqlidir. Mexanik karakteristikada quyidagilarni belgilash mumkin: maksimal (kritik) moment M_{shax} — asinxron motor aylantiruvchi momentining maksimal qiymati; ishga tushirish momenti M_{yur} asinxron motorni ishga tushirish (qo'zgatish) uchun kerak bo'ladigan moment qiymati; nominal moment M_{nom} — asinxron motorning nominal ish rejimi (nominal kuchlanish U_{iom} , nominal chastota ω_{nom} , nominal yuklamadagi) dagi aylantiruvchi momenti.

Mexanik tavsif quyidagi ifodadan aniqlanadi

$$M = \frac{m \cdot p \cdot U^2 \cdot r_2' / s}{2\pi \cdot f \sqrt{(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2}}, \quad (4.11)$$

bu yerda, m -fazalar soni; p -juft qutblar soni; r_1 va r_2 - stator va rotor aktiv qarshiliklari, om; x_1 va x_2 - stator va rotor reaktiv qarshiliklari, om; f -tok chastotasi, Gs.

Asinxron mashinalarda rotorning aylanish tezligi magnit maydon aylanish tezligidan farq qiladi. Mana shu farqni harakterlovchi kattalik, «sirpanish» deyiladi va bu kattalik quyidagi formula asosida aniqlanadi:

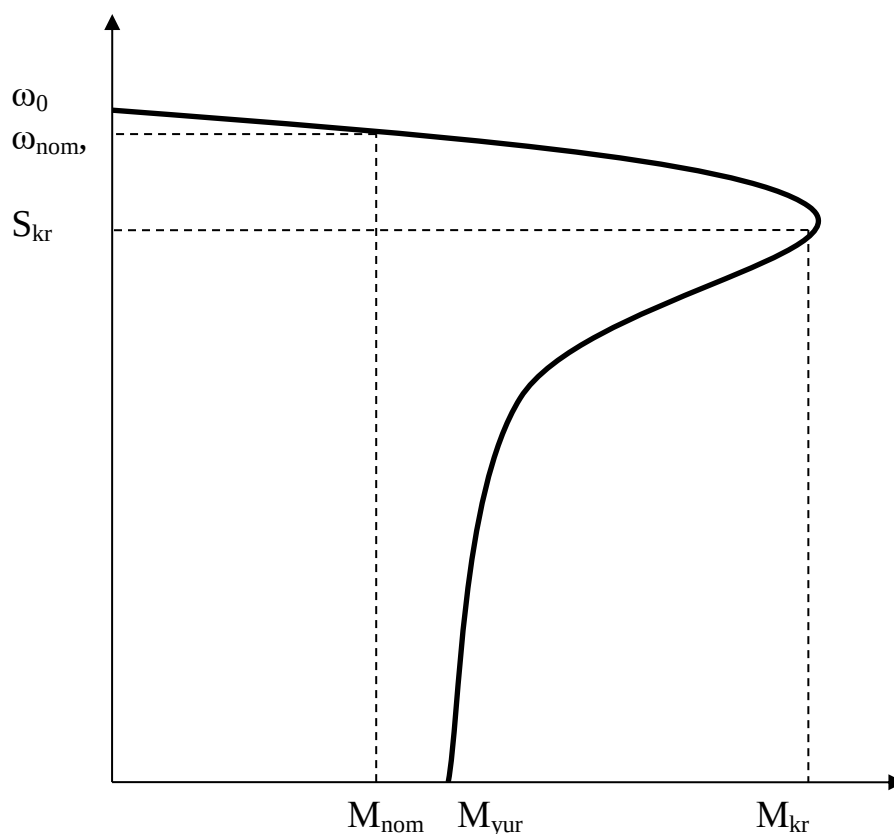
$$S = \frac{n_0 - n_1}{n_0}, \quad (4.12)$$

bunda n_0 - magnit maydonning aylanish tezligi;

n_1 – rotorning aylanish tezligi;

Motorni yurg`izish paytida: $n_1 = 0$; $S = 1$

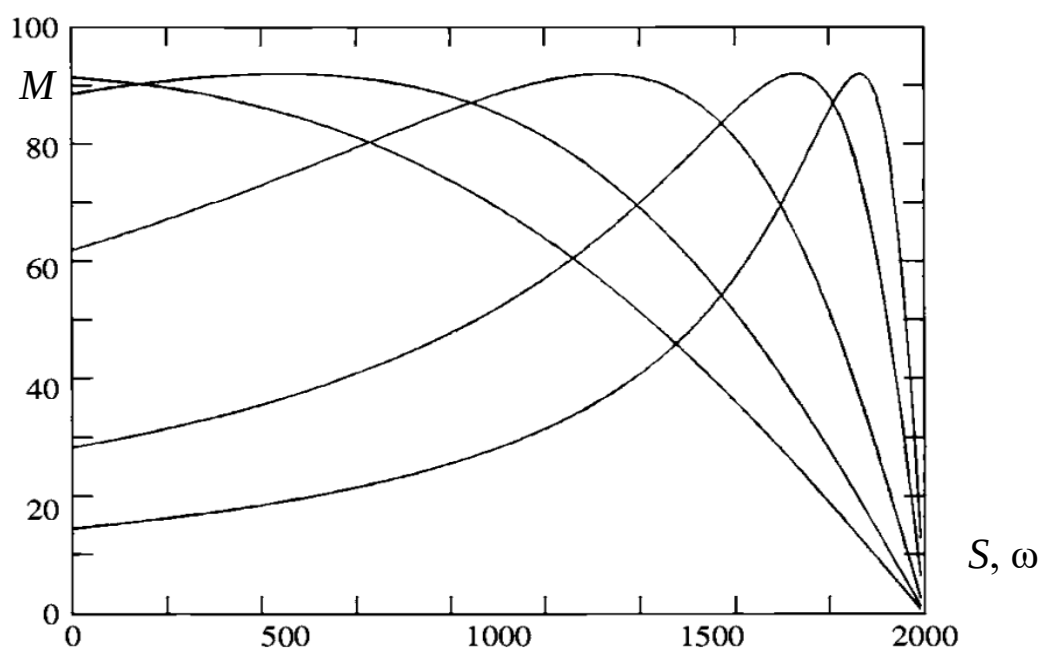
Motorni salt yurish rejimida: $n_0 = n_1$ $S = 0$. Demak, sirpanish $S = 1 \div 0$ gacha o'zgaradi.



4.7-rasm. Asinxron mashinaning mexanik tavsifi.

Motor pasport parametrlarini o'zgartirib olingan mexanik tavsifga sun'iy yoki rostdash tavsifi deyiladi. 4.8 –rasmda rotor aktiv qarshiligi o'gartirilgandagi mexanik tavsiflar keltirilgan [8].

Motor toki, sirpanishi, ist`emol quvvatini, quvvat koeffitsientini va foydali ish koeffitsientini motor validagi foydali quvvatga bog`liqlik grafigiga motorni ishchi tavsiflari deb aytiladi. Ishchi tavsiflar odatda tajribada quriladi. Analitik usuldan foydalanib, ishchi tavsiflarni quramiz. Buning uchun asosiy parametrlardan tashqari quyidagi kattaliklarni aniqlaymiz.



4.8 –rasm. Asinxron motor rotor aktiv qarshiligini o'zgartirilgandagi rostlash tavsiflari.

Agar sinxron mashinalarning stator chulg'amlari kuchlanish U va chastota f_1 bo'lgan elektr tarmog'iga keyingi paragraflarda o'rnatiladigan shartlarga rioya qilgan holda ulansa, chulg'amlardan o'tuvchi uch fazali toklar, asinxron mashinalardagiga o'xshab, stator ichida aylanma magnit maydoni hosil qiladi. Bu maydonning mashinalar qo'zg'atish chulg'amingi toki I_K hosil qilgan maydon bilan o'zaro ta'siri natijasida mashinalarning rotoriga aylantiruvchi elektromagnit moment ta'sir eta boshlaydi. Mashinalar motor bo'lib ishlaganda elektromagnit moment aylantiruvchi moment bo'ladi. Generator sifatida ishlaganda bu moment tormozlovchi moment bo'ladi. Mashinalar turg'un rejimda ishlab turganda uning rotori magnit maydoniga nisbatan qo'zg'almasdir va rotor validagi mexanik yuklamaga bog'liq bo'lmagan holda $n_1=n_2$ chastota bilan aylanadi. Sinxron mashinalar turg'un rejimda ishlaganda quyidagi o'ziga xos xususiyatlarga ega bo'ladi:

a) mashinalar generator yoki motor rejimida ishlaganda uning rotori magnit maydonining aylanish chastotasiga teng bo'lgan o'zgarmas chastota bilan aylanadi;

b) yakor chulg'amida hosil bo'ladigan EYuKning chastotasi rotorning aylanish chastotasiga proporsional bo'ladi;

c) mashinalar turg'un rejimda ishlab turganda uning rotor chulg'amida EYuK hosil bo'lmaydi, mashinalarning MYuK qo'zg'atish toki bilan aniqlanadi va uning ishlash rejimiga bog'liq bo'lmaydi.

NAZORAT SAVOLLARI:

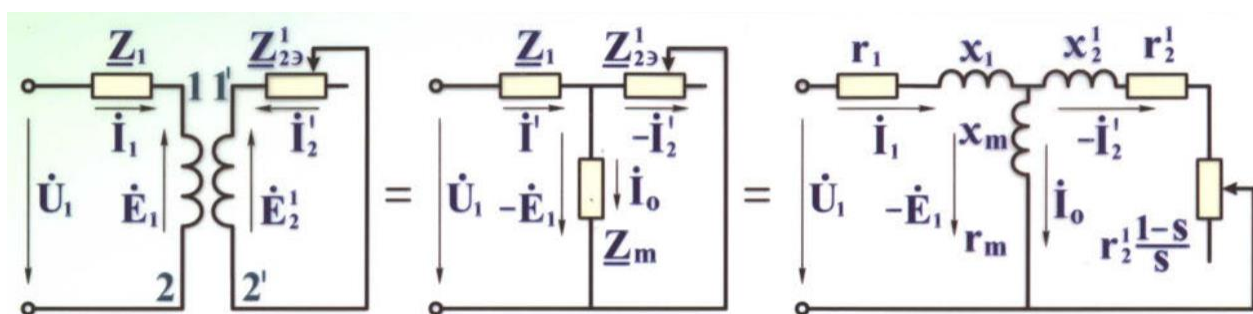
1. Magnitlovchi tok nima?
2. Qarshilik momenti nima?
3. mexanik va ishchi tavsif nima?
4. ishga tushirish momenti va toki nima?

4.3. Ozgaruvchan tok elektr mashinalarining parametrlarini aniqlash metodlari

Kalit so'zlar: *stator aktiv qarshiligi, rotorning reaktiv qarshiligi, magnitlovchi zanjir, o'zaro induktiv qarshiligi, keltirilgan hisobiy sxema, inersiya momenti, zalvorli moment, keltirilgan inersiya momenti, salt ishlash rejimi, elektromexanikaviy vaqt doimiysi, rejim davomati, statik moment, boshlang'ich moment, ikkilama ko'prik sxemasi.*

Asinxron motorning parametrlariga stator va rotorning aktiv va reaktiv qarshiliklari, hamda magnitlovchi zanjirning o'zaro induktiv qarshiligi kiradi. Bu parametrlar loyihalash jarayonida elektr mashinalarning konstruktiv elementlari o'lchamlaridan (chulg'amning uzunligi, kesim yuzasi, material, o'ramlar soni va h.k.) aniqlanadi. Analitik usulda elektr mashinalarning keltirilgan hisobiy sxemalaridan aniqlanadi. Bundan tashqari bu parametrlar tajribaviy usulda: qisqa tutashuv va salt ishlash tajribalarini o'tkazib ham aniqlanadi. Elektr mashinalarning dinamik jarayonlaridagi xossalarini belgilovchi parametrlar ham amaliyotda muhim ahamiyatga ega bo'ladi. 4.8-rasmda asinxron elektr mashinalarni keltirilgan elektr sxemalari ko'rsatilgan. Bu sxemalar orqali elektr

mashinalarning mexanik, elektromexanik, ishchi va boshqa tavsiflari hisoblanadi. Ushbu parametrlar odatda tajriba yoli bilan aniqlanadi. Ushbu parametrlarni analitik usulda aniqlash metodlarini ko'rib chiqamiz.



4.8-rasm. Elektr mashinalarning keltirilgan sxemalari.

Elektr mashinalarning mexanik qismini tavsiflovchi asosiy mexanik parametrlardan biri, bu uning inersiya momenti (I) hisoblanadi. Aylanuvchi jismning inersiya momenti uning massasi bilan (m) inersiya radiusi kvadratining (ρ^2) ko'paytmasiga teng bo'ladi. Elektr yuritmaning aylanuvchi qismlari ko'picha silindr shaklida bo'lib, uning bo'lib, uning inersiya radiusiga teng bo'ladi. YA'ni:

$$J = m \cdot \rho^2 \approx m \cdot R^2; \quad (4.13)$$

bu yerda: - m , R – aylanuvchi qismning massasi (kg) va radiusi (m).

Amaliy hisoblashlarda inersiya momenti o'rniga ko'pincha zalvorli moment olinadi. Inersiya momenti bilan zalvorli moment quyidagicha (GD^2) bog'langan:

$$J = m \cdot R^2 = \frac{G}{g} \left(\frac{D}{2} \right)^2; \quad (4.14)$$

$$\text{kelib chiqadi, bundan } GD^2 = 4gI \quad (4.15)$$

bu yerda D, G – aylanuvchi jismning diametri (m) va og'irligi (N); g – erkin tushish tezlanishi, (m/s^2).

Erkin yuritmani zalvorli va inersiya momentlarini tajribada aniqlash usullaridan biri erkin to'xtatish usulidir. Bu tajribada elektr yuritma salt ishlash rejimida ma'lum bir barqaror aylanish tezligiga olib chiqiladi va motor tarmoqdan

uzilib erkin to'xtatiladi. Bunday to'xtatish faqat ichki ishqalanish kuchlari tufayli sodir bo'ladi. Bu kuchlarni engishga agregatning aylanuvchan qismlarida to'plagan kinetik energiya sarflanadi.

$$A = J_{um} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \quad (4.16)$$

yoki

$$A = P_{ayl.o} t \quad (4.17)$$

bu yerda I_m - aylanuvchi qismlarni motor valiga keltirilgan inersiya momentlarining yig'indisi, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, $P_{ayl.o}$ – salt ishlash rejimidagi aylanish uchun sarflanayotgan quvvat (Vt), $W_{m.s}$ - salt ishlash rejimidagi aylanish tezligi.

(4) va (5) ifodalarni tenglashtirib umumiy inersiya momentini hisoblash formulasini hosil qilamiz:

$$J_{um} = \frac{2 \cdot P_{ayl} \cdot t}{\omega_0^2}; \quad \omega_0 = \pi \cdot \frac{n}{30}; \quad (4.18)$$

bu yerda t_0 – elektromexanikaviy vaqt doimiyligi, S; ekanini hisobga olgan holda (6) ifodani quyidagicha yozish mumkin:

$$J_{um} = \frac{182,6 \cdot P_{ayl} \cdot t_0}{n_0^2}; \quad (4.19)$$

(3) munosabat asosida (8) ifodadan zalvorli momenti hisoblash tenglamasini keltirib chiqaramiz:

$$GD^2 = 4 \cdot g \cdot J_{um} = \frac{7164 \cdot P_{ayl} \cdot t_0}{n_0^2}; \quad (4.20)$$

(8) va (9) tenglamalardagi $P_{ayl.o}$ va t_0 qiymatlar salt ishlash va erkin to'xtash tajribalaridan olinadi.

Elektr mashinalar aylanish tezligi bir barqaror qiymatdan ikkinchi barqaror qiymatgacha ortish yoki kamayish harakteri analitik usulda eksponensial egri

chiziq ko`rinishida ifodalanadi. Elektr mashinalarda o'tish jarayonlari odatda, elektromexanikaviy vaqt konstantasi  $T_m$  bilan tavsiflanadi. Bu miqdor ham eksponensial egri chiziqning parametri bo`lib, yuritma aylanish tezligining o'zgarishini ifodalaydi. to'xtab turgan elektr mashinalarni ishga tushirishda aylanish tezligining o'zgarishi egri chizig'ini quyidagi ko'rinishda ifodlash mumkin:

$$\omega = \omega_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right), \quad (4.21)$$

bu yerda ω_n yurg'izish oxiridagi barqaror aylanish tezligi, s^{-1} .

bu tenglamada T_m -elektromexanikaviy vaqt doymiysi bo'lib quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$T_m = J \frac{R}{k^2 \Phi^2}, \quad (4.22)$$

Bu yerda: J - yuritmaning inersiya momenti;

R -yakor zanjirining qarshiligi.

Faza rotorli asinxron motor dvigatellar uchun:

$$T_m = J \frac{\omega_0 s_{nm}}{M_n}, \quad (4.23)$$

bu yerda s_{nm} - rotor qarshiligiga mos keladigan (ko`rib chiqilayotgan) sun'iy karakteristikada nominal momentga tegishli sirpanish.

Agar, bir barqaror tezlikdan ikkinchi barqaror tezlikka o'tilsa o'tish jarayoni egri chizig'i quyidagi tenglama bilan ifodalanadi:

$$\omega = \omega_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) + \omega_b e^{-\frac{t}{T_m}}, \quad (4.24)$$

t - ning qiymatini kuyib o'tkinchi rejimning istalgan paytidagi tezlikni topish mumkin. Bu tenglamaning ko'rsatishicha, barqaror tezlik cheksiz katta vaqt $t=7$ dan keyin keladi, amalda esa, o'tkinchi rejim $t= 4 T$ vaqt ichida tugallanadi.

Elektromexanikaviy vaqt konstantasi o'tkinchi rejim davomati yuritmaning mexanikaviy inersiyasiga va motorning elektromexanikaviy xossalariga bog'lanish darajasini ko'rsatadi. O'tkinchi rejimlarni elektromexanikaviy vaqt

konstantasi yordamida analitik hisoblash usulini faqat mexanikaviy tavsiflari chiziqli elektrik yuritmalar uchun qo'llash mumkin. Bunday tavsiflar o'zgarmas magnit oqimli mustaqil qo'zg'atiladigan motordan yoki chiziqli uchastkasida ishlaydigan faza rotorli motorda bo'ladi.

(3.128) va (3.129) tenglamalaridan ko'rinib turibdiki, reostat yordamida ishga tushirishda reostatdagi har bir pog'onaning o'z elektromexanikaviy konstantasi bo'ladi. YAkori yoki rotor zanjirining qarshiligi kancha kam bulsa, bu doimiyning qiymati shuncha kichik bo'ladi. Dvigatel aylanish tezligi momenti va tokning o'tkinchi jarayonida o'zgarishi bir T_m miqdorning o'zi bilan aniqlanadi, binobarin, o'zgarmas statik momentda motor momentining o'zgarish egri chizigini quyidagi tenglama bilan ifodalash mumkin:

$$M = M_s \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) + M_b e^{-\frac{t}{T_m}}; \quad (4.25)$$

bu yerda M -motor validagi statik moment. M_{bosh} -boshlang'ich moment.

Agar $M_{bosh} = M_1$, $M = M_2$ deb qabul qilsak, motorning momenti M_1 va M_2 gacha o'zgarganda istalgan pog'onadagi yuritmaning momenti quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$M = M_s \left(1 - e^{-\frac{t_x}{T_m}} \right) + M_1 e^{-\frac{t_x}{T_m}}; \quad (4.26)$$

Bu tenglamani t_x ga nisbatan yechib quyidagi olamiz:

$$t_x = T_m \ln \frac{M_1 - M_s}{M_2 - M_s} \quad (4.27)$$

Elektr mashinalar davriy ravishda sinovlardan o'tkazilib parametrlari aniqlab meyyoriy qiymatlarga solishtirib boriladi. Elektr mashinalarni parametrlarini aniqlash maqsadida 2 xil sinovlar: namunaviy va nazorat savollari o'tkazish ko'zda tutilgan. Namunaviy sinovlar zavodda yangi ishlab chiqarilgan motorlarning birida o'tkaziladi. Bu sinov natijalari nazorat sinovlarida tekshiriladi. Nazorat sinovlariga barcha motorlarda o'tkaziladi. Nazorat sinovlari dasturi

namunaviy sinovlarga nisbatan ancha kichik hajmda o'tkaziladi va asosiy sanaladigan kattaliklar boshqa kattaliklarga bog'liq bo'ladi.

Asinxron motorlarni ekspluatatsiya jarayonida ma'lum muddatda, odatda yilda bir marta ekspluatatsiya sinovlari o'tkaziladi. Bu sinovlarning maqsadi motorni tuzukligini tekshirish hisoblanadi. Bu sinovlardan tashqari yana maxsus va tadqiqot sinovlari o'tkaziladi. Maxsus sinovlar maxsus sharoit va talablarga javob bera olishi tekshirib ko'riladi. Tadqiqot sinovlari asosan yangi motorlarni ishlab chiqish uchun o'tkaziladi [16].

Izolyatsiya qarshiligini o'lchash. Sinovlarni birinchi punktida izolyatsiya korpusga nisbatan mustahkamligi sinaladi. Izolyatsiya qarshiligi 220/350 V li motorlar 500 V li megometr bilan o'lchanadi, 500 V katta kuchlanishli motorlar 1000 V li megometr bilan o'lchanadi. O'lchash kamida 2 marta tok yo'nalishini o'zgartirib bajariladi. Agar natijalar bir xil bo'lsa izolyatsiya normal holatda. Aks holda izolyatsiya nam olgan yoki chang bosgan bo'ladi. Ishchi temperaturada elektr mashinalar izolyatsiyasi quyidagi qiymatdan kam bo'lmasligi kerak:

$$r = \frac{U}{1000 + 0,01 \cdot P} [Mom] \quad (4.28)$$

U – nominal kuchlanishi, V; R – mashinalar nominal quvvati, kVt. Bundan tashqari izolyatsiya qarshiligi barcha holda 0,5 Mom dan kam bo'lmasligi kerak.

Chulg'am izolyatsiya qarshiligi sovuq holatda ya'ni, tashqi muhit temperaturasidan $\pm 3^0$ dan kam farq qilganda o'tkaziladi. Qarshilik oddiy ko'prik sxemasida (Uits tono ko'prigi) yoki ikkilama ko'prik sxemasida o'tkaziladi.

Voltmetr va ampermetr usuli aniqroq talablarga javob beradi. U quyidagi talablar asosida o'tkazilishi kerak.

Voltmetr bevosita o'lchanadigan qarshilik chiqishlariga ulangan bo'lishi kerak.

Ochiladigan kontaktlar iloji boricha yo'q bo'lishi kerak.

O'zgarmas tok manbai sifatida yaxshi zaryadlangan akkumlyator batareyasi bo'lishi kerak.

O'lchov asboblari ko'rsatkichlari alohida kuzatuvchilar bilan olinishi kerak.

Har bir qarshilik bir necha tok qiymatida katta qiymatdan kichik qiymatga qarab o'zgartirib olinishi kerak.

Asbobning shkalasi chegarasini o'zgartirmaslik.

O'lchov asboblarini tuzatish koeffitsientlarini hisobga olish.

Bunda qarshilik quyidagicha aniqlanadi:

$$r = \frac{U}{I} [OM] \quad (4.29)$$

Voltmetr qarshiligini hisobga olganda:

$$r = \frac{U}{I - \frac{U}{r_B}} \quad (4.30)$$

Chulg'am izolyatsiyasini korpusga nisbatan mustahkamligi quyidagi kuchlanishda tekshiriladi:

$$U_C = U_H + 1000B \quad (4.31)$$

U_H -motor nominal kuchlanishi, V.

O'ramlararo izolyatsiya mustahkamligi 30 % nominal kuchlanishdan yuqori kuchlanishda 5 min o'tkaziladi.

Qizish bo'yicha sinash. Elektr mashinalarni qizishi nominal nagruzkada ishlatib tekshiriladi. Bunda barqaror temperatura aniqlanib, atrof – muhit temperaturasidan farqi aniqlanadi. Bu sinash taxminan 2-8 soat atrofida o'tkaziladi. Har 30 minutda temperatura o'lchanadi. Temperatura termometr usulida yoki qarshilik usulida o'tkaziladi. Termometr usulida bevosita termometr o'lchanadigan qismga qo'yiladi. Qarshilik usulida temperatura bilvosita o'lchanadi va izolyatsiyalangan chulg'amlarda qo'llaniladi.

Chulg'amni sovuq holatdagi temperaturasini v_c va qarshiligini r_c deb belgilasak, qizish paytida uning temperaturasi v_k va qarshiligi r_k quyidagi tenglamalar tizimini yechish orqali topiladi:

$$\begin{aligned} r_c &= r_{15} [1 + \alpha(v_c - 15)] \\ r_\kappa &= r_{15} [1 + \alpha(v_\kappa - 15)] \end{aligned} \quad (4.32)$$

Bu yerdan:

$$v_\kappa = \frac{r_\kappa}{r_c} (235 + v_c) - 235 \quad (4.33)$$

Aniqroq natijani quyidagi ifodadan olish mumkin:

$$v_\kappa = v = \frac{r_\kappa - r_c}{r_c} (235 + v_c) + v_c \quad (4.34)$$

Agar sovuq temperaturani $+15^0$ olsak, u holda temperatura farqi:

$$\Delta v = v_\kappa - v_o = 250 \frac{r_\kappa - r_c}{r_{15}} + 15 - v_o \quad (4.35)$$

Bu formuladagi 235 o'rniga 245 va 250 o'rniga 260 yozsak alyuminiy chulg'amlar uchun qo'llasak bo'ladi. O'lchashlar albatta birta asbob bilan o'tkazilishi lozim.

Bundan tashqari temperatura oldindan o'rnatilgan indikator yordamida va sinov paytida o'rnatiladigan indikatorlar yordamida o'lchanadi. Bunda indikator sifatida termoparalar va qarshilik termometlari qo'llaniladi.

FIK ni aniqlash. Motor FIKni aniqlash uchun asosan 2 usul: FIKni bevosita o'lchash va bilvosita o'lchash usullaridan foydalaniladi.

1 – usulda motor validagi mexanik quvvat bevosita o'lchanadi va foydali quvvat:

$$P_{\text{mex}} = w \cdot M \text{ bo'ladi}$$

2 – usulda motordagi quvvat isroflari o'lchanadi va foydali quvvat quyidagi ifodadan topiladi:

$$P_{\text{mex}} = P_1 - \Delta P_\Sigma \quad (4.36)$$

Bu yerda: R – motor iste'mol quvvati, kVt.

ΔR_Σ – motordagi quvvat isroflari.

$$\eta = 100\% \frac{P_1 - \Delta P_\Sigma}{P_1} = 100\% \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\Sigma 2}} \quad (4.37)$$

1. Motor – generator usulida quvvatlarni o'lchash. Bunda motor va generatorni iste'mol quvvatlari o'lchanadi. FIK quyidagicha aniqlanadi:

$$\eta_M = 100 \frac{P_M}{P_r} \quad (4.38)$$

FIK tormozlash usulida, yuklama usulida va alohida isroflarni aniqlash usulida aniqlanadi.

Quvvatlarni o'lchash. Quvvatni o'lchashda bevosita ulash, yarim bevosita ulash, bilvosita ulash usullaridan foydalaniladi. Quvvatni o'lchash uchun 1-Vattmetrli, 2-Vattmetrli va 3-Vattmetrli sxemalardan foydalaniladi.

Aylanuvchi momentni o'lchashda tormozlash usuli, yurg'izishdagi tezlanish bo'yicha, o'zgaras tok generatori usullaridan foydalanish mumkin.

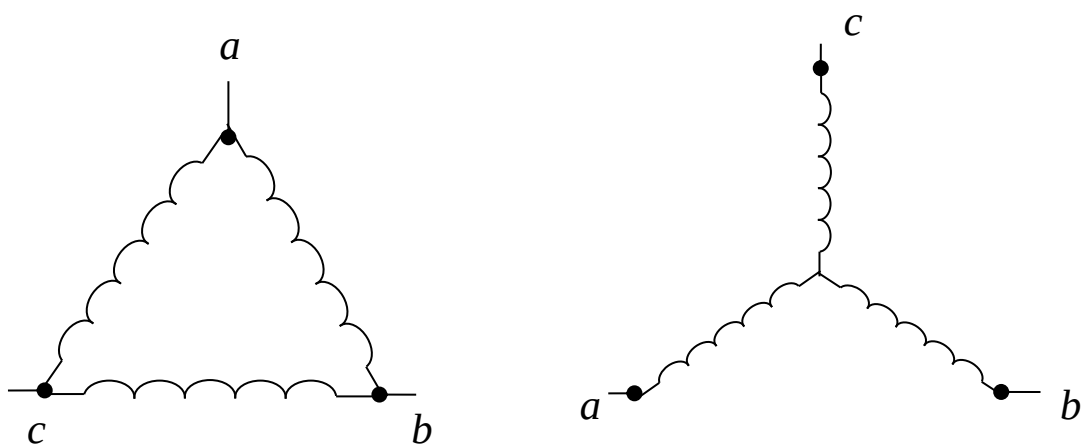
Chulg'am qarshiligini o'lchashdagi alohida holatlar. Agar stator chulg'ami "yulduz" shaklida ulangan bo'lsa, unda chiqishlardan ulangan qarshiliklar 2 ta faza chulg'ami qarshiligiga teng bo'ladi. Ya'ni:

$$\begin{aligned} r_{a\theta} &= r_a + r_\theta \\ r_{\theta c} &= r_\theta + r_c \\ r_{ca} &= r_c + r_a \end{aligned} \quad (4.39)$$

Tenglamalar tizimini yechib qarshiliklarni aniqlaymiz:

$$\begin{aligned} r_a &= \frac{r_{ca} + r_{a\theta} - r_{\theta c}}{2} \\ r_\theta &= \frac{r_{a\theta} + r_{\theta c} - r_{ca}}{2} \\ r_c &= \frac{r_{\theta c} + r_{ca} - r_{a\theta}}{2} \end{aligned} \quad (4.40)$$

Agar faza chulg'amlari "uchburchak" shaklida ulangan bo'lsa, faza chulg'amlari qarshiliklari quyidagi ifodalardan hisoblanadi.



4.9-rasm. Stator chulg'omini ulash sxemalari

$$\begin{aligned}
 r_{aa} &= \frac{1}{\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b + r_c}} = \frac{r_a(r_b + r_c)}{r_a + r_b + r_c}; \\
 r_{bb} &= \frac{1}{\frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_c + r_a}} = \frac{r_b(r_c + r_a)}{r_a + r_b + r_c}; \\
 r_{cc} &= \frac{1}{\frac{1}{r_c} + \frac{1}{r_a + r_b}} = \frac{r_c(r_a + r_b)}{r_a + r_b + r_c};
 \end{aligned} \tag{4.41}$$

Matematik almashtirishlardan so'ng faza chulg'amlarining aktiv qarshiliklari quyidagi ifodalardan hisoblanadi.

$$\begin{aligned}
 r_a &= \frac{1}{2} \left[\frac{4r_{bb}r_{cc}}{r_{bb} + r_{cc} - r_{aa}} - (r_{bb} + r_{cc} - r_{aa}) \right]; \\
 r_b &= \frac{1}{2} \left[\frac{4r_{cc}r_{aa}}{r_{cc} + r_{aa} - r_{bb}} - (r_{cc} + r_{aa} - r_{bb}) \right]; \\
 r_c &= \frac{1}{2} \left[\frac{4r_{aa}r_{bb}}{r_{aa} + r_{bb} - r_{cc}} - (r_{aa} + r_{bb} - r_{cc}) \right];
 \end{aligned} \tag{4.42}$$

Asinxron motor parametrlarini pasport ma'lumotlar asosida hisoblash.
 Asinxron motor parametrlarini o'lchasdan oldin yoki keyin hisobiy qiymatlari bilan taqqoslash maqsadga muvofiq. Asinxron motorni pasport ma'lumotlari bilan parametrlarini hisoblaymiz.

Yurg'izish toki bo'yicha qo'zg'almas rotorli asinxron motorni to'la qarshiligini aniqlaymiz:

$$Z_{K1} = \frac{U_{1HOM}}{\sqrt{3} \cdot k_{\text{top}} \cdot I_{1HOM}} \quad (4.43)$$

Bu yerda: k_{top} -yurg'izish toki karraligi;

I_1 -motor nominal toki, A;

U_{1HOM} -statorning liniya kuchlanishi, V.

$S=1$ bo'lganda rotorning aktiv keltirilgan qarshiligi:

$$r'_2 = \frac{(P_{HOM} + \Delta P_{\text{Mex}}) \cdot \lambda_{\text{ro}}}{3(1 - S_{HOM}) \cdot k^2 \cdot I_{1HOM}^2}, \quad (4.44)$$

bu yerda: λ_{ro} -yurg'izish momenti karraligi;

$S=0$ bo'lganda rotorning aktiv qarshiligi:

$$r'_{20} = \frac{U_{1HOM}^2 (1 - S_{HOM})}{2 \cdot C_1 (P_{HOM} + \Delta P_{\text{Mex}}) \cdot \lambda_{\text{max}} \cdot \left[1 + \frac{C_1}{S_{HOM} \cdot \lambda_{\text{max}}} + \sqrt{\lambda_{\text{M}}^2 - 1} \right]} \quad (4.45)$$

Bu yerda: λ_{M} -maksimal moment karraligi;

ΔP_{Mex} -mexanik isroflar odatda 1 % olinadi;

S_{HOM} -nominal sirpanish.

Stator va rotorning induktiv qarshiligi:

$$X_1 + X_2^1 \approx \sqrt{Z_{K1}^2 - (r_1 - r'_{21})^2} \quad (4.46)$$

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Stator va rotorning aktiv va reaktiv qarshiliklari qanday aniqlanadi?
2. Magnitlovchi zanjirning o'zaro induktiv qarshiligi qanday aniqlanadi?
3. Zalvorli moment va inersiya momenti qanday aniqlanadi?
4. Elektromexanikaviy vaqt doimiysi qanday aniqlanadi?

4.4. Uch fazali asinxron motorlar yuklanish tavsiflari tahlili.

Kalit so'zlar: qisqa muddatli rejim, maxsus motor, uzoq muddatli yuklama, takrorlanuvchi qisqa muddatli yuklama, tormozlab to'xtatish, ekvivalent miqdorlar usuli, ekvivalent tok qiymati, "yulduz" usulida ulash, "uchburchak" usulida ulash

Qisqa muddatli rejimda ishlaydigan ko'pgina mexanizmlarning ishga tushirish momentlari nominalga nisbatan biroz katta bo'ladi. Shu sababli 15, 30 va 60 minutli ish davomiyligiga ega bo'lgan mexanizmlarga mexanik jixatdan pishiqroq ishlangan maxsus motorlar ishlatiladi. Agar uzoq muddatli yuklamaga mo'ljallangan motor qisqa muddatli ish rejimida qo'llanilsa uni bir muncha ko'proq yuklama bilan ishlatish mumkin, lekin bunga motorning o'ta yuklanish bo'yicha zahirasi 1.6 dan kam bo'lmasligi lozim [4]. Ammo bunda ham motordan uni qizishi bo'yicha to'la foydalanilmaydi. Shuning uchun qisqa muddatli ish rejimlariga maxsus shu rejimga mo'ljallangan motor qo'llash tavsiya qilinadi.

Takrorlanuvchi qisqa muddatli yuklamada motor quvvatini tanlashni ko'rib chiqamiz. Bu rejimda ishlovchi motorlar ishlash davomati deb ataluvchi koeffitsient bilan harakterlanadi.

$$PIB \frac{t_{uu}}{t_{uu} + t_0} 100\% = \frac{t_{uu}}{t_{yukl}} 100\%; \quad (4.47)$$

bunda, t_{ish} - motorning yuklama bilan ishlash davri;

t_0 - motorning elektr tarmog'idan ajratilgan yoki yuklamasiz ishlash davri;

- takrorlanuvchi sikl davri bo'lib, uning qiymati

t_{sikl} -10 minutdan ortiq bo'lmaydi deb qabul qilinadi

Demak, bu rejimda motorni ishga tushirish va uni tormozlab to'xtatish jarayonlari tezda takrorlanib turishi sababli uning uchun qo'llaniladigan motor mexanikaviy jihatdan ancha kuchaytirilgan bo'lib katta qiymatli ishga tushirish va maksimal momentlarga ega bo'lishi kerak.

Bunday rejim uchun ham maxsus motorlar chiqarilib ularning parametrlari kataloglarda turli standart PV, ya'ni PV%=15, 25, 40 va 60 lar uchun keltirilgan bo'ladi.

2. Ekvivalent miqdorlar usuli bilan motor quvvatini aniqlash.

Amalda motor quvvatini aniqlashda bir muncha sodda va qulay bo'lgan ekvivalent miqdorlar, ya'ni tok, moment va quvvatning ekvivalent miqdoriga asoslangan usuldan ko'prok foydalaniladi. Motorning o'zgaruvchan yuklamadagi uzoq muddatli ish rejimini ekvivalent yuklama qiymati o'zgarmas bo'lgan uzoq muddatli ish rejimi bilan almashtiriladi. Ekvivalent o'zgarmas yuklamada quvvat isrofining qiymati xaqiqiy rejimdagi quvvat isrofining o'rtacha qiymatiga teng bo'lishi kerak. Ekvivalent tok qiymatini quyidagicha aniqlash mumkin.

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + P_4^2 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}; \quad (4.48)$$

Bunda P_1, P_2, P_3 va P_4 - taxminan tanlangan motorning turli yuklamalar bilan ishlashdagi quvvati hisoblangan ekvivalent tok tanlangan motorning nominal tokidan kichik yoki teng bo'lishi kerak:

$$P_{\text{экв}} < P_{\text{ном}};$$

Bunda o'zgaruvchan tok motori uchun quvvat koeffitsienti turli yuklamalarda ham o'zgarmas bo'ladi deb qabul qilinadi.

Elektr yuritmaning to'g'ri tanlangan motori butun ish davomida u yo'l qo'yilganidan ortiq qizimay ishlashi lozim. Elektr yuritmaning ish rejimlari uning yuklama diagrammalaridan aniqlanadi. Bunday diagrammalar moment, quvvat va tokning vaqtga bog'liqligi egri chiziqlari: $M=f(t)$, $P=f(t)$ va $I_{\text{о.т}}=f(t)$ dan iborat.

Motorning quvvatini qizish shartlariga qarab aniqlash uchun o'rtacha isroflar usuli yoki ekvivalent qiymatlar usulidan foydalaniladi. O'rtacha isroflar usuli murakkabroq bo'lgani uchun, amaliyotda ko'pincha ekvivalent tok (quvvat, moment) usulidan foydalaniladi. Bu usul uzlukli o'zgaruvchan yuklamani, shu yuklama vujudga keltiradigan isroflarga teng isroflar hosil qiluvchi ekvivalent yuklamaga almashtirishga asoslangan. Bu ekvivalent kattaliklar yuklama

diagrammasi asosida hisoblanadi. Ekvivalent qiymatlari bir sikldagi yuklamalarning o'rtacha kvadratik qiymatini hisoblash bilan olinadi, ya'ni:

a) Ekvivalent tok qiymati:

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + I_4^2 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}; \quad (4.49)$$

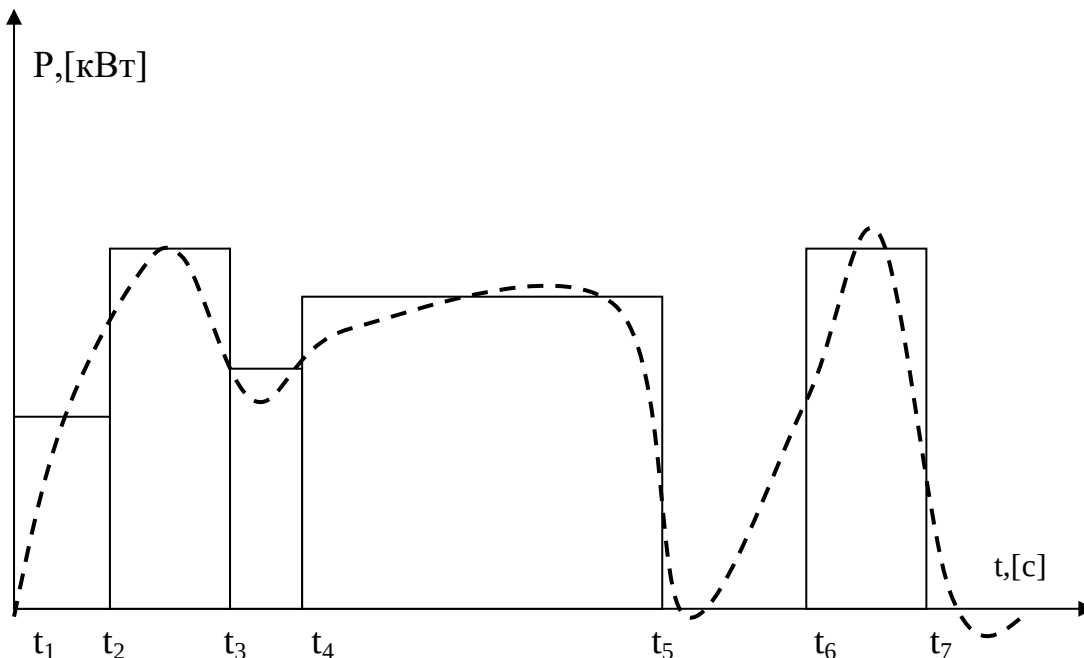
b) Ekvivalent momentning qiymati:

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + M_4^2 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}; \quad (4.50)$$

v) Ekvivalent quvvatining qiymati:

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + P_4^2 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}; \quad (4.51)$$

Bunda P_1, P_2, P_3 va P_4 - taxminan tanlangan motorning turli yuklamalar bilan ishlashdagi quvvati.



4.10 – rasm. O'zgaruvchan yuklamali elektr yuritma yuklama diagrammasi.

Hisoblangan ekvivalent tok tanlangan motorning nominal tokidan kichik yoki teng bo'lishi kerak:

$$P_{\text{экв}} < P_{\text{ном}}; \quad (4.52)$$

bu yerda $I_1, I_2, \dots, I_n$; $(M_1, M_2, \dots, M_n; R_1, R_2, \dots, R_n)$ – elektr motorning $t_1, t_2, \dots, t_n$ – vaqtlarga muvofiq keluvchi toklarning (moment, quvvat) qiymati .

Yuqoridagi ifodalar to'rtburchak ko'rinishli yuklama diagrammalari uchun mo'ljallangan. Odatda ishlab chiqarish mashinalari hosil qiladigan yuklama diagrammalari silliq o'zgaruvchan (4.10-rasmda punktar chiziqda ko'rsatilgan). Bu diagrammalarni to'rtburchak ko'rinishdagi diagrammalarga almashtirib (4.49-4.52) ifodalarni qo'llash mumkin. Motorning nominal quvvati quyidagi shartlar asosida tanlanadi:

$$R_{nom} \geq R_{ek}, \text{ yoki } M_{nom} \geq M_e \text{ yoki } I_{nom} \geq I, \quad (4.53)$$

bu yerda R_{nom} (M_{nom} , I_{nom}) – tanlangan motorning quvvati (momenti, toki.)

Bundan tashqari tanlangan motor yuklama diagrammasidagi eng katta qiymati o'ta yuklanish qobiliyati bilan tekshiriladi, ya'ni

$$M_{max} < \lambda \cdot M_{nom} \quad (4.54)$$

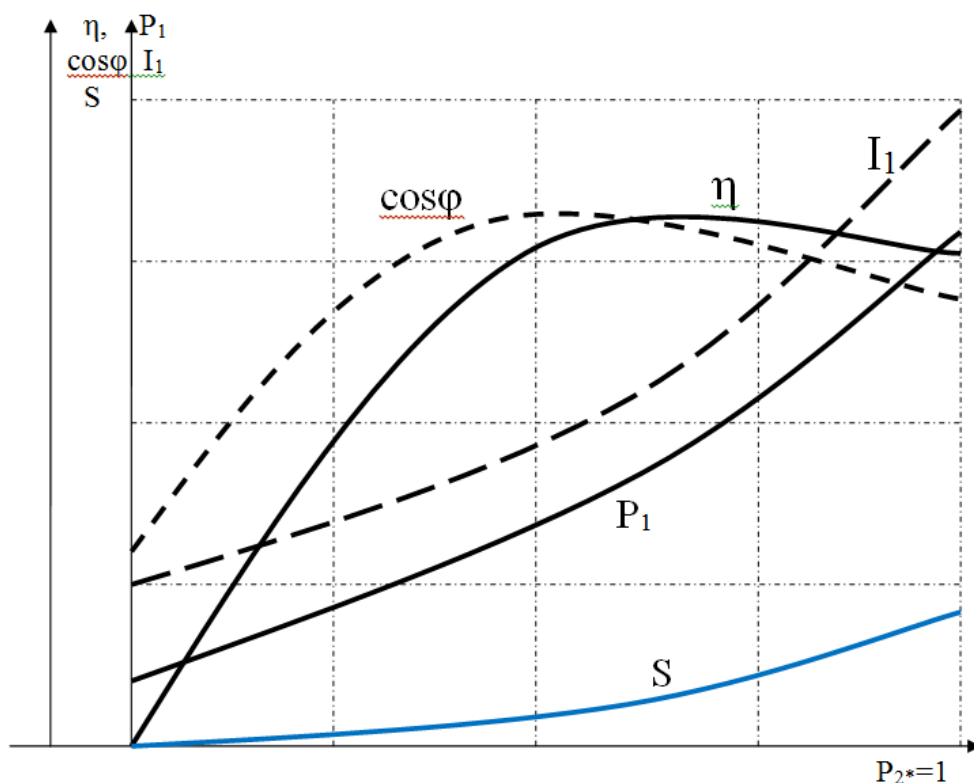
bu yerda λ - o'ta yuklanish koeffitsienti.

Motor toki, sirpanishi, ist'emol quvvatini, quvvat koeffitsientini va foydali ish koeffitsientini motor validagi foydali quvvatga bog'liqlik grafigiga motorni ishchi tavsiflari deb aytiladi. Ishchi tavsiflar odatda tajribada quriladi. Analitik usuldan foydalanib, ishchi tavsiflarni quramiz. Buning uchun asosiy parametrlardan tashqari quyidagi kattaliklarni aniqlaymiz.

Stator chulg'ami izolyatsiyalangan mis simlardan yasalgan bo'lib, stator pazlariga $2\pi/3$ burchak ostida joylashtiriladi. Chulg'amlarning boshi va oxirgi uchlari yuqorida aytilgandek, «chiqishlar qutichasiga» chiqarilgan bo'ladi. 4.12-rasmda chulg'amlarning ulanishi ko'rsatilgan. Chulg'am uchlarining ochiq qoldirilishi uni tarmoq kuchlanishining qiymatiga qarab «yulduz» yoki «uchburchak» sxemada ulashga imkon beradi.

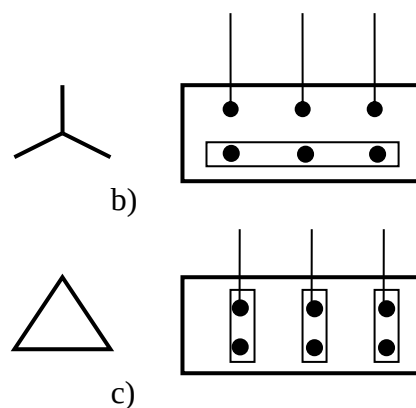
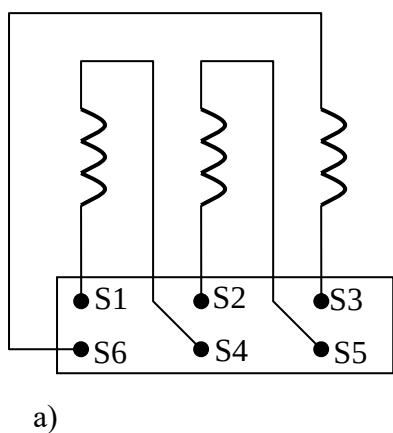
Uch fazali asinxron elektr motor nominal aylanish chastotada, agar uning uchala chulg'ami ham to'g'ri ulangan bo'lsagina o'z valida nominal quvvat hosil qiladi. Uch fazali tok motorining chulg'amlari yulduz usulida to'g'ri ulanganda

hamma chulg'amlarning boshi S1, S2 va S3 tarmoq qismlariga, oxiri S4, S5 va S6 esa, umumiy nolinni nuqtaga ulanadi.



4.11-rasm. Asinxron motorning ishchi tavsiflari.

Chulg'amlardan birortasi noto'g'ri, masalan, oxiri tarmoqqa, boshi esa nolinni nuqtaga ulangan bo'lsa, motor normal ishlamaydi. Uchburchak usulida to'g'ri ulanganda faza chulg'amlarining hamma boshi S1, S2 va S3 tarmoqqa, oxiri esa boshqa fazalarning boshiga ulanadi; birinchi faza chulg'aming oxiri S4 ikkinchi faza chulg'aming boshi S2 bilan, S5 ni S3 bilan, S6 ni esa S1 bilan ulanadi. Uch fazali elektr motor statori chulg'amlarini ulash sxemalari va uning chiqishlarini belgilash 2.18-rasmda ko'rsatilgan.



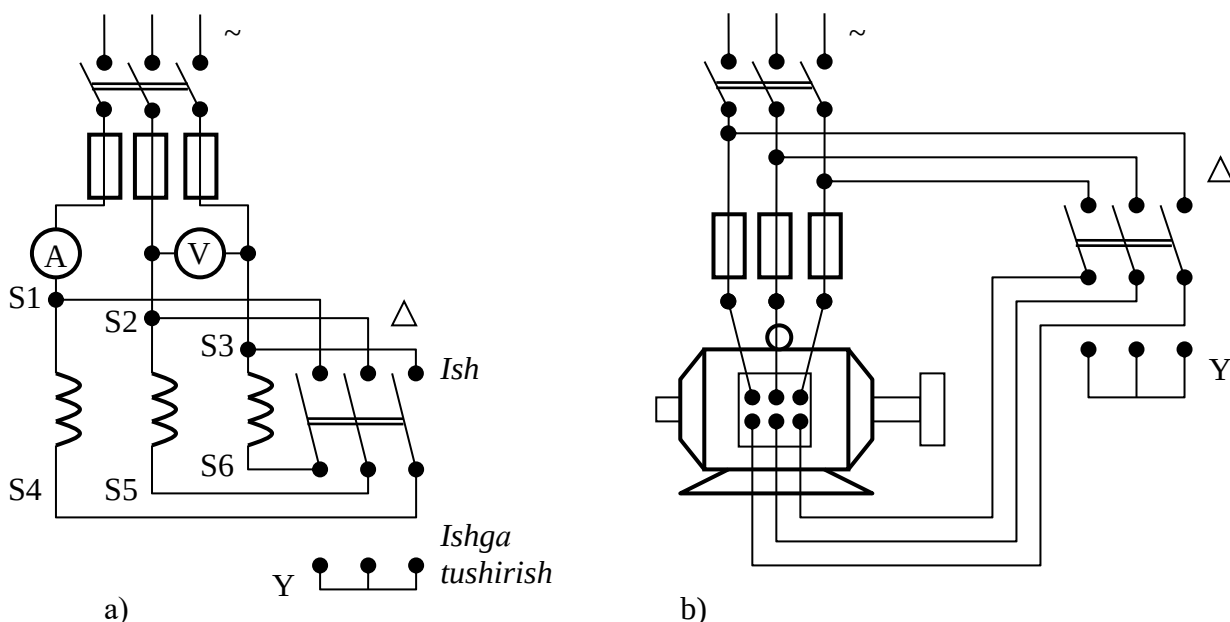
4.12-rasm. Uch fazali asinxron motor stator chulg'amlarini ulash va ularning o'lchamlarini belgilash: a — chiqarilgan shchitga chulg'amlarni ulash sxemasi, b) - chulg'amlarni "yulduz" usulida c)— "uchburchak" usulida ulash. Chiqarilgan chulg'am uchlari: $S1, S2, S3, S4, S5, S6$, —faza chulg'amlarning boshi va oxirlari.

Rotori qisqa tutashtirilgan asinxron motorni ishga tushirish uchun uning chulg'amlarini kuchlanishli tarmoqqa ulash lozim. Ishga tushirish momentida tok kuchi uning nominal qiymatidan 6—7 marta katta bo'ladi va tokning bunday sakrashi kuch transformatorlarida, ta'minlash simlarida kuchlanish isrofining ortishiga olib keladi, bu ayniqsa, dvigatel quvvati transformator quvvati bilan o'lchanadigan darajada bo'lganda sezilarli bo'ladi, shuningdek, transformatorga va birta ta'minlash simiga ulangan cho'g'lanma lampalar va boshqa elektr dvigatellar kuchlanishini pasaytiradi.

Ishga tushirish tokining kuchlanish darajasiga ta'sirini kamaytirish uchun simlarning kesimini hamda transformatorlar quvvatini oshirishga to'g'ri keladi. Ishga tushirish tokini kamaytirish uchun motor chulg'amlari yulduz usulida ulanadi. Bu usuldan chulg'amlari uchburchak usulida ulangan elektr dvigatelning mo'ljallangan kuchlanishi tarmoq kuchlanishiga teng bo'lgandagina foydalanish mumkin. Ishga tushirish momentida dvigatel chulg'amlari yulduz usulida ulanadi. Bu esa stator chulg'amining ekvivalent qarshiligini 1,73 marta oshiradi va shu bilan birga dvigatelning faza chulg'amlariga keladigan kuchlanishni 1,73 marta $\sqrt{3}$ marta kamaytiradi, natijada tarmoqdan olinadigan ishga tushirish toki 3 marta kamayadi.

Dvigatelni ishga tushirish vaqtida uning chulg'amlarini uchburchak usuliga nisbat yulduz usulida ulaganda tok kuchi uch marta kamayishini shunday tushunish mumkin, agar chulg'amlarini uchburchak usulida ulaganda liniya tok kuchi ($I_l = \sqrt{3} I_f$) va yulduz usulida ulaganda esa ($I_l = I_f$) bo'lishidan tushuntirish mumkin. Binobarin, chulg'amlarni yulduz usulida ulaganda har bir fazaga keltirilgan kuchlanish 3 marta kamayadi ($U_f = U_l / \sqrt{3}$), liniya toki chulg'amlarni uchburchak usulida ulaganga nisbatan uch marta kamayadi. Bunda tarmoq kuchlanishi

o'zgarishsiz qoladi. Bu usuldan salt yurg'izishda va ko'pi bilan 25% nominal yuklama ishga tushirishda foydalaniladi. Dvigatelning burchak aylanish tezligi (chastotasi) nominalga yaqinlashganda chulg'amlar uchburchak usuliga qayta ulanadi va dvigatel quvvatgacha yuklanishi mumkin.



4.13-rasm. Stator chulg'amlari yulduz shaklidan uchburchak shakliga almash ulanadigan uch fazali asinxron dvigatelni ulash sxemasi: a—tuzilish sxemasi, b-montaj sxemasi

Hozirgi vaqtda dvigatelni ishga tushirish vaqtida chulg'amlarni yulduz usulidan uchburchak usulida ulashga almashlab ulaydigan, quvvati 0,55 kVt undan yuqori bo'lgan, 380 V kuchlanishda chulg'amlari uchburchak usulida ulangan, to'rtinchi yagona seriyali elektr dvigatellarni ishlab chiqarish o'zlashtirilgan. Dvigatel chulg'amlarini yulduz usulida ulashdan uchburchak usulida ulashga o'tkazishda (37- rasm), shuni nazarda tutish kerakki, kuchlanish $\sqrt{3}$ marta kamayganda ishga tushirish momenti 3 marta kamayadi, bunday holda dvigatelni to'la yuklamada ishga tushirish yaramaydi.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Qisqa muddatli va uzoq muddatli rejimda ishlovchi motorlar qanday tanlanadi?

2. Takrorlanuvchi qisqa muddatli yuklamada ishlovchi motorlar qanday tanlanadi?
3. Ekvivalent miqdorlar usuli nima?
4. Motorni “yulduz” va “uchburchak” usulida qanday ulanadi?

4.5. Uch fazali sinxron motorning nominal kuchlanish va chastotadagi ish rejimlarining tahlili.

Kalit so'zlar: *sinxron motor, chastotaning nominal qiymati, bo'ylama o'qi bo'yicha induktiv qarshiligi, ko'ndalang o'qi bo'yicha induktiv qarshiligi, qo'zg'atish tokining karraligi, chala qo'zg'atish rejimi, kuchlanishni rostlash, kondensator.*

Sinxron motorga berilgan kuchlanish va tok chastotasi nominal bo'lgandagi ish xossalarini ko'rib chiqamiz. Sinxron motorning yuklanish jaryonidagi ish xossalari deganda barqaror rejimda EYuK, aktiv va reaktiv quvvatlar, quvvat koeffisienti, FIK va boshqa asosiy parametrlarning valdagi yukka nisbatan o'zgarishi tushuniladi.

Kuchlanish va chastotalarning nominal qiymatida va sinxron motor validagi yukning o'zgarishida qo'zg'atish tokini mos ravishda rostlab har xil ish rejimlarini o'rnatish mumkin. U yoki bu rejimning tejamliligi to'g'risida mazkur rejimdagi isroflarni bilish zarur.

Bo'ylama o'qi bo'yicha induktiv qarshiligi x_d katta bo'lgan sinxron motorlarda aktiv qiymat kamayganda va qo'zg'atish toki nominal bo'lganda tarmoqqa beradigan reaktiv quvvat bo'yicha harakteristikalar ancha yaxshi bo'ladi. Ammo x_d ning oshishi qo'zg'atish toki nominal bo'lgandagi maksimal momentning karraligi kamayadi.

Sinxron motorning eng qulay ish rejimini o'rnatish uchun aktiv quvvatning umumiy isroflarini aktiv va reaktiv quvvatlarga bog'liq bo'lgan ikkita tashkil etuvchilarga ajratish maqsadga muvofiq bo'ladi.

Sinxron motorlarning $\cos\varphi = 1$ dagi ish rejimida nominal rejimdagiga nisbatan stator va rotor chulg'amlarida isroflar va qizishning pasayishi ro'y beradi.

Elektr tarmog'ining kuchlanishi va chastotasi o'zgarganda sinxron motorning ish xossasiga ta'sirini ko'rib chiqamiz.

Kuchlanish va chastotaning nominal qiymatlariga mos keluvchi rejimda valdagi yuk (M_s) va qo'zg'atish toki I_q ning berilgan qiymatlaridagi barqaror sinxron rejimni tahlil qilamiz. Bunda motorning qo'zg'atish toki tarmoq kuchlanishiga bog'liq emas, lekin chastotaga bog'liq, chunki chastota o'zgarganda motorning aylanish chastotasi o'zga-rib, qo'zg'atish EYuK Y_{eq} o'zgaradi.

Sinxron mashinalarning magnitlovchi toki katta qiymatga egaligidan mashinalar magnit oqimining o'zgarishi va unga bog'liq holda kuchlanish va chastotaning nominal qiymatlariga nisbatan o'zgarishida magnit zanjirining to'yinishi, stator tokiga va reaktiv quvvatiga ta'siri, asinxron motordagiga nisbatan ancha kuchli ta'sir qiladi. Bundan, chastotaning kamayishida va $k_u = U/U_n = \text{const}$ bo'lganda magnitlovchi tok $I_{0\mu} \approx k_u / (k_f x_{ad})$ [bunda $k_f = f / f_n$] oshadi. Bu o'zgarishga faqat k_f ta'sir qilmasdan, magnit oqimining oshishida magnit zanjirining to'yinish darajasi oshganligidan x_{ad} ning kamayishi ham sababchi bo'ladi.

Nominal chastotada kuchlanishning kamayishi, aksincha, magnitlovchi tokning pasayishiga va shu sababli nominal rejimdagiga nisbatan x_{ad} ning oshishiga olib keladi. Bundan chiqadiki, stator tokini va reaktiv quvvatni x_{ad} va $x_d = x_{ad} + x_\sigma$ qarshiliklar o'zgarmas bo'lganda kuchlanish va chastotaga bog'liq holda aniqlashda Pote diagrammasi yordamida aniqlangan haqiqiy qiymatlari bilan solishtirishda jiddiy xatoliklarga olib kelishi mumkin.

Kuchlanish U va chastota f larning o'zgarishi motorning elektromagnit momenti M_{em} ga ta'sir qiladi. Kuchlanish kamayganda kuchlanishning kvadratiga proporsional ravishda kamayadi. Sinxron qarshilik oshganda motorning maksimal momenti va o'ta yuklanish bilan ishlash qobiliyati kamayadi.

Sinxron motorning maksimal momenti kuchlanish U , chastota f va qo'zg'atish toki I_q larning har qanday qiymatlarida qavo oralig'i magnit oqimi F_δ ga va sinxron mashinalar qo'zg'atish tokining karraligi (I_q / I_{qn}) ga proporsional o'zgaradi.

Motorning maksimal momentining qiymati $M_{\max}$ qo'zg'atish tokiga proporsional o'zgarganligidan qo'zg'atish tokini oshirish bilan motor ishining turg'unligini oshirish mumkin. Sinxron motorning chala qo'zg'atish rejimda (ya'ni orqada qoluvchi reaktiv quvvat bilan) ishlash mumkinligi kuchlanishni rostlash uchun niqoyatda muhim hisoblanadi (bu rejimda stator toki nominal tokdan oshmasligi kerak).

Yuk tugunlarining (ya'ni elektr energiya iste'molchilari guruhi)ning turg'un ishlashiga sinxron motorlarning ta'sirini ko'rib chiqamiz. Energiya tizimining bir joyida to'plangan elektr energiya iste'molchilari guruhi yuk tuguni deyiladi. Valdagi qarshilik momenti o'zgarmas bo'lganda (kuchlanishdan bog'liq bo'lmaganda) elektr motorlarining asosiy turg'unlik mezoni asinxron motorlarda elektromagnit momentdan sirpanish bo'yicha yoki sinxron mashinalarda θ burchagi bo'yicha olingan hosilaning musbat bo'lishligidir. Turg'unlikning buzilish shartlari: $dP_q/ds = 0$ yoki $dP_q/d\theta = 0$ bo'lib, asinxron motor uchun $dP_q/ds = 0$ sharti sirpanish $s = s_{kr}$ bo'lganda, sinxron motor uchun esa $dP_q/d\theta = 0$ sharti $\theta = 90^\circ$ (reaktiv momenti nol va $E_q = 0$ deb hisoblaganda) bo'lganda yuz beradi.

Agar bironta konkret yuk uzeldi kuchlanishning to'xtovsiz ravishda pasayishi tufayli iste'molchilar ishining buzilish ehtimoli vujudga kelganda bunday ehtimolni pasytirish choralarini quyidagi tadbirlar orqali amalga oshirish mumkin: Jumladan, bunday yuk uzellarida asinxron motorlar bilan bir qatorda sinxron motorlarni o'rnatish zarur. Sinxron motorlarning quvvatini tanlashda texnik-iqtisodiy mulohazalardan kelib chiqqan holda (eng qulay quvvat koefitsientini saqlash, kuchlanishni rostlash va kuchlanishning to'xtovsiz ravishda pasayishining oldini olish) tanlash kerak bo'ladi. Agar yuritma shartlari bo'yicha sinxron motorlarni o'rnatish mumkin bo'lmasa, sinxron kompensatorni qo'llash kerak

bo'ladi. Kuchlanish pasayishi qisqa muddatli bo'lganidan sinxron mashinalarning qo'zg'atishini avtomatik rostlash qurilma yordamida maksimum qiymatigacha kuchaytirish (jadallashtirish) kerak bo'ladi.

Sinxron va asinxron motorlarning xossalarini taqqoslash. Asinxron va sinxron motorlarni o'zaro tanlashda texnik-iqtisodiy hisoblar asosida amalga oshirish zarur. Bunday motorlarning qaysi biri tejamliligi sarflangan mablag'lardan hamda ekspluatasion harajatlarga bog'liq bo'ladi. Sinxron motorlarning nominal quvvat koeffisientini tanlashda bu jihatni hisobga olish zarur. Nominal $\cos\varphi$ ning kamayishi motorning qimmatlashishiga olib keladi, lekin bunda sinxron motordan reaktiv quvvat olishning imkoniyati paydo bo'ladi.

Quvvat koeffisienti $\cos\varphi = 1$ bilan ishlaydigan rejimda sinxron motorlar kondensator bilan ta'minlangan asinxron motorlardan afzalligi tannarxi va energiya isroflarining kamligi bilan farq qiladi.

Sinxron motor (SM)ning elektromagnit (aylantiruvchi) momenti statorga berilgan kuchlanishga to'g'ri mutanosibdir: $M_{em.SM} \equiv U_1$, asinxron motorniki esa kuchlanishning kvadratiga mutanosibdir: $M_{em.As.M} \equiv U_1^2$. Shuning uchun ham SM lar kuchlanish sezilarli pasaysa ham katta yuklanish qobiliyatini saqlaydi. Bu SM ning afzalligidir. Asinxron motor (As.M) larda esa, kuchlanishning pasayishida uning aylantiruvchi momenti M_{em} keskin kamayib ketishi jiddiy kamchiligidir.

Sinxron motorning FIKi asinxron motornikiga nisbatan yuqori bo'ladi, ammo SM ning tuzilishi qisqa tutashgan As.M nikiga nisbatan murakkabdir hamda SM ning qo'zg'atish chulg'ami uchun o'zgarmas tok manbai kerak bo'ladi. Shu sabablarga ko'ra SM qisqa tutashgan As.M ga nisbatan tannarxi qimmat bo'ladi. SM ni ishga tushirish As.M ni ishga tushirishiga nisbatan murakkabdir. Agar ishga tushirishi va rostlanishi kam bo'ladigan hollarda SM ishlatilsa, uning afzalligi sezilarli katta bo'ladi, masalan, katta quvvatli nasoslar, kompressorlar, ventilyatorlarda.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Sinxron motor tok chastotasi o'zgargandagi tavsiflari qanday o'zgaradi?

2. Sinxron motorni bo'ylama va ko'ndalang o'qi bo'yicha induktiv qarshiligi nima?
3. Sinxron motor qo'zg'atish tokining karraligi qanday aniqlanadi?
4. Sinxron motorni chala qo'zg'atish rejimi nima?

4.6. Sinxron mashinalarning asosiy tavsiflari tahlili

Kalit so'zlar: *salt ishlash tavsifi, qisqa tutashish tavsifi, yakor reaksiyasi, bo'ylama magnitsizlovchi ta'sir, tashqi tavsifi, rostlash tavsif, burchak tavsifi, U–simon tavsifi, ishchi tavsif.*

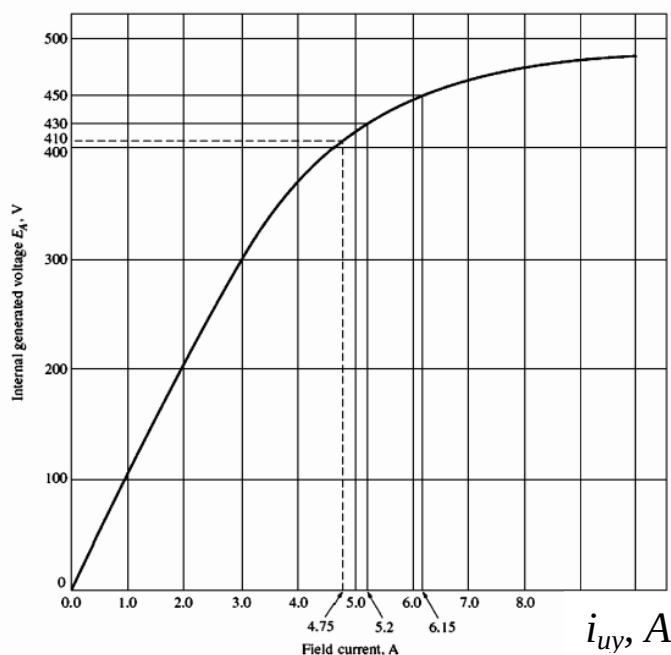
Sinxron mashinalarning ishlashini tadqiq qilishda ularning asosiy tavsiflaridan foydalaniladi. Generatorning tavsiflari, uning ishlash xususiyatlarini tavsiflaydigan kattaliklarni o'zaro bog'lanishini ko'rsatadigan egri chiziqlardir. Sinxron generatorning asosiy tavsiflari uning aylanish chastotasi tokning nominal chastotasiga mos va o'zgarmas, ya'ni $n=n_{IH}=const$ bo'lganda olinadi. Tavsiflar tajriba yo'li bilan generatorning asosiy parametrlarini aniqlashga va uning o'ziga xos muhim xususiyatlarini o'rganishga imkon beradi. Tavsiflarni tajriba o'tkazish yo'li bilan yoki grafik usulda qurish mumkin [20].

Salt ishlash tavsifi. Sinxron generatorlarga uyg'otishda bir valga o'rnatilgan kichikroq o'zgarmas tok generatoridan yoki to'g'rilagichdan foydalaniladi. Statorning har bir fazasi chulg'amlarida hosil bo'ladigan EYuK elektromagnit induksiyasi qonuniga asosan quyidagi formuladan aniqlanadi:

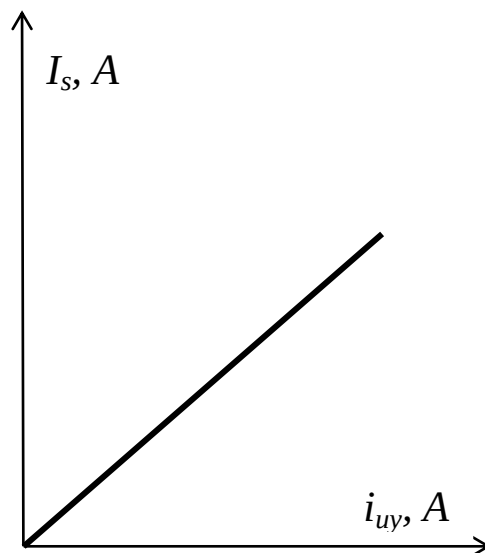
$$E = 4,44 \omega k_{ayl} / F. \quad (4.55)$$

bunda ω — stator bir fazasining chulg'amidagi o'ramlar soni; k_{ayl} — chulg'am koeffisienti; f — o'zgaruvchan tok chastotasi, Gs; F — uyg'otish chulg'amida hosil bo'ladigan magnit oqim, Vb.

EYuK, V



a)



b)

4.14-rasm. sinxron mashinalarning a) salt ishlash, b) qisqa tutashuv tavsiflari.

Sinxron mashinalarni yuklamasiz rejimda uyg'otish tokini chiqish EYuK ga yoki kuchlanishiga bog'liqlik grafigiga salt ishlash tavsifi deyiladi [5]. EYuK asosan, magnit oqimga bog'liq bo'lgani uchun salt ishlash tavsifi magnitlanish egri chizig'i bilan deyarli bir xil bo'ladi [11].

Qisqa tutashish tavsifi. Stator chulg'amidagi qisqa tutashish tokining (I_{1K}) generatorning qo'zg'atish tokiga (i_{uy}) bog'lanishi $I_{1K} = f(i_{uy})$ qisqa tutashish tavsifi deyiladi. Odatda, stator chulg'amining aktiv qarshiligi (R_1) uning induktiv qarshiligidan ancha kichkina bo'ladi, shuning uchun (R_1) e'tiborga olinmaydi. Demak, qisqa tutashishda sinxron generatorning yuklamasi induktiv harakterda bo'ladi. Statorning qisqa tutashish toki induktiv tok bo'lgani uchun generatorda yakor reaksiyasi bo'ylama magnitsizlovchi harakterda bo'ladi [5,6]. Yakor reaksiyasining magnitlovchi kuchi F_a qo'zg'atish chulg'amining magnitlovchi kuchi F_0 ga teskari yo'naladi. Mashinalarning yig'indi magnitlovchi kuchi F_u yuqoridagi magnitlovchi kuchlarning ayirmasi bilan aniqlanadi. Shuning uchun uning qiymati va u hosil qiladigan magnit oqimi ham kichkina bo'ladi. Mashinalarning magnit qutblarida qoldiq magnit induktsiyasining mavjudligi

sababli bu tavsif ham aslida noldan boshlanmaydi. Bu sharoitda stator chulg'amida hosil bo'ladigan $\dot{E}_{1K}$ EYuK yakorning bo'ylama reaksiyasi EYuK $\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_1 x_{ad}$, hamda sochilma EYuK $\dot{E}_{cl} = -j\dot{I}_1 x_{cl}$ bilan to'la muvozanatlashadi, ya'ni $\dot{E}_{1K} = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{cl}$.

Sinxron generatorning tashqi tavsifi. Sinxron generatorning stator klemmalaridagi kuchlanishning yuklama toki bilan bog'lanishi uning tashqi tavsifi deyiladi va u quyidagi sharoitda tekshiriladi:

$$U_1 = f(I_1); \quad n = const, \quad I_K = const; \quad \cos \varphi = const$$

Odatda, generatorning tashqi harakteristikasi yuklama harakteriga qarab har xil bo'ladi. Shuning uchun bu bog'lanish aktiv, induktiv va sig'im qarshilikli yuklamada tekshiriladi. Aktiv qarshilikli yuklamada yuklama toki ortgani sari generatorning kuchlanishi kamaya boradi (1-egri chiziq). Bunda yuklama toki ortib borganda stator chulg'amida kuchlanish pasayishi ortadi va yakor reaksiyasining ko'ndalang o'q bo'yicha yo'nalgan oqimi ham ortadi. Induktiv qarshilikli yuklamada yuklama toki ortgan sari kuchlanish ko'proq kamayadi, chunki bunda yakor reaksiyasining bo'ylama oqimi ko'payadi, natijada uning magnitsizlovchi ta'siri ortadi (2-egri chiziq). Sig'im qarshilikli yuklamada yuklama toki ortgan sari generatorning kuchlanishi ortadi (3-egri chiziq). Bunda yakor reaksiyasining sig'im qarshilikli yuklama hosil qiladigan magnitlovchi ta'siri ko'payadi.

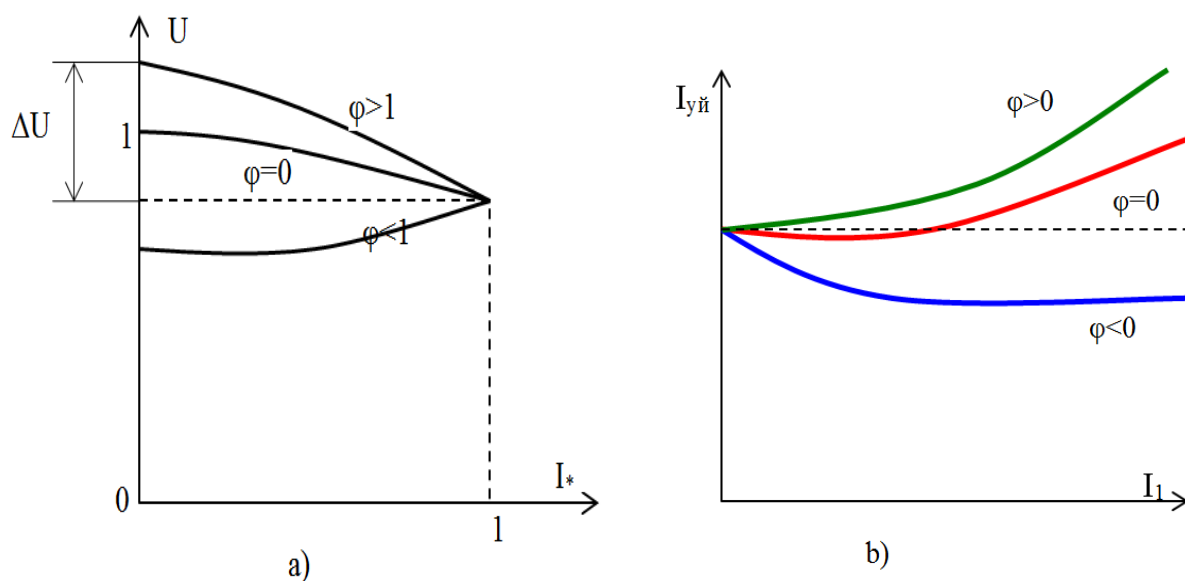
Sinxron generatorning kuchlanishi yuklama o'zgarishiga qarab doimo o'zgarib turadi. Generator kuchlanishining salt ishlashdan to nominal yuklama bilan ishlaguncha o'zgarishi kuchlanishning nominal o'zgarishi deyiladi. Kuchlanishning nominal o'zgarishini tashqi tavsif yordamida aniqlash mumkin. Kuchlanishning bunday o'zgarishi nominal kuchlanishga nisbatan protsent hisobida aniqlanadi:

$$\Delta u\% = \frac{E_0 - U_{1H}}{U_{1H}} \cdot 100\% \quad (4.56)$$

Odatda, sinxron generatorlar aktiv – induktiv harakterli yuklama bilan ishlaydi. Bunda $\cos \varphi = 0,9 \dots 0,85$ bo'ladi. Bu holda kuchlanishning nominal

o'zgarishi $\Delta i\% = 25 \dots 35\%$ bo'lishi kerak. Generatorga ulangan iste'molchilarda nominal kuchlanish bo'lishi uchun u kuchlanishni avtomatik rostlaydigan qurilmaga ega bo'lishi kerak. $\Delta i\%$ ning kichik bo'lishi maqsadga muvofiqdir. Uning qiymatini kamaytirish uchun ayonmas qutbli mashinalarda sinxron induktiv qarshilik x_s qiymatini; ayon qutbli mashinalarda x_d va x_q qiymatlarini kamaytirish lozim. Buning uchun rotor bilan stator orasidagi havo oralig'i kattaroq bo'lishi kerak. Bu o'z novbatida qo'zg'atish chulg'aming magnitlovchi kuchini oshirishga olib keladi, bu esa mashinalarni qimmatlashtiradi.

Rostlash harakteristikasi. Generatorning kuchlanishi $U_1 = U_{1H} = \text{const}$ bo'lganda uning uyg'otish toki I_{uy} ni yuklama toki I_1 ga bog'lanishi, ya'ni $I_{uy} = f(I_1)$ generatorning rostlash tavsifi deyiladi. Bu tavsif $n = \text{const}$ va $\cos\varphi = \text{const}$ bo'lganda tekshiriladi.



4.15-rasm. Sinxron generatorning (a) -tashqi va (b) rostlash tavsiflari

Iste'molchilarda kuchlanish qiymati doim bir xil bo'lishi lozim. Sinxron generatorning yuklama o'zgarganda uning kuchlanishi o'zgarib turadi. Generatorning rostlash tavsifi ham yuklama harakteriga qarab turli ko'rinishda bo'ladi (3.3-rasm, b). Aktiv qarshilikli yuklama qiymati ortgan sari generatorning kuchlanishi kamaya boradi. Kuchlanish kamaymasligi uchun qo'zg'atish tokini ko'paytirish kerak (1-egri chiziq). Induktiv qarshilikli yuklama ortgan sari kuchlanish tezroq kamayadi. Yakor reaksiyasining bo'ylama magnitsizlovchi

ta'sirini kamaytirish uchun, ya'ni kuchlanish bir xilda qolishi uchun qo'zg'atish tokini yanada ko'proq oshirish lozim bo'ladi (2-egri chiziq). Sig'im qarshilikli yuklama ortgan sari yakor reaksiyasining bo'ylama magnitlovchi ta'siri natijasida umumiy magnit oqimi, generatorning kuchlanishi ko'payadi. Bunda kuchlanish bir xilda qolishi uchun qo'zg'atish tokini kamaytirish lozim bo'ladi (3-egri chiziq).

Sinxron mashinalar turg'un rejimda ishlaganda quyidagi o'ziga xos xususiyatlarga ega bo'ladi:

a) mashinalar generator yoki motor rejimida ishlaganda uning rotor magnit maydonining aylanish chastotasiga teng bo'lgan o'zgaras chastota bilan aylanadi;

b) yakor chulg'amida hosil bo'ladigan EYuKning chastotasi rotorning aylanish chastotasiga proporsional bo'ladi;

c) mashinalar turg'un rejimda ishlab turganda uning rotor chulg'amida EYuK hosil bo'lmaydi, mashinalarning MYuK qo'zg'atish toki bilan aniqlanadi va uning ishlash rejimiga bog'liq bo'lmaydi.

Sinxron mashinalarning quvvati va elektromagnit momenti stator va induktor magnit maydonlari o'qlari orasidagi burchak $-\theta$ ga mutanosib o'zgaradi [5, 6]. Sinxron mashinalar aktiv quvvati va elektromagnit momentining ushbu burchakga bog'likligiga burchak tavsif deyiladi.

Ayonmas qutbli sinxron mashinalarning aktiv quvvati:

$$P_{em} = \frac{m \cdot U \cdot E_0}{x_c} \sin \theta; \quad (4.57)$$

Ayon qutbli sinxron mashinalarning aktiv quvvati

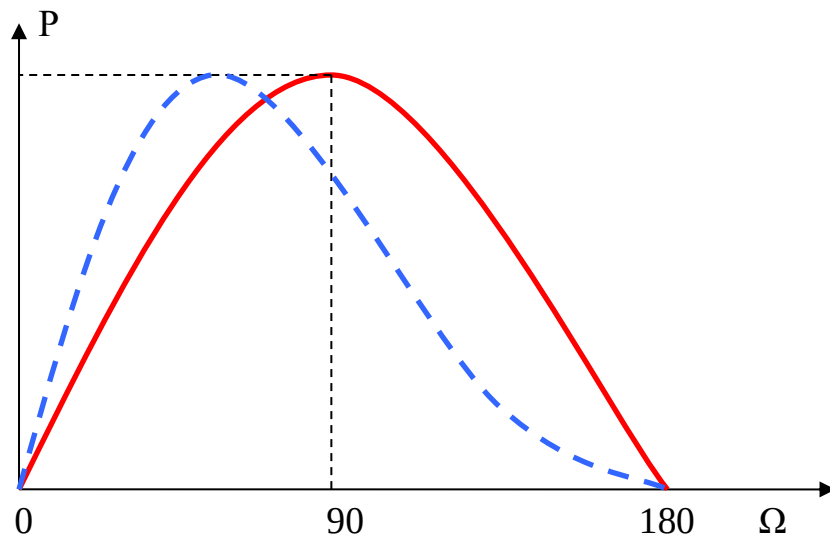
$$P_{em} = \frac{m \cdot U \cdot E_0}{x_d} \sin \theta + \frac{m \cdot U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sin 2\theta; \quad (4.58)$$

Ayonmas qutbli sinxron mashinalarning elektromagnit momenti

$$M_a = \frac{m \cdot U \cdot E_0}{\omega \cdot x_c} \sin \theta; \quad (4.59)$$

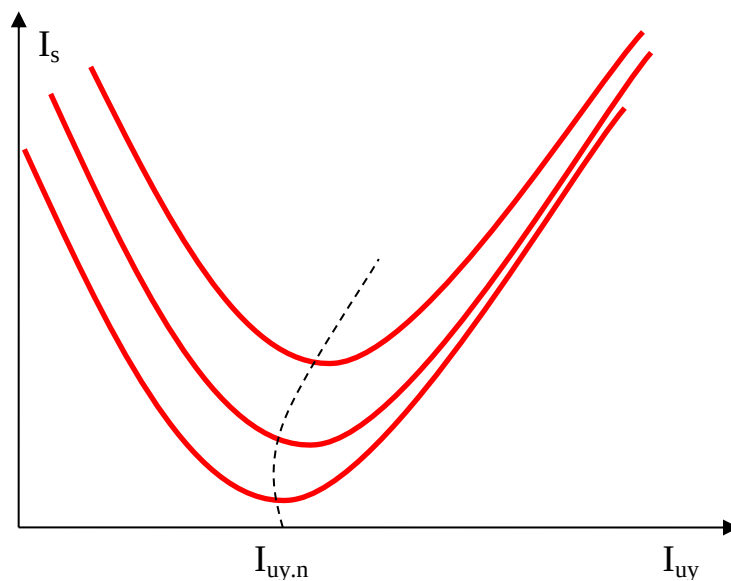
Ayon qutbli sinxron mashinalarning aktiv quvvati

$$M_a = \frac{m \cdot U \cdot E_0}{\omega \cdot x_d} \sin \theta + \frac{m \cdot U^2}{2 \cdot \omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot \sin 2\theta; \quad (4.60)$$



4.16-rasm. Sinxron motorni burchak tavsifi. Punktir-ayon qutbli, uzluksiz-noayon qutbli.

3.19-rasmda uzluksiz chiziqda ayonmas qutbli va punktir chiziqda ayon qutbli sinxron mashinalarning burchak tavsiflari ko'rsatilgan.

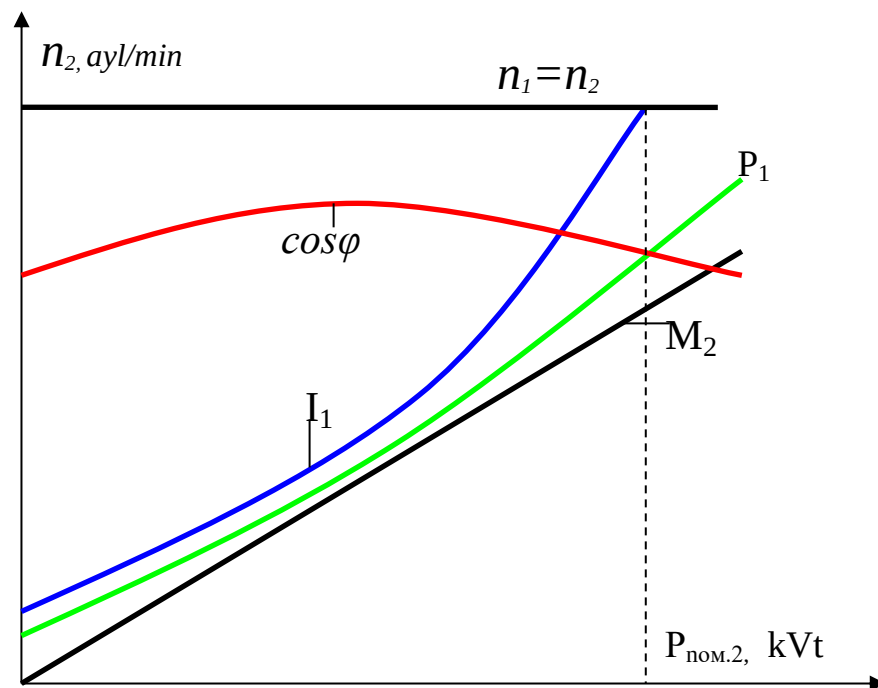


4.17-rasm. Sinxron motornining U–simon

Sinxron mashinalarning quvvati uyg'otish tokini qiymatiga bog'liq. Uyg'otish toki nafaqat quvvatning qiymatiga balki harakteriga ham ta'sir ko'rsatadi. Agar, uyg'otish toki nominal qiymatdan kam bo'lsa, sinxron mashinalar reaktiv quvvat ist'emol qiladi. Agar, uyg'otish toki nominal qiymatdan katta bo'lsa, sinxron mashinalar reaktiv quvvat generatsiyalaydi. 3.20–rasmda uyg'otish

tokini stator tokiga bog'liklik grafigi ko'rsatilgan. Ushbu bog'liklik lotin imlosidagi U harfiga o'xshagani uchun Ushbu tavsif U-simon tavsif deb ataladi. Shunday qilib sinxron mashinalar motor rejimida ishlab turib reaktiv quvvati ist'emoichisi ham, manbai ham bo'la oladi. Uning bu xossasidan reaktiv quvvatni qoplash uchun foydalanishadi. Reaktiv quvvatni qoplash uchun maxsus mashinalar ham qo'llaniladi. Bu mashinalar sinxron kompensatorlar deb aytiladi. Sinxron kompensatorlar podstantsiyalarga o'rnatilib uyg'otish toki boshqarilib tarmoq kuchlanishi rostlanib turiladi [5, 6].

Sinxron mashinalarning ishchi tavsifi deb foydali quvvatni motor toki, quvvati, quvvat koeffitsienti, momenti va aylanish tezligiga bog'liqlik grafigiga aytiladi.



4.18-rasm. Sinxron motorni ishchi tavsiflari.

Ayon qutbli sinxron mashinalarning $U_*=1$ bo'lgandagi tavsifi quyidagi ifodada hisoblanadi

$$P_* = \frac{m \cdot U \cdot E_{0*}}{x_{d*}} \sin \theta + \frac{m \cdot U^2}{2} \left(\frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}} \right) \cdot \sin 2\theta; \quad (4.61)$$

Ushbu tavsif grafigi 4.16 –rasmda punktir chiziq bilan ko'rsatilgan.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Sinxron generatorning salt ishlash va qisqa tutashish tavsifi nima?
2. Qachon yakor reaksiyasi bo'ylama magnitsizlovchi ta'sirda bo'ladi?
3. Sinxron generatorning tashqi va rostlash tavsifi nima?
4. Sinxron motorni burchak, U–simon va ishchi tavsiflari qanday aniqlanadi?

4.7. Turbogeneratorning asinxron va anormal ish rejimlari tahlili

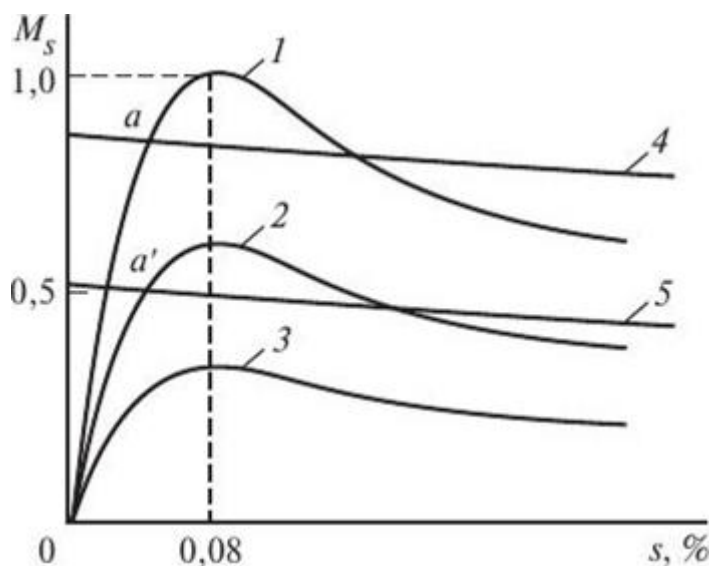
Kalit so'zlar: asinxron moment, bilvosita sovitish tizimiga ega turbogenerator, bevosita kuchaytirilgan sovitish tizimiga ega turbogenerator, demfer chulg'ami, anormal (g'ayritabiiy) rejimi, Generatorlarning o'ta yuklanishda ishlashi, Generatorlarning nosimmetrik (assimetrik) rejimlari, teskari ketma-ketlik toki, dempfer zanjiri, Gidrogenerator, assimetrik rejim.

Sinxron generator qo'zg'alish tizimidagi tok yo'qolganda yoki unung biror bir kritik qiymatidan kichik bo'lganda sinxron momentni hosil qilish uchun yetarli bo'lgan vaqtda asinxron rejimga o'tadi. Birta generatorning asinxron ishlash rejimini ko'rib chiqing. Ushbu rejim qo'zg'alish tizimidagi nosozliklarni aniqlash yoki generatorni zaxira qo'zg'atish chulg'amiga o'tkazish uchun qisqa vaqt ichida ishlashga ruxsat beriladi.

Sinxron elektromagnit moment qo'zg'alish chulg'ami orqali tok o'tganda statorning aylanadigan magnit oqimi va rotorning magnit oqimining o'zaro ta'siri tufayli yuzaga keladi. Barqaror holatdagi rejimda sinxron moment turbina momentiga nisbatan tormozlovchi bo'ladi. U qo'zg'atishni yo'qotish yoki turbinaning momentidan kichik bo'lganda, rotor tezligi oshadi va statorning aylanadigan magnit oqimiga nisbatan rotorning sirpanishi hosil bo'ladi. Natijada, rotorning barcha berk zanjirlarida chastotali sirpanish toklari (stator magnit maydoni tomonidan) hosil bo'ladi. Ushbu toklar tormozlovchi asinxron momentni hosil qiladi va bu momentning maksimal qiymati turbina momentidan katta bo'lsa,

u holda rotorning tezlashishi to'xtaydi va generator asinxron rejimda ishlab tarmoqqa aktiv quvvat beradi [2].

Yuk va sirpanish asinxron moment karakteristikasi va turbinaning parametrlarini boshqarishga bog'liq bo'ladi (4.19-rasm).



4.19-rasm. Generatorlar asinxron momentlarining harakteristikasi:

1 - bilvosita sovitish tizimiga ega turbogenerator; 2 – bevosita kuchaytirilgan sovitish tizimiga ega turbogenerator; 3 – demfer chulg'ami bo'lmagan gidrogenerator; 4 - nominal quvvatdagi turbin momenti; 5 - kamaytirilgan quvvatdagi turbin momenti

Agar asinxron harakteristika M_s yetarlicha tik bo'lsa yoki, ular qattiq bo'lsa, uning maksimal qiymati turbin momentidan oshadi, u holda sirpanishning ozgina ko'payishi bilan bu momentlar bir-biriga teng bo'ladi va generator avvalgi sinxron rejimda ishlagan yuklamasini saqlagan holda ishlaydi [3].

Aks holda (agar generator asinxron momenti qattiq bo'lmasa), momentlar muvozanati bo'lguncha sirpanish sezilarli darajada oshib ketadi. Bunda, turbinaning tezligini boshqarish moslamasi ishlaydi va asinxron rejimda generatorning yuklamasi kamayadi. Generator asinxron momenti harakteristikasining maksimal qiymati turbina momentidan kichik bo'lganda, tashqi ta'sirisiz muvozanat mumkin bo'lmay qoladi va turbina xavfsizligi avtomati ishga

tushgunga qadar generator tezligi oshib boradi. Bunday holda, generator asinxron ishlashi mumkin emas.

Rotorning magnit oqimi pasayganda yoki yo'qolganda, generator tarmoqdan reaktiv quvvatni iste'mol qila boshlaydi, uning qiymatini boshqarib bo'lmaydi, chunki reaktiv quvvat generatorning tarmoqqa ulanish kuchlanishiga, sirpanish va induktiv qarshilikka bog'liq. Bunday holda, stator toki ortadi, bu chulg'amning haddan tashqari yuklanishiga olib keladi va quvvat balansining buzilishi oqibatida tarmoqdagi kuchlanish kamayadi. Generator klemmalaridagi kuchlanishning kamayishi tormozlovchi momentning sezilarli darajada pasayishiga olib keladi (moment kuchlanish kvadratiga mutanosib). Bu, o'z novbatida, generator asinxron ishlash rejimining shartlarini yomonlashishiga olib keladi.

Bilvosita sovitishli turbogeneratorlarda nominal quvvatning 60-70% foizida asinxron rejimda ishlashiga 30 daqiqaga ruxsat beriladi. Bevosita sovutiladigan katta quvvatli turbogeneratorlarning asinxron rejimi bir qator xususiyatlarga ega. Ushbu rejim statorning tirsak qismlarida sochilma magnit maydonlarining ta'siri natijasida aktiv po'lat va generatorning boshqa ferromagnit qismlarida haroratining tez o'sishiga olib keladi. Bunday qismlarning qizishi asinxron rejimda yukni nominalning 40% gacha tezda pasayishni talab qiladi, bunday generatorlarning asinxron rejimida ishlash muddati 15 daqiqadan oshmasligi kerak.

Turbogenerator va gidrogeneratorlarning asinxron momentlarining harakteristikalari bir biridan farqlanadi. Bunda gidrogenerator asinxron momentining maksimal qiymati turbogeneratornikidan past bo'ladi.

Generatorlarning anormal (g'ayritabiiy) rejimlariga quyidagilar kiradi: nominaldan kattaroq stator va rotor toklari bilan ishlash (o'ta yuklama), asinxron rejim, nosimmetrik (assimetrik) rejim va boshqalar.

Generatorlarning o'ta yuklanishda ishlashi. Sinxron generatorning statori va rotorining qisqa muddatli toklari odatda tashqi qisqa tutashuvlar, mashinalar sinxronizmdan chiqib ketishi, motorlarni ishga tushirish, qo'zg'atishni kuchaytirish va boshqa sabablar tufayli yuzaga keladi. Generatorning nominaldan katta bo'lgan

stator va rotor toklari bilan ishlashi, birinchi novbatda, mashinalar chulg'amlari haroratining ruxsat etilganida qiymatlaridan yuqori bo'lishi va ba'zi hollarda (qisqa tutashuv holatlarida) mexanik shikastlanish ehtimoli tufayli xavflidir. O'ta yuklanishning karraligi va davomiyligi qanchalik katta bo'lsa, ushbu xavf ham shunchalik katta bo'ladi. Shuning uchun generatorlarni faqat qisqa muddatli o'ta yuklashga ruxsat etiladi, bunda o'ta yuklanish nafaqat uning davomiyligiga, balki sovitish tizimining turiga ham bog'liq bo'ladi.

Bevosita sovutiladigan mashinalarning chulg'amlari qizdirilganda deformatsiyaga nisbatan sezgirroqdir, shuning uchun bilvosita sovutiladigan mashinalarga qaraganda ular kamroq o'ta yuklashli bo'ladi.

Generatorlarning nosimmetrik (assimetrik) rejimlari. Bunday rejimlar liniyaning biror bir fazasining uzilishi va o'chirilishi, transformator guruhining fazalaridan birining o'chirilishi, elektr tortish ko'rinishidagi bir fazali yuklama, eritish pechlari va hokazolar tufayli kelib chiqishi mumkin. Nosimmetrik (assimetrik) rejimda magnit maydoni natijasida hosil bo'lgan teskari ketma-ketlik toki, stator chulg'amini qo'shimcha ravishda qizishiga olib keladi. Teskari ketma-ketlikning magnit maydoni rotorga nisbatan ikki marta katta bo'lgan sinxron tezlik bilan aylanadi, natijada qo'zg'atish chulg'amida, dempfer zanjirlida, shuningdek rotor tanasida va uning tirsak zonasida (klin, tish, bandaj) 100 Gts chastotali tokni hosil qiladi. Ushbu toklar rotorning qismlarida qo'shimcha qizishga olib keladi. Bundan tashqari, teskari ketma-ketlik magnit maydoni teskari ishorali momentni hosil qiladi, bu moment esa mashinalarning mexanik kuchlanishi va tebranishini keltirib chiqaradi.

Ikki chastotali toklarning issiqlik (termik) ta'siri turbogeneratorlar uchun juda xavflidir, chunki ularning rotorini yaxlit elektr po'latdan qilingan va katta yusaga ega, shuning uchun bu toklarning qiymati katta bo'ladi. Chastotaning kattaligi tufayli toklar rotor tanasida siqiladi va tish klinida hamda bandaj halqa orqali tutashadi. Shuning uchun, eng katta qizish rotorning tirsak zonalarida sodir bo'ladi. Rotor chulg'amining qo'shimcha qizishi uning izolyatsiyasi uchun

xavflidir. Turbogeneratorlarda qo'shimcha mexanik kuchlanish kichik bo'lib, amalda ular mexanik mustahkamlikka ta'sir qilmaydi.

Gidrogeneratorlarda rotorning massiv qismlari yo'qligi sababli, ikki chastotali toklar va shunga mos ravishda rotorning qizishi turbogeneratorlarga qaraganda kamroq bo'ladi. Odatda, bu toklar dempfer chulg'amning qizishiga olib keladi. Hidrogeneratorlardagi qo'shimcha mexanik kuchlanishlar va tebranishlar turbogeneratorlarga qaraganda katta bo'ladi.

Generator uzoq muddatli assimetrik rejimda ishlayotganda, eng ko'p yuklangan stator fazasidagi tok, chulg'amning ruxsat etilgan qizishi shartiga asosan nominaldan oshmasligi kerak. Bundan tashqari, rotorning eng ko'p qizigan qismlarining harorati, shuningdek generatorning mexanik kuchlanishlari va tebranishlari ruxsat etilgan qiymatlardan oshmasligi kerak. Odatda, turbogeneratorlar uchun teskari ketma-ketlik tokning maksimal qiymatlari rotorning tirsak zonasining qizishi bilan belgilanadi, gidroenergetiklar uchun esa, dempfer tizimini va qo'zg'atish chulg'ami, stator chulg'ami va konstruktiv qismlarining yo'l qo'yilgan qizishi bilan belgilanadi, Shuningdek yuqoridagilarga muvofiq, uzoq assimetrik rejimda bilvosita sovitish tizimli gidrogeneratorlar uchun stator fazalaridagi tokning eng katta farqi 15-20% dan, bevosita sovitish tizimiga ega gidrogeneratorlar va barcha turbogeneratorlarda bu farq 10% dan oshmasligi kerak. Shu bilan birga, teskari ketma-ketlik toki taxminan quyidagiga teng: bilvosita sovitish tizimiga ega bo'lgan gidrogeneratorlar uchun to'g'ri ketma-ketlik tokining 7,5 - 10% ga, bevosita sovitish tizimiga ega gidrogeneratorlar va barcha turdagi turbogeneratorlar uchun esa 5 - 7% ni tashkil etadi. Tarmoqdagi assimetrik qisqa tutashuv rejimida, ruxsat etilgan qisqa tutashuv vaqti t quyidagi formuladan aniqlangan qiymatidan oshmasligi kerak

$$I_{*2}^2 t \leq B / I_n^2$$

bu yerda I_{*2} - teskari ketma-ketlik toki (nominal tokka nisbatan); I_n – generatorning nominal toki, A; V - Djoul integrali, $A^2 \cdot s$. B / I_n^2 ning qiymati bilvosita sovitish tizimiga ega bo'lgan gidrogeneratorlari uchun – 45 s; statori bilvosita va rotor

bevosita sovitish tizimiga ega bo'lgan turbogeneratorlar uchun – 15 s, 800 MW quvvatgacha bo'lgan statori va rotori bevosita sovitish tizimiga ega bo'lgan turbogeneratorlar va gidrogeneratorlar uchun – 8 s, 800 MW quvvatdan katta bo'lgan statori va rotori bevosita sovitish tizimiga ega bo'lgan turbogeneratorlar uchun – 6 s tashkil etadi.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Bilvosita va bevosita kuchaytirilgan sovitish tizimiga ega turbogenerator nima bilan farq qiladi?
2. Generatorlarning demfer chulg'ami nima uchun kerak?
3. Generatorlarning anormal va o'ta yuklanishda ishlashi qanday bo'ladi?
4. Generatorlarning nosimmetrik (assimetrik) rejimlari qaysilar?
5. Teskari ketma-ketlik toklar nima?

5-BOB. ELEKTROMEXANIKAVIY TIZIMLARNING TEXNIK - IQTISODIY KO'RSATKICHLARI TAHLILI

5.1. Elektr mashinalarning energetik ko'rsatkichlari tahlili

***Kalit so'zlar:** quvvat isrofi, iqtisodiy samara, asosiy isroflar, qo'shimcha isroflar, elektr isroflar, shamollatish isroflari, mexanik isroflar, qo'shimcha isroflar, to'la sirt isroflar, pulsatsiyatlanuvchi isroflar, intensivlash, energiya tejamkorlik*

Sanoat korxonalarida elektr energiyasi asosiy iste'molchisi elektr motorlar hisoblanadi. Sex ichki ta'minotida isroflar 9-10% ni tashkil etadi. Shundan 12-15% sex tarmoqlarida, 85 % esa asinxron motorlarda (AM) isrof bo'ladi. AM dagi isrofning 43,6% stator chulg'amida, 12,7 % rotor chulg'amida, 43,7% motorning magnit tizimida bo'ladi [15]. Shunday qilib, elektr motorlardagi isroflar elektr energiyasini uzatish va taqsimlashdagi umumiy isroflar bilan tenglashadi. Shuning uchun, korxona miqyosida rejalashtirilgan motorlarda elektr energiyasini tejash tadbirlari katta iqtisodiy samarani ta'minlaydi.

Korxona elektr energiyasi ist'emolining asosiy qismi texnologik mashinalarning elektr yuritmalariga to'g'ri keladi. Elektr yuritmalarni ish rejimlarini optimallashtirish va rostlanadigan elektr yuritmalardan foydalanish katta iqtisodiy samaradorlikni ta'minlaydi. Elektr energiyasi isroflarini kamaytirish elektr uskunalari ta'mirlash sifatini yaxshilash orqali ham erishish mumkin. Bu tadbir ayniqsa motorlarni ta'mirlashda yaxshi samara beradi. Bunda ta'mirdan keyin motorning parametrlari pasport parametrlarga yaqinlashtirish lozim. Sifatsiz ta'mirdan chiqqan motorlar reaktiv quvvatni ko'p ist'emol qilishi, chulg'amlar nosimmetrik bo'lishi, salt ishlash tokini oshib ketishi tufayli ko'p isroflarni keltirib chiqaradi. Bunday salbiy holatlar motor chulg'amini nominal kattaliklaridan boshqa kattaliklarga (nominal tezlik, kuchlanish, chastota o'zgarganda) qayta o'raganda qo'shimcha hisoblashlar bajarish talab etiladi.

Elektr mashinalar elektr energiyasini mexanik energiyasiga aylantirib beruvchi qurilma bo'lib motor validagi foydali mexanik quvvatdan tashqari energiya o'zgarishlar isrof hisoblanadi. Mashinalardagi isroflar fizik mohiyatiga ko'ra, ichki, issiqlik va mexanik energiyalar ko'rinishida yo'qotiladi. Bundan tashqari elektr energiyasini bir ko'rinishi bo'lgan reaktiv quvvat isrofi shaklida ham energiya yo'qotiladi.

Elektr mashinalarning asosiy energetik ko'rsatkichlari: foydali ish ko'effitsienti (FIK) va quvvat ko'effitsienti ($\cos\phi$) hisoblanadi. Foydali ish ko'effitsienti mashinalardagi isroflarga qiymatiga bog'liq bo'ladi. Shuning uchun isroflar tarkibi va kelib chiqish sabablari tahlili muhim amaliy ahamiyatga ega bo'ladi.

Elektr mashinalarga uzatilgan quvvatning bir qismi o'tkazgichlarni qizishiga, magnit o'zagni qayta magnitlanishiga, sovitish uchun havo oqimini hosil qilishga, aylanuvchi qismlarni havo bilan ishqalanishiga va podshipniklardagi ishqalanishiga sarf bo'ladi. Bu quvvatlar yig'indisini isroflar deb aytiladi. Chunki, elektromexanik jarayonda bu quvvat yo'qoladi.

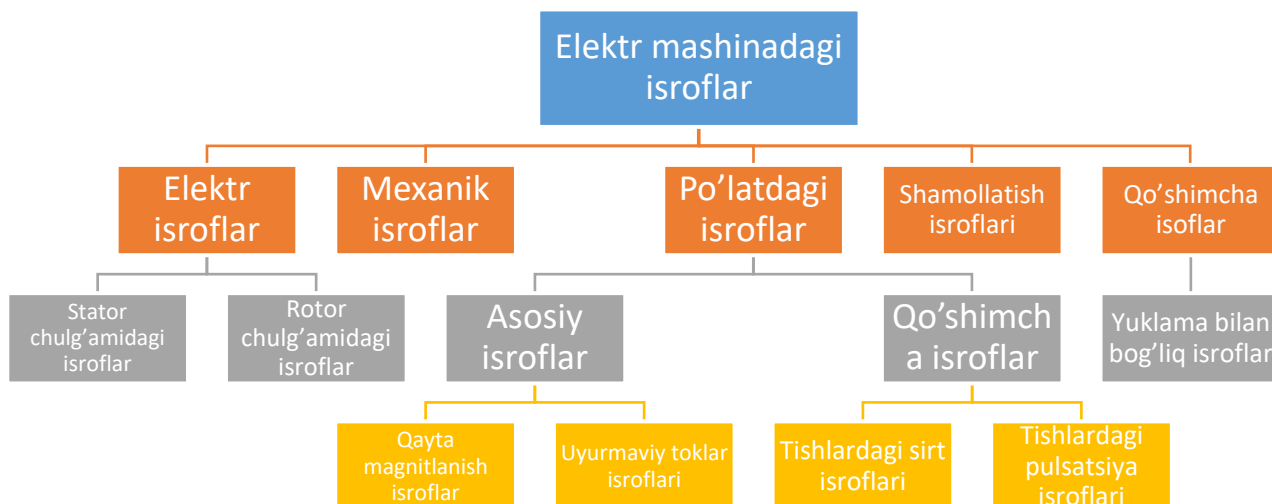
Elektr mashinalardagi isroflar asosiy va qo'shimcha isroflarga bo'linadi. Elektr mashinalardagi asosiy isroflar quyidagilarga bo'linadi: po'latdagi isroflar (asosiy va qo'shimcha), elektr isroflar, shamollatish, mexanik va qo'shimcha isroflarga bo'linadi. Asosiy isroflarga chulg'amlardagi, sirpanuvchi kontaktlardagi, magnit o'zakdagi, shamollatishdagi va mexanik isroflar kiradi. Magnit o'tkazgich po'latidagi asosiy isroflar gisterezis (qayta magnitlanish) isroflari va uyurmaviy toklar isroflaridan tashkil topgan. Bu isroflar po'latni tipidan, po'lat varaqning qalinligidan, qayta magnitlanish chastotasidan va induksiyadan bog'liq bo'ladi. Bundan tashqari isroflarni hosilbo'lishiga boshqa omillar: po'lat varaqlarni yig'ish va zichlashtirish texnologiyasi ham ta'sir ko'rsatadi. Bu isroflarni aniq hisoblash amalda imkoniyati yo'q. Shuning uchun amalda ko'p yillik tajribalarga asoslangan emperik matematik ifodalardan foydalaniladi.

Elektr mashinalardagi isroflarni asosiy tashkil etuvchilari. Asinxron mashinalardagi pulatning asosiy isroflari faqat stator uchun hisoblanadi. Chunki, rotor nominal tezlikda aylanganda qayta magnitlanish chastotasi teng bo'lib juda kichik qiymatga ega bo'ladi va hisobga olinmaydi. Mashinalarni yurg'izishda rotor toki chastotasi stator toki chastotatsiga yaqin bo'ladi. Asinxron motorni yurg'izish jarayoni boshida rotordagi qayta magnitlanish isroflari statordagi bilan deyarli bir xil bo'ladi. Ammo, yurg'izish jarayonidagi elektr isroflar bu isroflarga nisbatan bir necha marotaba katta bo'lgani sababli hisoblashlarga deyarli ta'sir qo'rsatmaydi.

Po'latdagi qo'shimcha isroflar salt ishlash rejimida vujudga keladigan sirt isroflari va pulsatsiyalanuvchi isroflarga bo'linadi. Sirt isroflari havo oralig'ida magnit oqim o'zgarishlaridan vujudga keladigan induksiya hosil bo'ladi. Bu o'zgarishlar havo oralig'ining kengligini o'zgarishiga va stator va rotordagi pazlar soniga bog'liq bo'ladi. Bu o'zgarishlar tufayli tishlarni havo oralig'i bilan tutashgan yuzalarida uyurmaviy EYUK lar va toklar paydo bo'ladi. O'z novbatida qo'shimcha isroflarni keltirib chiqaradi. Pulsatsiyalanish chastotasi tishlar soni va rotorni aylanish tezligiga proporsional bo'ladi. Tish kallagini yuqori yuzasida uyurmaviy toklar hosil qiladi va isroflarni vujudga keltiradi.

Asinxron mashinalar elektr energiyasini mexanik energiyasiga aylantirib beruvchi qurilma bo'lib motor validagi foydali mexanik quvvatdan tashqari energiya o'zgarishlar isrof hisoblanadi. Mashinalardagi isroflar fizik mohiyatiga ko'ra, ichki, issiqlik va mexanik energiyalar ko'rinishida yo'qotiladi. Bundan tashqari elektr energiyasini bir ko'rinishi bo'lgan reaktiv quvvat isrofi shaklida ham energiya yo'qotiladi.

Asinxron mashinalardagi asosiy isroflar quyidagilarga bo'linadi: po'latdagi isroflar (asosiy va qo'shimcha), elektr isroflar, shamollatish, mexanik va qo'shimcha isroflarga bo'linadi.



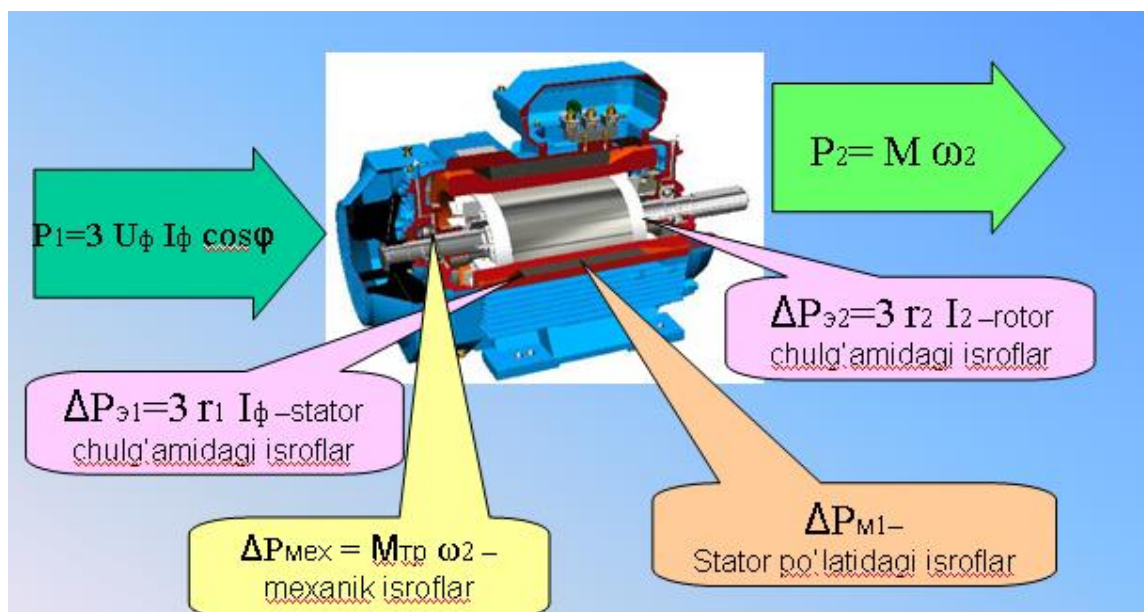
5.1-rasm. Elektr mashinalardagi quvvat isrofining tashkil etuvchilari.

Elektr mashinalarga uzatilgan quvvatning bir qismi o'tkazgichlarni qizishiga, magnit o'zagni qayta magnitlanishiga, sovitish uchun havo oqimini hosil qilishga, aylanuvchi qismlarni havo bilan ishqalanishiga va podshipniklardagi ishqalanishiga sarf bo'ladi. Bu quvvatlar yig'indisi isroflar deb aytiladi. Chunki, elektromexanik jarayonda bu quvvat yo'qoladi.

Asinxron mashinalardagi isroflar po'latdagi isroflar (asosiy va qo'shimcha), elektr isroflar, shamollatish, mexanik va qo'shimcha isroflarga bo'linadi.

Elektr mashinalarga uzatilgan quvvatning bir qismi o'tkazgichlarni qizishiga, magnit o'zagni qayta magnitlanishiga, sovitish uchun havo oqimini hosil qilishga, aylanuvchi qismlarni havo bilan ishqalanishiga va podshipniklardagi ishqalanishiga sarf bo'ladi. Bu quvvatlar yig'indisini isroflar deb aytiladi. Chunki, elektromexanik jarayonda bu quvvat yo'qoladi.

Elektr mashinalardagi isroflar asosiy va qo'shimcha isroflarga bo'linadi. Asosiy isroflarga chulg'amlardagi, sirpanuvchi kontaktlardagi, magnit o'zakdagi, shamollatishdagi va mexanik isroflar kiradi.



5.2-rasm. Asinxron motor konstruktiv elementlaridagi isroflar.

Magnit o'tkazgich po'latidagi asosiy isroflar gisterezis (qayta magnitlanish) isroflari va uyurmaviy toklar isroflaridan tashkil topgan. Bu isroflar po'latni tipidan, po'lat varaqning qalinligidan, qayta magnitlanish chastotasidan va induktsiyadan bog'liq bo'ladi. Bundan tashqari isroflarni hosil bo'lishiga boshqa omillar: po'lat varaqlarni yig'ish va zichlashtirish texnologiyasi ham ta'sir ko'rsatadi. Bu isroflarni aniq hisoblash amalda imkoniyati yo'q. Shuning uchun amalda ko'p yillik tajribalarga asoslangan emperik matematik ifodalardan foydalaniladi.

Asinxron mashinalardagi po'latdagi asosiy isroflar faqat stator uchun hisoblanadi. Chunki, rotor nominal tezlikda aylanganda qayta magnitlanish chastotasi tok chastotasiga teng bo'lib u juda kichik qiymatga ega bo'ladi va hisobga olinmaydi. Mashinalarni yurg'izishda rotor toki chastotasi stator toki chastotatsiga yaqin bo'ladi. Asinxron motorni yurg'izish jarayoni boshida rotordagi qayta magnitlanish isroflari statordagi bilan deyarli bir xil bo'ladi. Ammo, yurg'izish jarayonidagi elektr isroflar bu isroflarga nisbatan bir necha marotaba katta bo'lgani sababli hisoblashlarga deyarli ta'sir qo'rsatmaydi.

Stator po'latidagi asosiy isroflar quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$P_{n.ac} = p_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (k_{\Delta a} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\Delta z} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) \quad (5.1)$$

bu yerda $r_{1,0/50}$ -po'latning solishtirma quvvat isrofi, Vt/kg; k_{da} va k_{dz} -magnit o'zak yuzasi bo'ylab magnit oqimni notekis taqsimlanishini e'tiborga oluvchi koeffitsientlar. Quvvati 250 kVt gacha bo'lgan mashinalar uchun $k_{da} = 1,6$ va $k_{dz} = 1,8$, katta quvvatli mashinalar uchun $k_{da} = 1,4$ va $k_{dz} = 1,7$ ga teng qilib olinishi tavsiya etiladi; m_a va m_{z1} -stator yarmosi va tishlarining massasi, kg; B_a va B_{z1} -po'lat yarmosidagi va tishlardagi magnit induktsiyasi qiymati, Tl.

Statordagi to'la sirt isroflari:

$$P_{c1} = p_{01}(t_1 - b_{u1}) \cdot Z_1 \cdot l_c, \quad (5.2)$$

Rotordagi to'la sirt isroflari:

$$P_{c2} = p_{02}(t_1 - b_u) \cdot Z_2 \cdot l_c, \quad (5.3)$$

Bu yerda Z_1 va Z_2 –statordagi va rotordagi tishlar soni; t_1 -stator tush bo'linmasi kengligi, m; l_c -magnit o'zak uzunligi, m; b_u -shlits kengligi, m.

Pulsatsiyalanuvchi isroflarni hisoblash uchun yana tishning o'rta kesimida magnit induktsiyasi quyidagi ifodadan aniqlanadi

Mexanik isroflar, Vt

$$P_{Mex} = K_T \cdot (n/10)^2 \cdot D_a^4 \quad (5.4)$$

bu yerda n -rotor aylanishlari soni, ayl/min; D_a -rotor diametric, m.

Nominal rejimdagi qo'shimcha isroflar ist'emol quvvatga nisbatan 0,5 % miqdorida olinadi. Ya'ni,

$$P_{qo'sh} = 0,005 \cdot P_1 \quad (5.5)$$

Motor chulg'amidagi elektr isroflar stator va rotor chulg'amlari uchun alohida hisoblanadi. Stator chulg'amidagi isroflar, Vt:

$$P_{e1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1, \quad (5.6)$$

Faza rotorli asinxron motorning rotor chulg'amidagi isroflar, kVt

$$P_{e1} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \quad (5.7)$$

Rotori qisqa tutashgan asinxron motorning rotor chulg'amidagi isroflar, Vt

$$P_{e2} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 = Z_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 = m_1 \cdot I_1'^2 \cdot r_2' \quad (5.8)$$

Elektr mashinalardagi isroflarni kamaytirish tadbirlarini ko'rib chiqamiz. Kam yuklangan elektr motorni nominal quvvatini kamaytirish mumkin. Elektr motorlarni quvvatini o'zgartirish orqali olingan samara:

$$\Delta W_9 = [(\Delta P_1 - \Delta P_2) + k(\Delta Q_1 - \Delta Q_2)] \cdot t \quad (5.9)$$

bu yerda, ΔR_1 va ΔR_2 -almashtiriladigan va almashadigan motorlarni quvvat isrofi, kVt; ΔQ_1 va ΔQ_2 reaktiv isroflar, kVar; t -uskunaning yillik ishlash vaqti, soat.

Reaktiv quvvat tufayli vujudga keladigan isroflar motor qancha kam yuklantirilgan bo'lsa shuncha ko'p bo'ladi [97, 125]. Masalan, quvvati 5,5 kVt bo'lgan asinxron motor 100 % yuklamada $\cos \varphi = 0,8$; 50 % yuklamada $\cos \varphi = 0,65$; 30 % yuklamada esa $\cos \varphi = 0,51$ ni tashkil etadi. SHu narsa aniqlanganki, har 1 kVar reaktiv quvvat 1% dan 15% gacha aktiv quvvat isroflarni vujudga keltiradi.

Elektr mashinalarni ishlatishda nafaqat yuklama qiymatiga va ish rejimiga e'tibor berish kerak, balki fazalar nosimmetrikligiga ham e'tibor berish kerak. Agar bu nosimmetriklilik 15 % dan oshsa ist'emoilchilarni bir fazadan boshqa fazaga o'tkazish tavsiya etiladi.

Bu tadbirlar, eng avvalo, energiya samaradorlik talablariga javob bermaydigan texnologik mashinalarning elektr jihozlarini almashtirish bilan bog'liq tadbirlar kiradi. Kam yuklangan motorlar yoki transformatorlarni almashtirish, FIK past bo'lgan uskunalarni zamonaviy samarador uskunalarga almashtirish, tarmoq kuchlanishi va kesim yuzasini o'zgartirish, reaktiv quvvatni qoplash shular jumlasidandir.

FIK yuqori bo'lgan motorlarni almashtirish bo'yicha tahliliy ma'lumotni aktiv quvvat isrofini quyidagi ifodadan aniqlab olish mumkin:

$$\Delta P_a = P \frac{1-\eta}{\eta} \quad (5.10)$$

bu yerda, R va η - elektr motorni yuklamasi va FIK. Motorlar aktiv quvvat isroflari taqqoslanib samarador variant aniqlanadi.

Korxonalarda ko'pgina motorlar to'la yuklamada ishlamaydi. Bu holda yuklama 50-60 % bo'lsa, motor quvvatini kichikroq quvvatga o'zgartirish maqsadga muvofiq [43]. O'zgaruvchan yuklamada esa motor quvvati ko'pincha hisobiy maksimal yuklamaga qarab tanlanadi. Agar maksimal cho'qqi yuklama 2 marta katta bo'lsa maxsus usullar qo'llash tavsiya etiladi. Masalan, bunda aktiv quvvatdan tashqari reaktiv quvvat iste'moli ham ancha kamayadi.

Tejab qolingani elektr energiyasi bunda quyidagicha aniqlanadi [37]:

$$\Delta W_g = (\Delta P + k\Delta Q) \cdot \Delta t \quad (5.11)$$

bu yerda, ΔR va ΔQ - motorlarni aktiv va reaktiv quvvat isroflari farqi, kVt; kVar; t -uskunaning «yulduz» sxemada yillik ishlash vaqti, soat.

Motor chulg'amlarini «uchburchak» sxemadan «yulduz» sxemaga o'tkazishda aktiv quvvat isrofini kamayishini quyidagi ifodadan aniqlash mumkin:

$$\Delta P_a = \frac{P}{\eta_{\Delta}} - \frac{P}{\eta_Y} = \frac{P}{\eta_{\Delta}} \cdot \left(\frac{\eta_Y - \eta_{\Delta}}{\eta_Y} \right) \quad (5.12)$$

Reaktiv quvvat iste'molining kamayishi:

$$\Delta Q = \frac{P}{\eta_{\Delta}} \operatorname{tg} \varphi_{\Delta} - \frac{P}{\eta_Y} \operatorname{tg} \varphi_Y \quad (5.13)$$

Aktiv quvvatning umumiy kamayishi:

$$\Delta R_{\Sigma} = k \cdot \Delta Q + \Delta P \quad (5.14)$$

bu yerda, k -har bir kVar reaktiv quvvatga to'g'ri keladigan aktiv quvvat isrofi, kVt/kVar.

Tejab qolingani elektr energiyasi:

$$\Delta W_e = \Delta R_{\Sigma} \cdot \Delta t \quad (5.15)$$

Korxonalarda ishlab chiqarishni intensivlash, mahsulot hajmini ko'paytirish orqali nisbiy elektr energiyasi sarfini kamaytiradi va energiya tejamkorligini ta'minlaydi. Bu energiya miqdori quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$\Delta W = (\beta_1 - \beta_2) \cdot W_0 \cdot P_m \cdot T_m \quad (5.16)$$

bu yerda, W_0 -nisbiy energiya sarfi; T_m – mashinalarning ishlash vaqti, soat; P_m - mashinalar iste'mol qiladigan quvvat, kVt; β_1, β_2 -nisbiy energiya sarfi kamayishini belgilovchi koeffitsientlar bo'lib, quyidagi ifodadan aniqlanadi [37]:

$$\beta = \frac{k_h \cdot k_m + \alpha(1 - \eta_{MH})}{1 + \alpha(1 - \eta_{MH})k_u \cdot k_m} \quad (5.17)$$

bu yerda, k_n -yuklama koeffitsienti, k_t -mashinalarning foydalanish koeffitsienti, α -mashinalarning konstruksiyasiga bog'liq koeffitsient $\alpha=0,7-0,9$; η_{mn} -mashinalarning nominal FIK; k_t -koeffitsienti quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$k_t = T_m / (T_m + T_0) \quad (5.18)$$

T_m va T_0 - mashinalarning ishlash va salt ishlash vaqti.

Elektr uskunalarni salt ishlashini cheklash orqali tejab qolingan elektr energiyasini quyidagi ifodadan hisoblash mumkin:

$$\Delta W_s = P_c \cdot \Delta t \quad (5.19)$$

bu yerda, R_s -uskunaning salt ishlashdagi iste'mol quvvati, kVt; Δt -bir yilda kamaytirilgan salt ishlash vaqti.

Elektr motorlarning quvvatini o'zgartirish orqali olingan samara:

$$\Delta W_s = [(\Delta P_1 - \Delta P_2) + k(\Delta Q_1 - \Delta Q_2)] \cdot t \quad (5.20)$$

bu yerda, ΔR_1 va ΔR_2 -almashtiriladigan va almashadigan motorlarning quvvat isrofi, kVt; ΔQ_1 va ΔQ_2 reaktiv isroflar, kVar; t -uskunaning yillik ishlash vaqti, soat.

Reaktiv quvvat tufayli vujudga keladigan isroflar motor qancha kam yuklantirilgan bo'lsa shuncha ko'p bo'ladi [97, 125]. Masalan, quvvati 5,5 kVt bo'lgan asinxron motor 100 % yuklamada sos $\varphi=0,8$; 50 % yuklamada sos $\varphi=0,65$; 30 % yuklamada esa sos $\varphi=0,51$ ni tashkil etadi. SHu narsa aniqlanganki, har 1 kVar reaktiv quvvat 1% dan 15% gacha aktiv quvvat isroflarni vujudga keltiradi.

Ishlab chiqarishda tamirlangan asinxron motorlarning salmog'i ortib bormoqda. Ta'mirlash texnologiyasiga to'la amal qilinmaganligi tufayli motor ish rejimi parametrlari pasport parametrlariga muvofiq kelmaganligini kuzatish

mumkin. Motorning energetik ko'rsatkichlari pasayib ketganligi tufayli korxonadagi isroflar miqdoriga sezilarli ta'sir ko'rsatmoqda. Ta'mirdan keyingi asosiy kamchiliklar motor chulg'amini noto'g'ri hisoblash yoki noto'g'ri o'rash bilan bog'likligini kuzatish mumkin.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Elektr mashinadagi asosiy va qo'shimcha isroflarni aytib bering
2. shamollatish, mexanik va qo'shimcha isroflar nima?
3. Motorlarda energiya tejamliligini oshirish tadbirlari

5.2. Tezligi rostlanadigan elektr mashinalari ish rejimlarining analitik tahlili.

***Kalit so'zlar:** elektr yuritma, tiristorli elektr yuritmalar, tiristorli o'zgartkich-o'zgarmas tok motori, tiristorli kuchlanish o'zgartkichi – asinxron motor, tiristorli chastota o'zgartkichi-asinxron motor, o'zgarmas tok generatori-o'zgarmas tok motori, dinamik mexanik tavsif, reostatli boshqariladigan asinxron motor, o'zgarmas tok bo'g'inli chastota o'zgartkichi.*

Elektr mexanikasi sohasini ustivor rivojlanuvchi yo'nalishlaridan biri elektr mashinalar tezligini boshqarish samaradorligini oshirish hisoblanadi. Tezligi rostlanadigan elektr yuritmalarning barqaror va dinamik jarayonlarini oqilona tashkil etish uchun quyidagilar taklif etiladi:

- ✓ Loyihalanayotgan elektr yuritmaning asosiy parametrlarini hisoblashda aniqliligini oshirish uchun zamonaviy avtomatlashtirilgan loyihalash tizimlaridan foydalanish;
- ✓ Vujudga keladigan shikastlanishlarning oldini olish - Elektr yuritma asosini tashkil etuvchi elektr motorlardagi mexanik va issiqlik shikastlanish natijasida elektrotexnik nosozliklar vujudga keladi.
- ✓ Boshqarish apparatlari, chastota va kuchlanish o'zgartkichlarni tanlash imkoniyati aniqligining va ishonchligining oshishi. Har qanday boshqaruv apparatlari va yarim o'tkazgichli o'zgartgichlarni tanlashda tok kuchi muhim ahamiyat kasb etadi. Ishga tushurish jarayonida tok kuchini oshib ketishi

natijasida ba'zan tanlangan apparatlar va o'zgartgichlar ishdan chiqishiga sabab bo'ladi.

- ✓ Tarmoq kuchlanishini pasaytirganda ishga tushurish momentining kamayishini oldini olish;

- ✓ Agar elektr yuritmaning texnologik jarayoniga to'g'ri keladigan bo'lsa ishga tushurish, tezlikni o'zgartirish va tormozlash jarayoni to'g'ri va iqtisodiy samarador variantlar tanlanishi kerak;

- ✓ Chastota o'zgartkichlardan foydalanilsa, dinamik jarayonlarning silliq o'tishiga erishiladi;

- ✓ Mexanik yuklamalarning kamayishi natijasida, elektr motor qismlarining eskirishi sekinlashadi;

- ✓ Ulanib – uzishlar soni va kommutatsiya toklarining kamayishi hisobiga kommutatsion apparatlar eskirishi sekinlashadi;

- ✓ Elektr motorning ishga tushish toki kamayadi;

- ✓ Elektr motorning ishlash muddati 1,5 – 2 marta oshadi;

- ✓ Remontga ajratiladigan harajatlar kamayadi;

- ✓ Elektr motorlarning o'ta yuklanishdan, faza uzilishidan va kuchlanish pasayishidan (ortishidan) himoyalarning effektivligi ortadi;

- ✓ Elektr energiya iqtisod qilinadi.

Sanoatda qo'llaniladigan boshqariladigan elektr mashinalarning ish samaradorligi ko'rsatkichlari tahlil qilamiz. Tezligi rostlanadigan elektr yuritmalar asosan yuqori texnologiyali va qimmatbaho mahsulot chiqaruvchi texnologik dastgohlarda ishlatiladi. Ammo, oxirgi yillarda bunday talab qo'yilmagan elektr yuritmalarda enregiya tejamkorlik nuqtai nazaridan boshqariladigan elektr yuritmalar qo'llanilib kelmoqda. Bu elektr yuritmalarda tezlik rostlanmasa ham motor validagi yuklama o'zgarishiga qarab muvofiq ravishda motorga keladigan energiya oqimi o'zgartirilib turiladi. Sanoatda qo'llaniladigan va boshqariladigan elektr yuritmalarni elektr mashinalardagi isroflarga ta'siri orqali ko'rib chiqamiz. Dastlab elektr yuritmalarning umumiy tasnifini ko'rib chiqamiz.

Tiristorli elektr yuritmalar eng keng tarqalgan rostlanadigan elektr yuritmalar bo'lib uning asosan quyidagi turlari mavjud :

1. Tiristorli o'zgartkich-o'zgarmas tok motori (TO'-O'TM). Bunda tiristorli o'zgartkich o'zgaruvchan tokni o'zgarmas tokka o'zgartirib chiqish kuchlanishini noldan nominalgacha o'zgartiradi.

2. Tiristorli kuchlanish o'zgartkichi – asinxron motor (TKO'-AM). Bunda tiristorli kuchlanish o'zgartkichi o'zgaruvchan tokni chiqish kuchlanishi o'zgaradigan o'zgaruvchan tokka aylantirib beradi. Tezligi rostlanadigan asinxron motorlarning ko'pchiligi ushbu elektr yuritma tizimida ishlaydi.

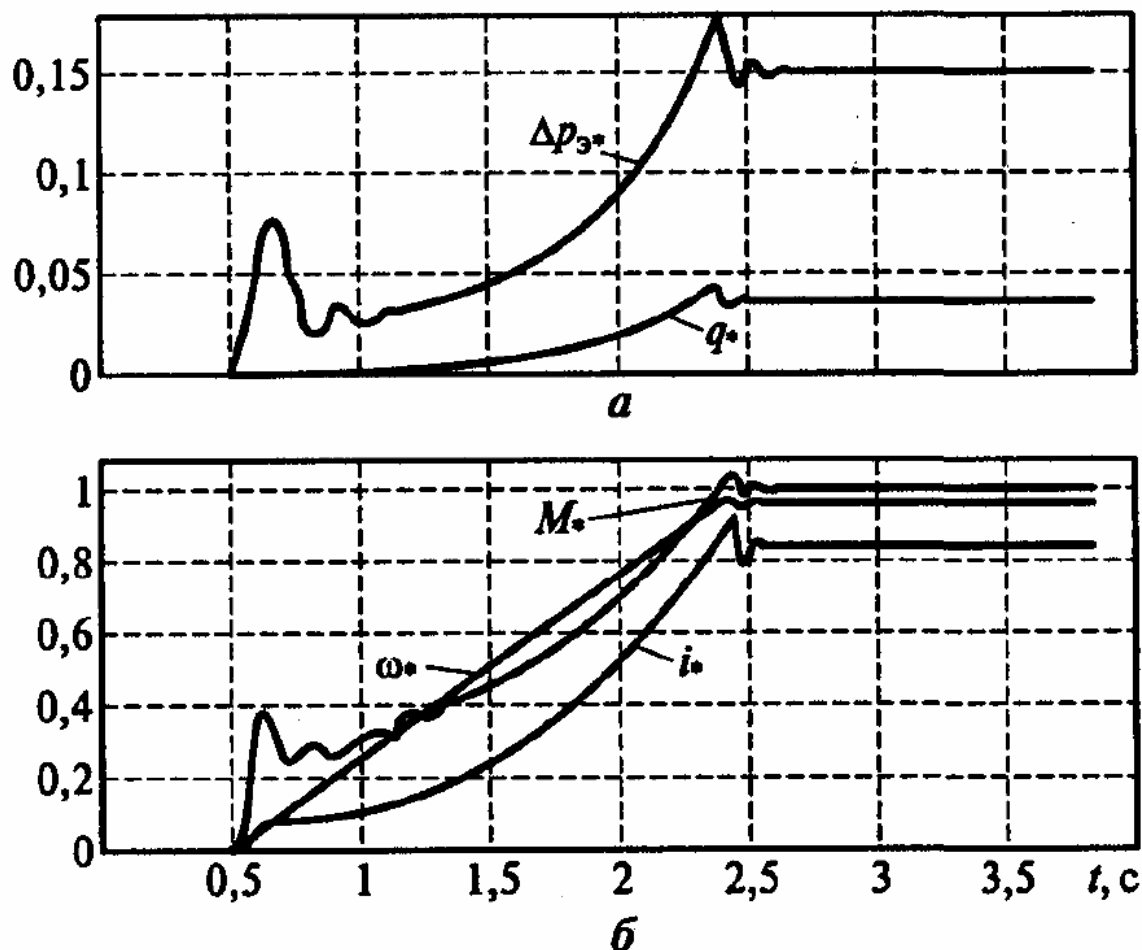
3. Tiristorli chastota o'zgartkichi-asinxron motor (TChO'-AM). Bu o'zgartgich sanoat chastotadagi o'zgaruvchan tokni chiqish kuchlanishi va chastotasi o'zgaradigan o'zgaruvchan tokka aylantirib beradi. Bu usul eng zamonaviy takomillashgan usul bo'lib oxirgi paytda keng tarqagan elektr yuritma turidan biridir.

4. O'zgarmas tok generatori-o'zgarmas tok motori (G-D). Bunda o'zgarmas tok generatori kuchlanishini uyg'otish tokini o'zgartirish orqali rostlanadi. Motor tezligi esa, asosan yakor kuchlanishini o'zgartirish orqali amalga oshiriladi. Bu elektr yuritmalar yaqin o'tmishda rostlanadigan elektr yuritmalarning asosini tashkil etar edi. Xozirgi paytda bu elektr yuritmalarning o'rniga chastotali boshqariladigan asinxron elektr yuritmalar keng qo'llanilmokda.

Elektr yuritma o'tkinchi jarayonining davom etish vaqti va uning o'tish tezligi uch asosiy fizikaviy kattaliklar: aylanish tezligining o'zgarishi, motor chulg'amlaridagi tokning o'zgarishi va motor aktiv qismlari qizishining o'zgarishi bilan belgilanadi.

Texnologik mexanizmlarning yurg'izish paytidagi elektr yuritmalarga qo'yadigan talablari asosida avtomatik yurg'izish sxemalari ishlab chiqiladi. Eng oddiy yurg'izish sxemalari odatda rotor qisqa tutashtirilgan asinxron motorlarda ko'llaniladi. Ular odatda magnitli ishga tushirgich vositasida tarmoqqa ulab yurgiziladi. Rele kontaktli sxemalarda yurg'izish reostati qarshiliklari birin-ketin

ajratilib boshqariladi. Bir kVt dan ortiq quvvatga ega bulgan o'zgarmas tok motorlari va faza rotorli asinxron motorlar yurg'izish reostatlari vositasida ishga tushiriladi.

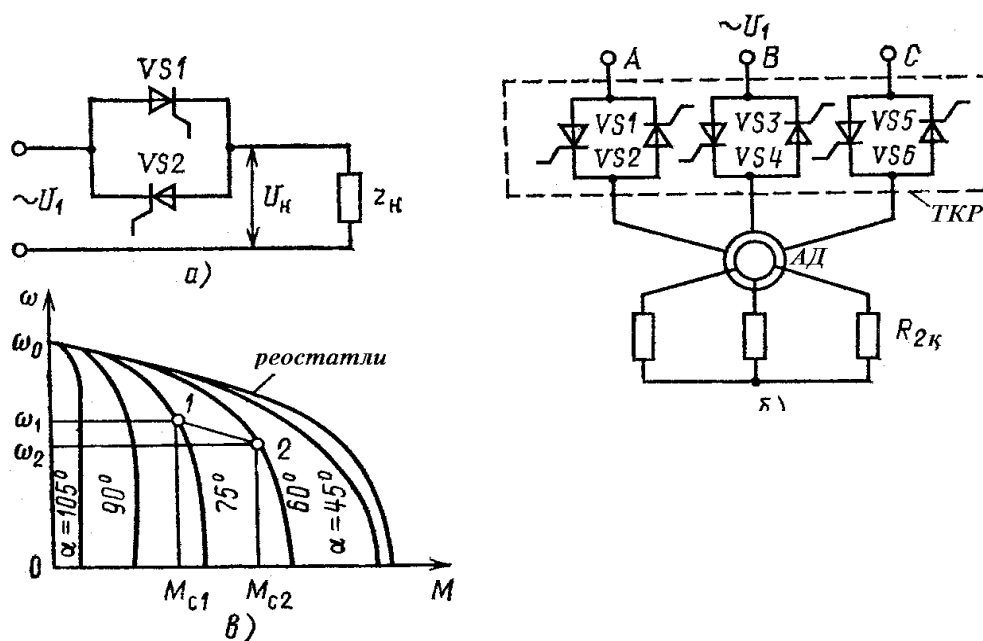


5.3-rasm. Asinxron motorni bevosita tarmoqqa ulashdagi yurg'izish jarayoni va unda vujudga keladigan isroflar.

5.3-rasmda asinxron motorni bevosita tarmoqqa ulaganda yurg'izish jarayonini o'tishi va unda vujudga keladigan aktiv va reaktiv quvvat isroflarin o'zgarishi ko'rsatilgan. Bu isroflarning kuchlanish qiymati va chastotatsini o'zgartirib kamaytirish mumkin. Buning uchun boshqariladigan elektr yuritma qo'llanilishi lozim bo'ladi.

TKO'-AM elektr yuritma tizimi. Ushbu tizimning elektr sxemasi –rasmda ko'rsatilgan. Chiqish kuchlanishi tiristorlarni kechroq (hayallab) ochilgani uchun birqismi o'tkaziladi va kuchlanishning effektiv qiymati kamaytiriladi. Kuchlanish

kamayishi bilan motor o'zagidagi magnit isroflar kamayadi. Ammo, shu bilan birga motordagi moment kvadratik bog'liklikda kamayadi. Momentni kamayishi rotor sirpanishi oshishiga olib keladi va rotordagi isroflar ko'payadi. Bundan tashqari "kesilgan" yarim to'lqin tufayli nosinusoidal toklar vujudga keladi. Bu o'z navbatida yuqori garmonikali toklarni va qo'shimcha isroflarni vujudga keltiradi. Kuchlanish kamayishi tufayli kichik yuklamalarda quvvat koeffitsienti oshiriladi va isroflar kamaytiriladi.



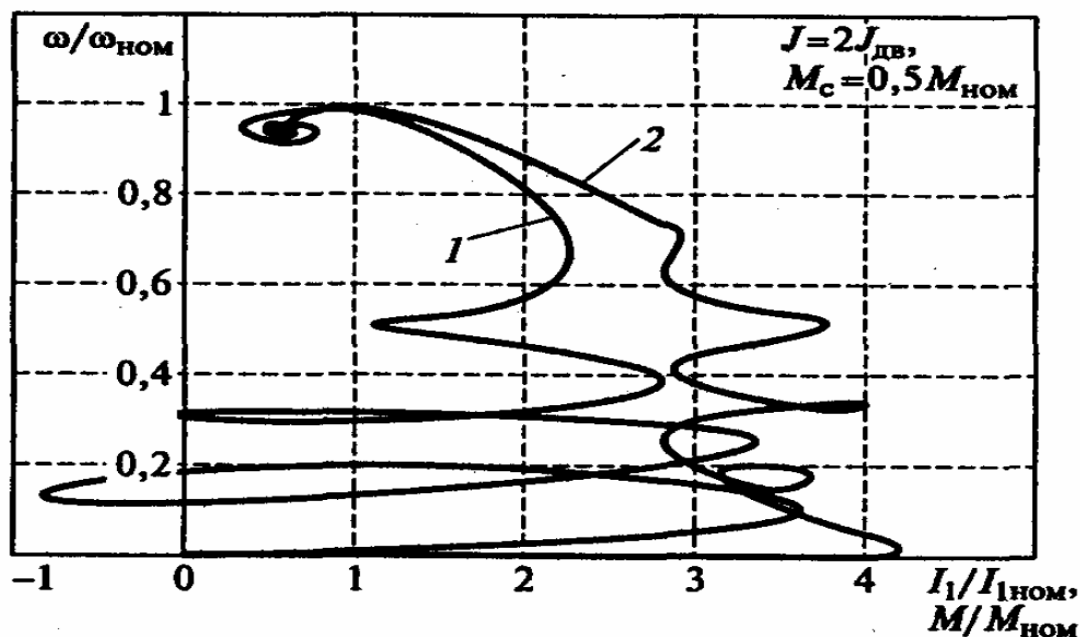
5.4-rasm. «TKR-AD» tizimida koordinatalarni rostlash: a – bir fazali sxema; b – elektr yuritmaning ochiq sxemasi; v – ochiq sxemaning mexanik harakteristikalari

TKO'-AM EYuT elektr energiyasi oqimini yuklamaga muvofiq o'zgartirib turish imkoniyatini beradi va shu orqali isroflarni kamaytirish imkonini beradi. Ushbu EYuT ni isroflarni kamaytirish bo'yicha solishtirma natijalar –jadvalda berilgan.

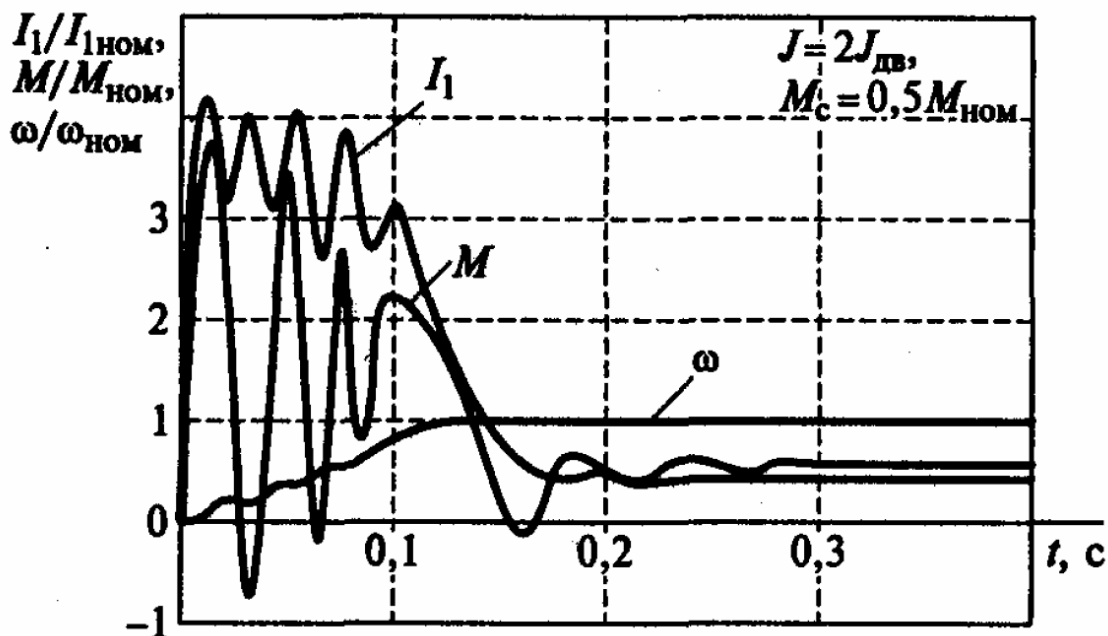
TKO'-AM EYuT rostlash diapazoni kichik uzoq muddatli ishlovchi yoki rostlash diapazoni katta va qisqa muddatli elektr yuritmalarda ishlatiladi. Bundan tashqari, yuritmaning tezligini silliq o'zgartirib ishga tushirish yoki dinamik tormozlash uchun ushbu EYuT qo'llaniladi.

Elektr mashinalarni isroflar ko'p vujudga keladigan jarayonlaridan biri bu yurg'izish jarayonidagi isroflar hisoblanadi. Yurg'izish toklari ishchi toklarga

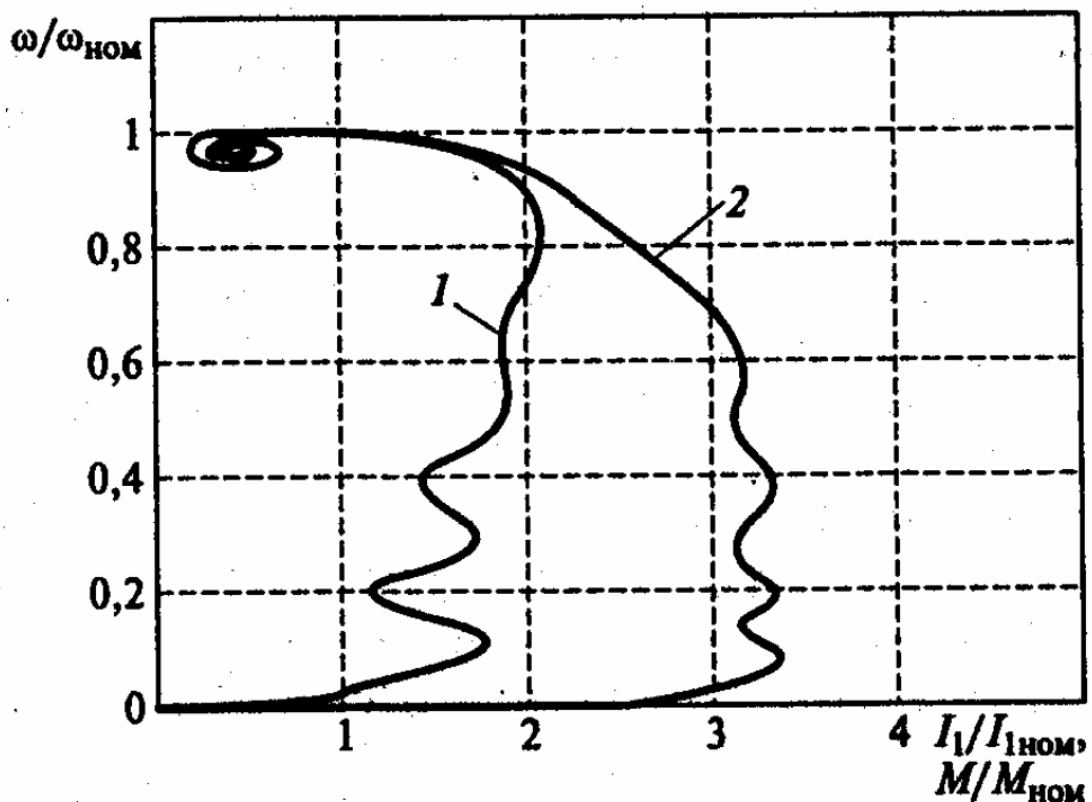
nisbatan 5-7 marta katta bo'lgani uchun ular vujudga keltirgan isroflar salmoqli bo'ladi. Bu isroflarni kamaytirish uchun kuchlanishni silliq oshirib o'zgartirish orqali yurg'izish isroflarni kamaytirish iskonini beradi.



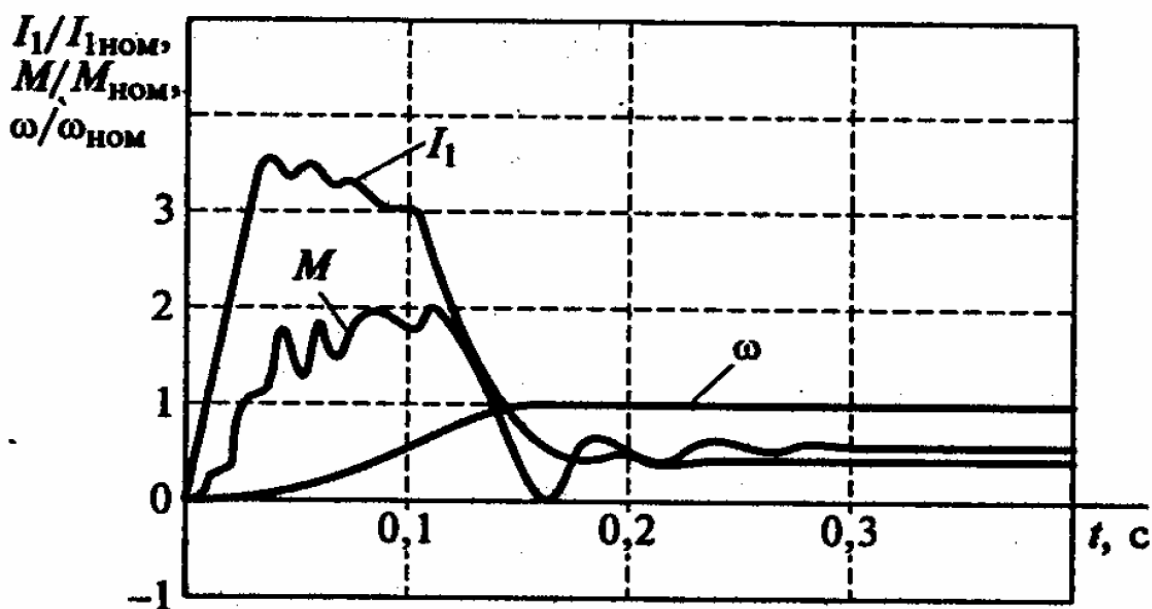
5.5–rasm. Asinxron motorni bevosita tarmoqqa ulashdagi dinamik mexanik va elektromexnik tavsiflar



5.6–rasm. Asinxron motorning bevosita tarmoqqa ulashdagi o'tish jarayonlari.



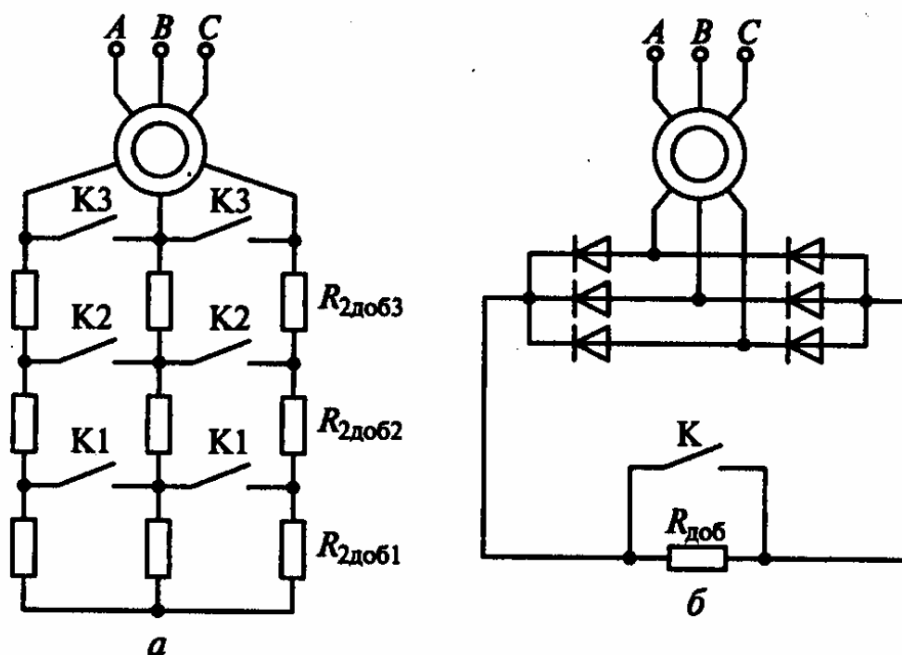
5.7-rasm. TKO'-AM EYuT da kuchlanishni sillik oshirib yurg'izishdagi dinamik mexanik va elektromexanik tavsiflar.



5.8-rasm. TKO'-AD EYuT da yurg'izish jarayoni egriliklari.

Rostlanadigan reostatli boshqariladigan asinxron motor (RRB-AM) elektr yuritma tizimi. Bu EYuT eng arzon boshqariladigan elektr yuritma bo'lib faza rotorli asinxron motorni rotor chulg'amiga rostlanadigan reostat ulanadi. () ifodaga

ko'ramotorning aylantiruvchi momenti oshib yurg'izish toklari kamayadi. Kritik sirpanish qiymati oshib kritik moment qiymati o'zgarmaydi.

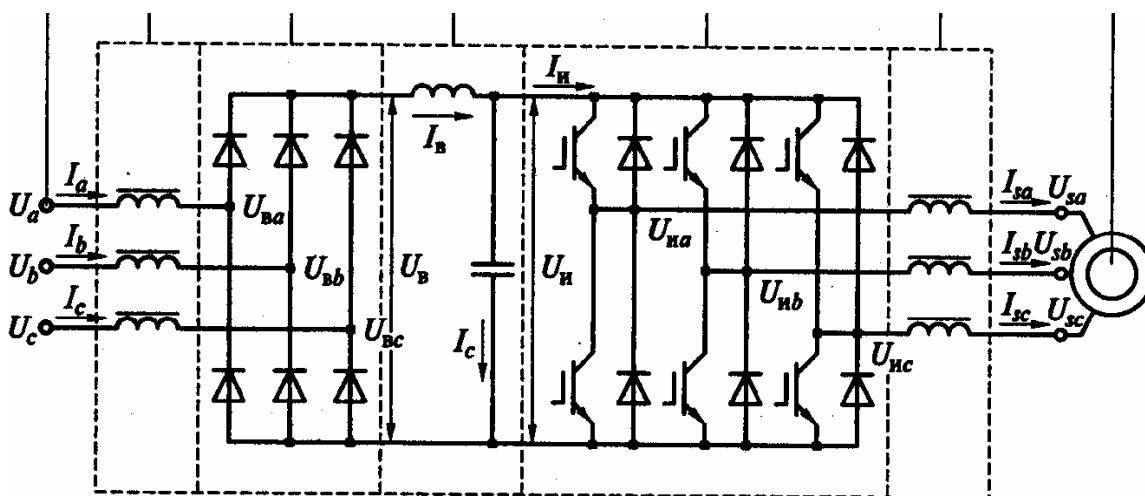


5.9-rasm. Reostatli boshqariladigan faza rotorli asinxron motor sxemasi.

O'zgaruvchan tok elektr mashinalarida elektrik tormozlash uchun elektrodinamik tormozlash va qarshi ulab tormozlash ko'llaniladi. Energiyani tarmoqqa qaytarib generator rejimida tormozlash (rekuperativ tormozlash) ko'pincha juft qutblarni sonini o'zgartirib asinxron motorlarda ko'llaniladi.

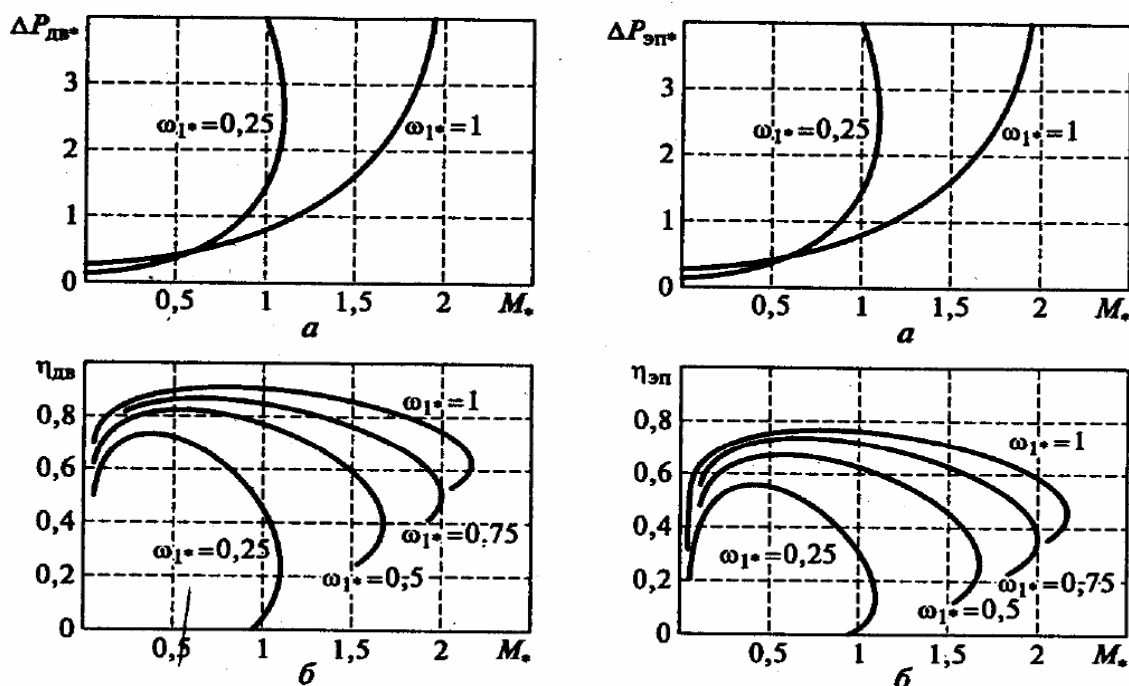
Elektr mashinalardagi isroflarni tiristorli chastotaviy boshqarish orqali kamaytirish usullari va vositalari. Hozirgi kunda rotor qisqa tutashgan asinxron motorni boshqarishning eng samarador usuli chastotatviy boshqarish bo'lib oxirgi yillarda ularning qo'llanishi kengayib bormoqda. Asinxron motor – tiristorli (yoki tranzistorli) chastota o'zgartkichi (AM-TChO') elektr yuritma tizimi (EYuT) tezlikni rostlashda o'zgarmas tok motori tavsiflarini bera oladi va eng energiya tejankor usul hisoblanadi. Ushbu EYuT ning 2 turi mavjud bo'lib chastotani bevosita o'zgartiradigan va o'zgarmas tok bo'g'inli o'zgartiradigan chastota o'zgartkichlari mavjud. Bevosita o'zgartiradigan chastota o'zgartkichlari faqat nominal chastotatdan (50 Gst) pastga o'zgartirgani uchun ular kam qo'llaniladi.

Shuning uchun asosan o'zgarmas tok bo'g'inli chastota o'zgartkichlarni (O'TB ChO') ko'rib chiqamiz. Bu o'zgartkichning sxemasi 5.10–rasmda ko'rsatilgan.

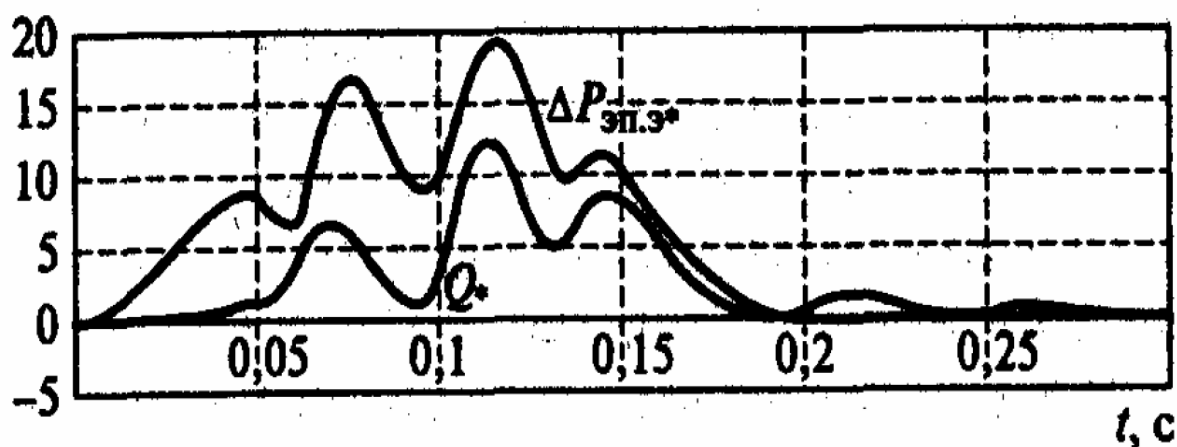


5.10-rasm. O'zgarmas tok bo'g'inli chastota o'zgartkichi sxemasi.

O'zgartkich avval tarmoq chastotasini o'zgarmas tokga aylantiradi va invertorlar yordamida chastotatsi o'zgaradigan o'zgaruvchan tokga aylantiriladi. Quyidagi rasmlarda chastotaviy boshqariladigan asinxron EYuT ning energetik tavsiflari berilgan. Yuklama va tezlik o'zgarganda FIK va isroflarning qiymatlarining o'zgarishi keltirilgan.



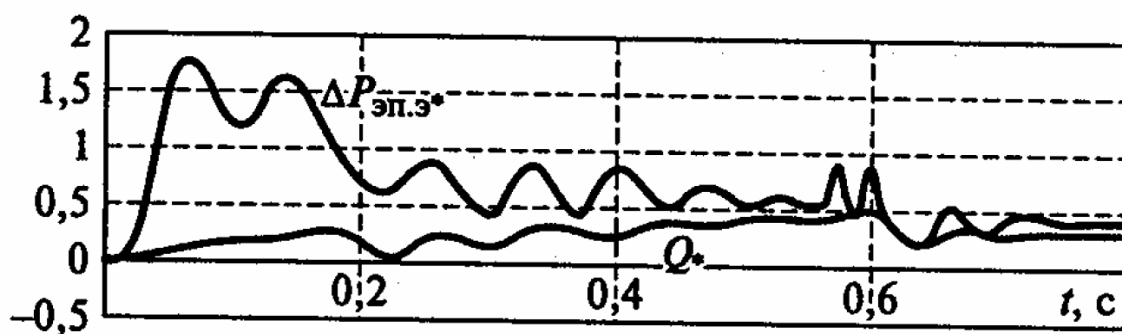
5.11-rasm. Yuklama va tezlik o'zgarganda FIK va isroflarning qiymatlarini o'zgarishi



5.12-rasm. Asinxron motorni chastotatviy boshqarishda aktiv va reaktiv quvvat isroflarining o'zgarishi.

AM-TChO' EYuT ning yurg'izish tavsiflari quyidagi rasmlarda keltirilgan.

Egriliklardan ko'rinadiki yurg'izish jarayoni juda silliq va energiya tejamkor o'tadi



5.13-rasm. Asinxron motorni chastotatviy boshqarishda aktiv va reaktiv quvvat isroflarining o'zgarishi.

Ko'rib chiqilgan EYuT larni solishtirma tahlil qilamiz. Quyidagi jadvalda 3 xil EYuT da yurg'izish paytidagi isroflar tahlili berilgan.

5.1-jadval

t, c	Yurg'izish vaqtidagi isroflar		
	Elektr yuritma turi		
	TKO'-AM	RRB-FRAM	TCHO'-AM
1	3570	2462	690
2	5980	4548	1120

Tahliliy ma'lumotlar shuni ko'rsatadiki eng energiya samarador elektr yuritma tizimi TCHO'-AM tizimi ekanini ko'rish mumkin.

Keyingi jadvalda asinxron motor tezligini rostlashda isroflarni rostlash diapazoniga bog'liqligi tahlil qilingan.

5.2-jadval

Ω	ΔR – isroflar, kVt		
	Elektr yuritma turi		
	TKO'-AM	RRB-FRAM	TCHO'-AM
0,6 ω	2010	1723	866
0,4 ω	2738	2108	692
0,2 ω	3477	2493	480

Tahliliy ma'lumotlar shuni ko'rsatadiki eng energiya samarador elektr yuritma tizimi TCHO'-AM tizimi ekanini ko'rish mumkin.

5.3-jadval.

Motor tipii	S	Parametrlar				
		ΔP_{1M}	ΔP_{2M}	ΔP_{1c}	$\Delta P_{\Sigma M}$	$\eta_{\Sigma M}$
		$M_c = 0,5M_{\text{HOM}}$				
MTKF012-6:	S_1	376	75	128	579	0,669
$P_{\text{HOM}} = 2,2 \text{ кВт}$	$S_{\text{опт}}$	294	134	73	501	0,690
$S_{\text{HOM}}=0,12$ $S_{\text{опт}}=0,105$	S_{HOM}	290	154	65	509	0,680
4A100L6Y3:	S_1	129	30	75	234	0,828
$P_{\text{HOM}} = 2,2 \text{ кВт}$	$S_{\text{опт}}$	128	42	59	229	0,830
$S_{\text{HOM}}=0,12$ $S_{\text{опт}}=0,105$	S_{HOM}	152	61	39	252	0,813

Keyingi jadvalda asinxron motor tezligini rostlashda tashkil etuvchi isroflarni stator va rotor chulg'amidagi, stator o'zagidagi, va elektr magnit isroflarni rostlash diapazoniga bog'liqligi tahlil qilingan.

Nazorat savollari:

1. Tiristorli o'zgartkich-o'zgarmas tok motori elektr yuritma tizimi
2. Tiristorli kuchlanish o'zgartkichi – asinxron motor elektr yuritma tizimi
3. Tiristorli chastota o'zgartkichi-asinxron motorv elektr yuritma tizimi
4. O'zgarmas tok generatori-o'zgarmas tok motori elektr yuritma tizimi
5. Rostlanadigan reostatli boshqariladigan asinxron motor elektr yuritma tizimi

5.3. Muqobil elektr energiyasi manbalarining generatorini takomillashtirish muammolari

Kalit so'zlar: muqobil energiya manbalarishamol elektr stansiyalariSHamol generatori, vertikal o'qli shamol turbinasi, ikki rotorli generator, qarama-qarshi aylanuvchi shamol g'ildiragi

Hozirgi kunda elektr mexanikasi sohasidagi ilmiy tadqiqotlarning asosiy yo'nalishlaridan biri qayta tiklanuvchan energiya manbalarining ishlash samaradorligini oshirish hisoblanadi. Dunyoda energiya resurslarga bo'lgan ehtiyojning va ular narxining oshib borishi qayta tiklanadigan muqobil energiya manbalarini rivojlantirish masalasini ilgari suradi. Bugungi kunda mazkur muqobil energiya quvvatini ishlab chiqarish G'arbiy Evropada ancha ommalashgan [15]. Sababi, buning uchun tabiiy shart-sharoitlar mos bo'lishi barobarida ushbu turdagi energiyaga talab ham ortib bormoqda. Zamonaviy shamol elektr stansiyalari (SHES) 3–4 m/s dan 25 m/s gacha bo'lgan tezlikdagi shamol muhiti rel'efiga nisbatan baland bo'lmagan joylarda optimal ishlaydi. Shunday hududiy imkoniyatlarga ega bo'lgan Germaniya hozirgi vaqtda shamol energiyasidan foydalanish bo'yicha jahonda etakchilik qilmoqda. Ma'lumotlarga qaraganda, mazkur mamlakatda so'nggi yillarda 9000 MVt quvvatli SHESlar bunyod etilgan va bu jarayon jadal davom etmokda. Hozir Evropa mamlakatlari sanoatining SHESlar bilan bog'liq tarmoqlarida 60 000 dan ziyod kishi doimiy ish bilan ta'minlangan. 2020 yilga borib, Germaniya 20 foiz elektr energiyasini SHESlar yordamida ishlab chiqarishni rejalashtirgan. Evropa Ittifoqining boshqa a'zolari esa 180 ming MVt quvvatli SHESlar o'rnatishni mo'ljallayotgan bo'lsa, Xitoy o'zi-

ning milliy taraqqiyot dasturida 30 ming MVt quvvatga ega shunday stansiyalarni qurishni ko'zlamogda. Bulardan tashqari, Buyuk Britaniya, Norvegiya, Kanada, Hindiston, YAponiya, Ispaniya, YAngi Zelandiya yaqin kelajakda shamol energetikasi sohasini maqsadli rivojlantirish bilan bog'liq Davlat rejalari ishlab chiqqanligi haqida ma'lumotlar bor. Xalqaro energetika agentligi (IEA) taxminlariga ko'ra, 2030 yilga borib sayyoramizda shamol energiyasiga bo'lgan ehtiyoj 4800 gegavattni tashkil etadi [13].

SHamol energetikasini amaliyotga tatbiq etish bilan bog'liq ayrim muammolar mavjud. Jumladan, shamol tabiatining beqaror ekanligi SHESlarda bir maromda energiya ishlab chiqarishga ta'sir ko'rsatadi. SHuningdek, shaharlar yaqinidagi ko'p sonli va zich joylashgan shamol inshootlari u yerdagi tabiiy havo almashinuviga zarar etkazishi mumkin. Ulardan hosil bo'ladigan mexanik va aerodinamik shovqinlar odamlarning aqliy faoliyatiga xalaqit berishi ham istisno etilmaydi. Bundan tashqari, mazkur stansiyalar faoliyati davomida o'zidan past chastotali tebranishlar tarqatadi. Bu tebranishlar yaqin masofadagi binolarning devorlari va deraza oynalari mustahkamligini o'ziga xos sinovdan o'tkazadi.

SHamol generatori optimal va uzoq muddat ishlashi uchun shamol tezligini yuqori pastligiga qarab qurilmani ya'ni shamol generatorini tuzilishini to'g'ri tanlash zarur. Masalan, yuqori tezlikda ishlaydigan shamol generatori parraklarining tuzilishi qanotlar soni kam gorizontall tekislikda joylashtiriladi. Past tezlikda ishlaydigan shamol generatorlarida esa aksincha qanotlar soni ko'p bo'ladi, qancha qanotlar soni ko'paytirilsa shuncha past shamol tezligida ham ishlayveradi, lekin qanotlar sonining ko'payishi qurilma kuchli shamollarga bardosh bera olmasligiga olib keladi. SHuning uchun qurilmadagi parraklar sonini tanlaganda hududdagi shamolning yuqori tezligiga ahamiyat berish zarur.

Generator to'g'ri tanlanmasa qurilma tez ishdan chiqishi yoki tez-tez ta'mirga kelib qolishi mumkin, shunda qurilmaning ishlab chiqargan energiyasi qimmatga tushishi mumkin. Demak kuchli shamollarga bardosh bera oladigan

shamol parraklarini yaratish shamol generatorining foydali ish koeffitsientini yuqori bo'lishiga olib kelar ekan.

Tadqiqotlar shuni ko'rsatmoqdaki elektr tarmoqlari bormagan chekka hududlardagi kichik quvvatli iste'molchilarni elektr energiya bilan ta'minlashda vertikal o'qli shamol turbinalardan foydalanish elektr ta'minoti uzluksizligi va ishonchliligini oshirishni ta'minlaydi. Vertikal o'qli shamol turbinalari kuchsiz va o'zgaruvchan shamol oqimlarida samarali ishlashi uchun shamol turbinasining asosiy qismini tashkil qiladigan generatorni to'g'ri tanlanishi kerak bo'ladi. Ikki rotorli doimiy magnitlardan tashkil topgan (aksial) generatorlar kichik tezlikli shamol oqimlarida samarali ishlaydi. Ushbu generatorlar tuzilishi ixcham shovqinsiz va arzon hisoblanadi.

Kichik oqimli barqaror bo'lmagan shamol energiyasidan samarali foydalanishda shamol generatorini to'g'ri tanlash ham muhim vazifa hisoblanadi. Past tezlikli shamol energiyasidan samarali foydalanishda doimiy magnitlardan tashkil topgan uch fazali ikki rotorli (AFMP) generatordan foydalanish lozim.

Generator, asosan, ikki qismdan tashkil topgan. Doimiy magnitlar bilan birlashtirilgan rotor va chulg'amlardan tashkil topgan stator. Ushbu generator Faradeyning elektromagnit induksiya qonuni asosida ishlaydi.

5.14-rasmda loyihalangan generatorning rotorida magnitlarning joylashuvi va stator chulg'amining tashqi ko'rinishi keltirilgan. Stator chulg'ami uch fazali bo'lib, har fazasida 4 tadan g'altaklari mavjud. Stator chulg'amlarini ikki xil usulda: "yulduzcha" yoki "uchburchak" usulida ulash mumkin.



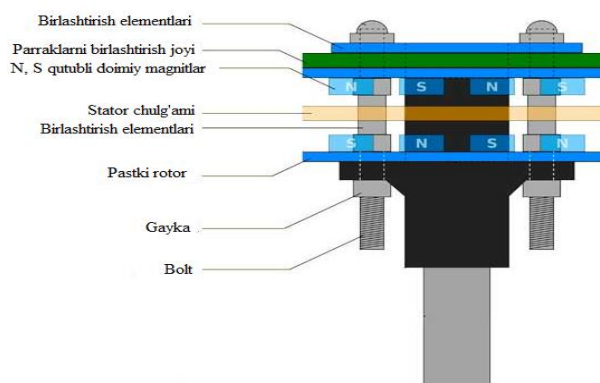
a)



b)

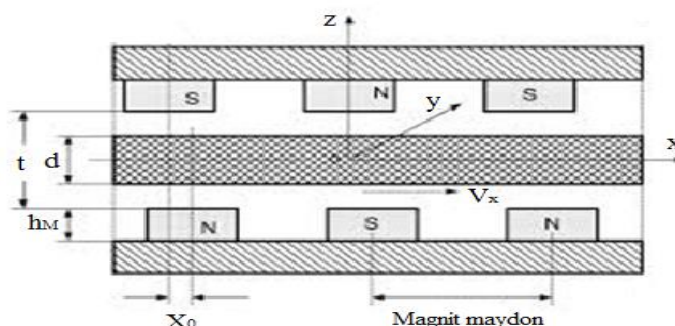
5.14-rasm. Generatorning rotor (a) va stator (b) ning tashqi ko'rinishi.

Generatoridan chiqadigan kuchlanish quyidagi parametrlarga bog'liq [5]:
doimiy magnitlar turi va o'lchami, stator chulg'amlarining uzunligi, diametri va o'ramalar soni, doimiy magnitlarning induksiyasi, stator va rotor orasidagi masofa, rotor tashkil qilgan material, magnitlarning rotorga joylashtirishi.



5.15-rasm. Ikki rotorli ozgarmas magnitli uch fazali (AFMP) generatorning qismlari.

Ushbu generatorning asosiy afzalliklari: kichik tezliklarda kuchlanishni chiqarish, 60-120 ay/s, reduktor qurilmalarining qo'llanmasligi, ixcham, arzon va har bir kishi mustaqil tayyorlay olishi, FIK yuqoriligi, energiya samaradorligi.



5.16-rasm. Generatorning stator, rotor va magnitlarning orasidagi bog'liqliklari

Ushbu generatorni loyihalashda magnitlar turi, soni va uning induksiyasi muhim parametrlardan hisoblanadi. Chunki generatoridan olinadigan kuchlanish va quvvat shunga bog'liq bo'ladi.

Tokli o'tkazgich kiritilgan muhitning magnit singdiruvchanligi quyidagi ifodadan aniqlanadi[5]:

$$\mu_{rrec} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (5.21)$$

Magnit oqim zichligi havo bo'shlig'i va magnit zanjiri Kirxgof qonuni asosida tushuntiriladi:

$$\frac{B_r}{\mu_0 \mu_{rrec}} \cdot 2h_M = \frac{B_g}{\mu_0 \mu_{rrec}} \cdot 2h_M + \frac{B_r}{\mu_0} \cdot 2g + H_{Fe} l_{Fe} \quad (5.22)$$

$$\frac{B_r}{\mu_0 \mu_{rrec}} \cdot 2h_M = \frac{B_g}{\mu_0 \mu_{rrec}} \cdot 2h_M + \frac{B_r}{\mu_0} \cdot 2g k_{sat} \quad (5.22)$$

Magnit zanjirning to'yinganlik ko'effisienti quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$k_{sat} = 1 + \frac{l_{Fe}}{2\mu_r(g + 0,5d)} \quad (5.23)$$

bu yerda: B_r – doimiy magnitning induksiyasi, h_M – doimiy magnitning balandligi, ΔH – doimiy magnitning magnit maydon kuchlanganligi, g – stator va doimiy magnit orasidagi masofa, d – stator qatlaminig qalinligi.

Stator va doimiy magnitlardan tashkil topgan rotor orasidagi magnit maydon induksiyasi quyidagi ifodadan aniqlanadi.

$$B_g = \frac{B_r}{1 + (g + 0,5d) \cdot k_{sat} \mu_{rrec} / h_M} \quad (5.24)$$

Generatorlarda hosil bo'ladigan EYuk doimiy magnit induksiyasi va magnit maudondagi chulg'am uzunligi va rotorning stator atrofidagi harakat tezligiga bog'liq:

$$\begin{aligned} E &= l B_g v \\ dE &= B_g v dr \\ v &= v_x = 2\pi r n \\ dE &= B_g (2\pi r n) dr \end{aligned} \quad (5.25)$$

Bu formulalardan kelib chiqib generatorda hosil bo'ladigan EYuk ni quyidagi soddalashtirilgan formulasini keltirib o'tamiz[5]

$$E = 2fNmnBS \quad (5.26)$$

bu yerda: f – generator rotorining aylanish tezligi, N – birta fazadagi chulg'amlar soni, n – doimiy magnitlar soni, m – birta chulg'amdagi o'ramlar soni, B – doimiy magnitning induksiya, S – doimiy magnitning o'chami.

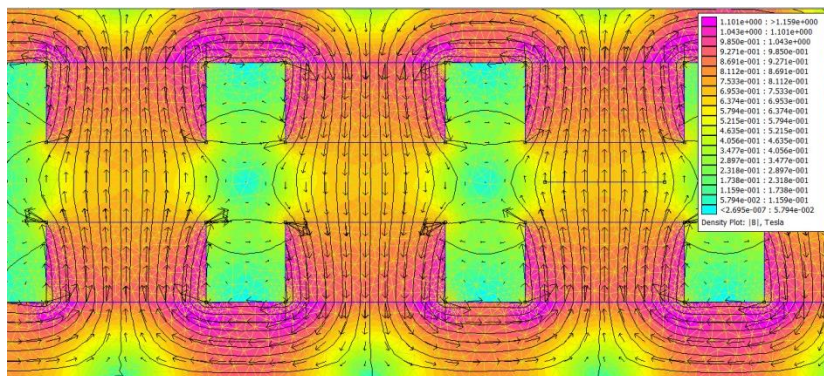
Ikkita magnit havo oralig'idagi magnit induksiya qiymati stator qalinligi, stator va rotor orasidagi havo bo'shlig'ining qalinligiga bog'liq. Ikkita magnit havo oralig'idagi magnit maydon induksiya qiymati quyidagi bog'liqlik orqali aniqlanadi[8]:

$$B_g = \frac{B_r}{1+(g+0,5t_w) \cdot k_{sat} \mu_{rrec} / h_M} \quad (5.27)$$

Tokli o'tkazgich kiritilgan muhitning magnit singdiruvchanligi quyidagi bog'liqlikdan aniqlanadi:

$$\mu_{rrec} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_r}{H_c} \quad (5.28)$$

Bu yerda: B_r va H_c doimiy magnitlarning magnit induksiya va kuchlanganligi (1-jadval).



5.17-rasm. FEMM 4.2 dasturida olingan doimiy magnitlar orasidagi magnit maydon induksiya vektorining qiymatlarining tahlili

3-rasmda generatordagi mavjud doimiy magnitlarni bir-biri bilan ta'siri va magnit maydon induksiya kuch chiziqlari va qiymatlari keltirilgan

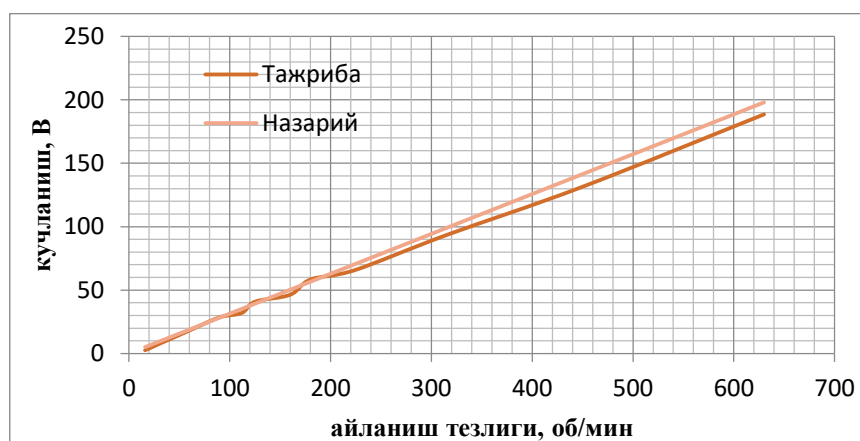
Generatorda hosil bo'ladigan magnit oqimi doimiy magnitlar o'lchamlariga va magnit maydon induksiyasiga bog'liq bo'ladi. Bu ifoda quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$\Phi_{\max} = B_g W_m L_m \quad (5.29)$$

Generator chulg'amlarida hosil bo'ladigan eYUK quyidagi bog'liqlik bilan aniqlanadi [10]:

$$E_f = \frac{\sqrt{2}q\pi\kappa_w\Phi_{\max}n\pi pN}{120} = \frac{\sqrt{2}q\pi\kappa_w B_g W_m L_m n\pi pN}{120} \quad (5.30)$$

Bu yerda: p – doimiy magnitlarning juft qutublar soni; q – birta fazadagi chulg'amlar soni; κ_w – to'ldirish koefitsienti (0,95); N – birta chulg'amdagi o'ramlar soni; n – magnit maydoning aylanish tezligi; W_m – doimiy magnitni kengligi; L_m – doimiy magnitni uzunligi; B_g – ikkita magnit havo oralig'idagi magnit maydon induksiya qiymati.



5.18-rasm. Generator rotor aylanish tezligining kuchlanishga bog'liqlik grafigi(uch fazali yulduzchaga ulangan).

Generatoridan chiqadigan quvvat quyidagi ifoda orqali aniqlanadi [11]:

$$P_{out} = 3E_f I \eta \cos\varphi = \frac{3\sqrt{2}q\pi\kappa_w B_g W_m L_m n\pi pN}{120} I \eta \cos\varphi \quad (5.31)$$

Bu yerda: I – stator chulg'ami maksimal toki; ushbu generatorlar uchun $\eta \cos\varphi = 0,9$ teng bo'ladi; E_f – generator chulg'amlarida hosil bo'ladigan EYUK.

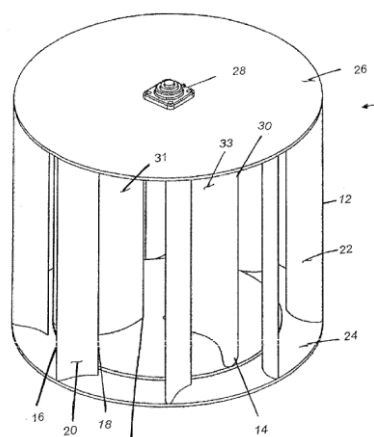
Biz loyihalagan generatorda shamol tezligi (2,5-3 m/s) bo'lgan holatlarda ham ma'lum miqdorda energiya bilan ta'minlashimiz mumkin. Ushbu

generatorlarni kichik quvvatli shamol turbinalarida qo'llasak shamol oqimi energiyasidan samarali foydalanishimiz mumkin.

Past oqimli shamol tezliklaridan samarali foydalanib, elektr energiya olishda qarama-qarshi aylanuvchi ustki va pastki shamol g'ildiragiga ega vertikal o'qli shamol energetik qurilmalari ishlab chiqilgan.

Mavjud qurilmaning ishlash prinsipi quyidagicha: turbinadagi generatorning rotor qurilmaning yuqori qismidagi aylanuvchi shamol g'ildiragi, generatorning stator pastki qismidagi aylanuvchi shamol g'ildiragiga mahkam bog'langan, yuqori qismidagi shamol g'ildiragi va pastki qismidagi shamol g'ildiragi qarama-qarshi yo'nalishda aylanadigan bo'lgani uchun, generatorning stator va rotorning qarama-qarshi tomonga aylanishi natijasida energiya ishlab chiqarish samaradorligi ikki baravar oshirilgan.

Shahar markazlari va chekka hududlardagi elektr energiya iste'molchilarni energiya bilan ta'minlashda birta rotorli tashqi qismi yo'naltiruvchi sirtlarga va ichki aylanuvchi parraklarga ega bo'lgan shamol energetik qurilmasi ham ishlab chiqilgan (8-rasmga qarang).

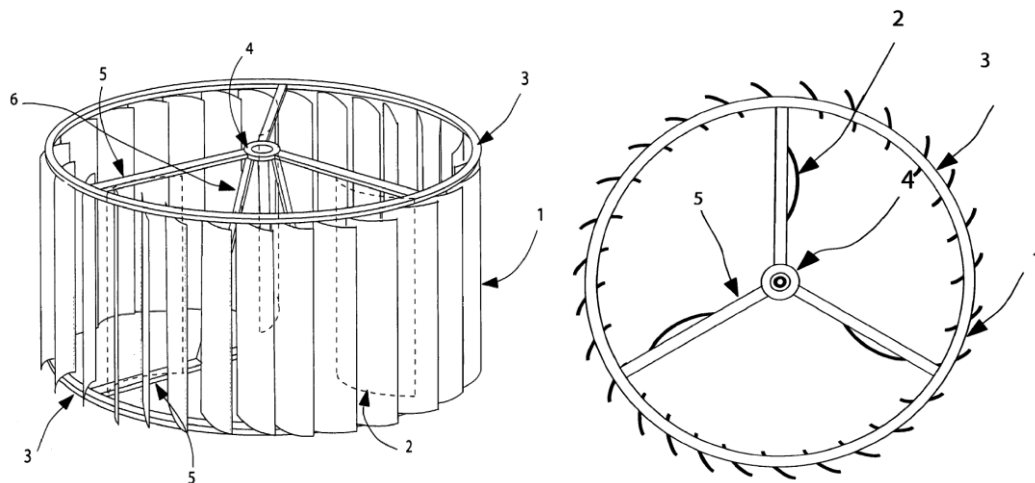


5.19-rasm. Gecheng Zha va Bertrand Dano tomonidan yaratilgan shamol energetik qurilmasi.

Ushbu vertikal o'qli shamol energetik qurilmasi asosan ikki qismdan tashqi yo'naltiruvchi sirtlardan va ichki aylanuvchi shamol g'ildirakdan tashkil topgan. Qurilmadagi tashqi yo'naltiruvchi sirtlar ichki aylanuvchi shamol parraklariga hosil bo'ladigan teskari ta'sir etuvchi kuchlarni kamaytiradi va shamol oqimi tezligini bir necha baravarga oshirishi mumkin. Shamol oqimining bir tekisda

uzatilishini ta'minlash maqsadida tashqi yo'naltiruvchi sirtlar turbinaning radiusiga nisbatan 45^0 ostida qiyalashtirilgan. Loyihalangan shamol turbinasini shamol tezligi past bo'lgan hududlarda foydalanish maqsadga muvofiq bo'ladi.

Bundan tashqari, birta rotorda joylashgan ikkita shamol g'ildiragining yangi konstruksiyasi mavjud (9-rasmga qarang).



5.20-rasm. Vertikal o'qli shamol energetik qurilmasi

Qurilma birta valda ikkita, tashqi va ichki aylanuvchi shamol parraklari bilan jihozlangan. Tashqi shamol parraklari aylanish o'qiga parallel ravishda o'rnatilgan profillardan tashkil topgan. Qurilmaning tashqi g'ildiragi aylanadi va shamol parraklari chap tomon har doim shamol oqimi kirishi uchun ochiladi, shamol g'ildiragidagi profillar tashqi turbinaning diametriga nisbatan 45^0 ostida joylashtirilgan. Shamol oqimi o'ng tomonda esganda shamol g'ildiragidagi profillar yopiladi va shamol bilan deyarli ta'sir o'tkazmaydi. Gorizonttal o'qqa nisbatan 90^0 burchak ostida o'rnatilgan ichki shamol g'ildiraklari ham tashqi shamol g'ildiraklari bilan bir xil aylanadi. Ikkala turbinaning o'zaro ta'siri ushbu turbinaning umumiy samaradorligini oshiradi.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Muqobil energiya manbalari afzalligi nima?
2. Shamol elektr stansiyalari afzalligi nima?
3. Vertikal o'qli shamol turbinalari afzalligi nima?
4. Ikki rotorli generatorining afzalligi nima?
5. qarama-qarshi aylanuvchi shamol g'ildiragining afzalligi nima?

5.4. Elektromexanik majmualar va tizimlar ish samaradorligini iqtisodiy ko'rsatkichlarini tahlili

***Kalit so'zlar:** kamharajat energiya tejash tadbirlari, o'rta harajatli energiya tejash tadbirlari, katta harajatli energiya tejash tadbirlari, sifatsiz elektr energiyasi, sifatsiz ta'mirlash, energetik ko'rsatkichlar, reaktiv quvvatni qoplash, sof diskontlangan foyda, investitsiyalarni sof foyda keltirish indeksi, foydaning ichki me'yoriy qiymati, kapital harajatlarni qoplash muddati, dinamik qoplash muddati, umumiy diskontlangan harajatlari*

Sanoat korxonalaridagi elektr mexanik majmua va tizimlarda ish samaradorligini oshirish tadbirlarini sarflanadigan mablag'lari bo'yicha uchta guruhga ajratish mumkin [16]:

1. Kamharajat energiya tejash tadbirlari. Bunda energiya tejash tadbirlari deyarli qo'shimcha qarajatlarsiz amalga oshiriladi. Bu tadbirlarga asosan texnologik uskunalarga xizmat ko'rsatish sifatini oshirish; mehnat intizomini oshirish; texnologik talablarga to'la rioya qilish kabi tadbirlar kiradi.

2. O'rta harajatli energiya tejash tadbirlari. Bu tadbirlarga elektr ta'minoti tizimini qisman rekonstruksiyalash orqali amalga oshiriladi. YA'ni, elektr ta'minoti tizimini energiya isrofi me'yordan ko'p bo'lgan ba'zi elementlari (transformator, motorlar va sh.o'.) almashtirish, reaktiv quvvat qoplashni amalga oshirish va sh.o'.

3. Katta harajatli energiya tejash tadbirlari. Bu tadbirlarga korxona ETT to'la rekonstruksiyalash orqali amalga oshiriladi. Korxona elektr ta'minoti tizimini to'la rekonstruksiya qilish; korxonada energiya tejamkor texnologiyalarni joriy etish; avtomatlashtirilgan texnik qaydlov tizimi yoki analitik-axborot tizimini joriy etish va sh.o'.

Yuqorida keltirilgan energiya tejash tadbirlarni shartli ravishda yana quyidagi 3 turga bo'lish mumkin [13]:

1. Eksploatatsiya qilish bilan bog'liq tadbirlar.
2. Rekonstruksiya o'tkazish bilan bog'liq tadbirlar.

3. Ilmiy tadqiqot orqali aniqlanadigan tadbirlar.

Ekspluatatsiya qilish bilan bog'liq tadbirlarga elektr mashinalarni belgilangan me'yoriy ko'rsatkichlar doirasida ishlatish, xizmat ko'rsatish sifatini oshirish, texnologik elektr uskunalarini optimal ish rejimida ushlab turish va shunga o'xshash tadbirlar kiradi. Ishlab chiqarishda asosiy ekspluatatsiya qilinuvchi elektr uskunalar elektr yuritmalar tashkil qiladi.

Korxona elektr energiyasi iste'molining asosiy qismi texnologik mashinalarning elektr yuritmalariga to'g'ri keladi. Elektr yuritmalarni ish rejimlarini optimallashtirish va rostlanadigan elektr yuritmalardan foydalanish katta iqtisodiy samaradorlikni ta'minlaydi. Elektr yuritmalarni samarasiz ishlashiga turli omillar ta'sir ko'rsatishi mumkin. Elektr motorlarni samarasiz ishlash sabablari:

- kam yoki ortiqcha yuklantirilishi;
- nominal kuchlanishdan past yoki yuqori kuchlanishda ishlashi;
- sifatli elektr energiyasidan ta'minlanishi;
- sifatli ta'mirlash va xizmat ko'rsatish;
- iste'molchilarni past energetik ko'rsatkichlarga ega bo'lishi;

Elektr yuritmalardagi energiya tejash tadbirlari sifatida quyidagilarni keltirish mumkin:

- motor quvvatini oqilona tanlash;
- energetik ko'rsatkichlari yuqori bo'lgan motorga almashtirish;
- salt ishlash rejimini cheklash va ish jarayonini intensivlashtirish;
- elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlarini oshirish;
- optimal ish rejimlarini ushlab turish.
- yuklamaga bog'liq ravishda motor ulash sxemasini o'zgartirish
- texnologik talab bo'yicha motor tezligini oshirish
- yuklamaga muvofiq motor energiya sarfini oshirish
- reaktiv quvvatni qoplash.

Korxonalarda rekonstruksiya o'tkazish bilan bog'liq tadbirlariga elektr yuritmalarni ish rejimlarini optimallashtirish va rostlanadigan elektr yuritmalardan

foydalanish, isroflarni kamaytirish kabi tadbirlar kiradi. Elektr energiyasi isroflarini kamaytirish elektr uskunalarini ta'mirlash sifatini yaxshilash orqali ham erishish mumkin. Bu tadbir ayniqsa motorlarni ta'mirlashda yaxshi samara beradi. Bunda ta'mirdan keyin motorning parametrlari pasport parametrlarga yaqinlashtirish lozim. Sifatsiz ta'mirdan chiqqan motorlar reaktiv quvvatni ko'p iste'mol qilishi, chulg'amlar nosimmetrik bo'lishi, salt ishlash tokini oshib ketishi tufayli ko'p isroflarni keltirib chiqaradi. Bunday salbiy holatlar motor chulg'amini nominal kattaliklaridan boshqa kattaliklarga (nominal tezlik, kuchlanish, chastota o'zgarganda) qayta o'raganda qo'shimcha hisoblashlar bajarish talab etiladi.

Ishlab chiqarishda ta'mirlangan asinxron motorlarning salmog'i ortib bormoqda. Ta'mirlash texnologiyasiga to'la amal qilinmaganligi tufayli motor ish rejimi parametrlari pasport parametrlariga muvofiq kelmaganligini kuzatish mumkin. Motorning energetik ko'rsatkichlari pasayib ketganligi tufayli korxonadagi isroflar miqdoriga sezilarli ta'sir ko'rsatmoqda. Ta'mirdan keyingi asosiy kamchiliklar motor chulg'amini noto'g'ri hisoblash yoki noto'g'ri o'rash bilan bog'liqligini kuzatish mumkin.

Sanoatda energiya samaradorligi bo'yicha loyihalarni joriy etishda, uning samaradorligini baholash muhim ahamiyatga ega bo'lib, loyihalarni tanlashda hal qiluvchi omil hisoblanadi. Energiya tejash tadbirlarini iqtisodiy samaradorligini baholashni eng samarali usuli iqtisodiy va natural ko'rsatkichlar kompleks tahlil qilish hisoblanadi. Hozirgi kunda energiya samaradorlik bo'yicha loyihalarni baholashda dunyoda "Sof diskontlangan foyda" uslubiyotidan keng foydalaniladi [21]. Bunda loyiha barcha harajatlari va kelgusida olinadigan foyda loyiha ko'rilayotgan vaqt qiymatiga keltiriladi.

Sanoatda energiya tejash bo'yicha loyihalarning samaradorligini tavsiflovchi asosiy ko'rsatkichlarga quyidagilar kiradi:

- sof diskontlangan foyda (integral samara, sof foydaning hozirgi kunga keltirilgan qiymati, va sh.o'.);

- investitsiyalarni sof foyda keltirish indeksi (loyihaning samaradorlik koeffitsienti);

- foydaning ichki me'yoriy qiymati, FIMQ.

Kapital harajatlarni qoplash muddati:

- dinamik, T_0 ;

- statik, T_{st} .

Sof diskontlangan foyda deb loyihani xizmat ko'rsatish vaqti davomida kelgusida keladigan barcha foydalarning hozirgi kunga keltirilgan qiymatidan kelgusida bo'ladigan barcha harajatlarni hozirgi kunga keltirilgan qiymatini ayrilganiga aytiladi.

Sof diskontlangan foydani hisoblash uchun diskont stavkasini aniqlash lozim. Bu qiymat odatda kapital yil davomida keltiradigan foydani foiz miqdori qabul qilinadi.

Sof diskontlangan foyda (SDF) quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$C\mathcal{D}\Phi(NPV) = \sum_1^n \frac{\Phi_t - X_t}{(1 + E_n)^t} \quad (5.32)$$

bu yerda: F_t – bir yildagi umumiy foyda; X_t – bir yildagi harajatlar; E_n – diskont stavkasi, n – loyihani davom etish vaqti.

Real diskont stavkasi quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$E_p = \frac{1 + E_n}{1 + E_u} - 1 \quad (5.33)$$

bu yerda: E_n – nisbiy qiymatdagi nominal stavka; E_u – o'rtacha yillik kutiladigan inflyasiya qiymati.

Loyiha foydasining ichki normasi (yoki rentabellikning ichki normasi) diskont stavkasining shunday qiymatiga aytiladiki, bunda foyda va harajatlar teng bo'ladi. Yoki boshqacha qilib aytganda, foydaning ichki stavkasi deb diskont stavkasining sof diskontlangan foyda nolga teng bo'ladigan qiymatiga aytiladi. Bu qiymat ketma-ket yaqinlashish orqali aniqlanadi.

Foyda indeksi (FI) deb umumiy keltirilgan foydani umumiy kapital harajatlarga nisbatiga aytiladi:

$$\Phi H(NPVQ) = \frac{1}{I_0} \cdot \sum_1^n (\Phi_t - X_t) \cdot \frac{1}{(1 + E_n)^t} \quad (5.34)$$

Kapital harajatlarni qoplash muddati loyihaga sarflanadigan kapital harajatlarni foyda hisobidan to'la qoplanadigan yillar soniga aytiladi. Dinamik va statik qoplash muddati farqlanadi. Statik qoplash muddati investorni birlamchi kapital harajatlarni qaytarish muddatiga aytiladi va quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$T_0 = \frac{K}{\Phi_\tau} \quad (5.35)$$

Dinamik qoplash muddati T_0 deb investor sarflagan harajatlarni to'la qaytarib va me'yoriy foydani oladigan vaqtga aytiladi. Bu qiymat quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$\sum_{t=1}^{T_0} \frac{\Phi_t}{(1 + E)^t} - K = 0 \quad (5.36)$$

Hozirgi kunda eng samarador ETTni tanlash uchun umumiy diskontlangan harajatlardan foydalaniladi. U quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$VDX = \left(K_{H1} + \sum_{t=1}^T \frac{C_{1t} - A_{1t} + HH_{1t}}{(1 + E)^t} \right) \quad (5.37)$$

bu yerda: muvofiq ravishda variantlar bo'yicha: K_n - diskontlangan kapital harajatlari, S_t , A_t –yillar joriy harajatlari amortizatsiya ajratmalari t ; NI_t mol-mulk solig'i.

Diskontlangan kapital harajatlari (boshlang'ich vaqtga keltirilgan kapital harajatlari) quyidagi ifodadan topiladi:

$$K_H = \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1 + E)^t} + \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1 + E)^t} \quad (5.38)$$

bu yerda: T – hisoblanadigan davr; K_t -yillik kapital harajatlari; E -yillik UDX quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$VDX = \left(K_{H1} + \sum_{t=1}^T \frac{C_{1t} - A_{1t} + HH_{1t}}{(1 + E)^t} \right) \cdot \beta_{T1} \quad (5.39)$$

bu yerda: β_{T1} - annuitet koeffitsienti, ya'ni diskont stavkasiga teskari kattalik.

Yillik joriy harajatlar o'zgaras bo'lganda UDX quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$YDX = K_{H1} \cdot \beta_{T1} + (C_1 - A_1), \quad (5.40)$$

O'zgaruvchan yillik joriy harajatlar va eski uskunalarni yangisiga almashtirishga mo'ljallangan loyihalarda UDX quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$YDX_1 = \sum_{t=1}^{T_1-T_e} \frac{C_{1t} - A_{1t} + HHI_{1t}}{(1+E)^t} + \left(\sum_{t=1}^{T_1} \frac{C_{1t} - A_{1t} + HHI_{1t}}{(1+E)^t} + K_1 \right) \cdot \frac{(1+E)^{T_e}}{(1+E)^{T_1} - 1} \quad (5.41)$$

$$YDX_2 = \left(\sum_{t=1}^{T_2} \frac{C_{2t} - A_{2t} + HHI_{2t} + \Delta HHI_t}{(1+E)^t} + K_2 \right) \cdot \frac{(1+E)^{T_e}}{(1+E)^{T_1} - 1} - U_{\Pi P} \quad (5.42)$$

bu yerda: S_{1t}, S_{2t} – eski va yangi loyihalarni yillik joriy harajatlari; A_{1t}, A_{2t} – eski va yangi asosiy vositalardan yillik amortizatsiya ajratmalari; K_1 – eski uskunalarni qayta tiklash qiymati; K_2 – yangi loyihaga sarflanadigan kapital harajatlar; S_{pr} – soliqlardan tashqari eski uskunalarni sotishdan olingan qiymat; T_1, T_2 – eski va yangi uskunalarni xizmat ko'rsatish muddati, yil; T_e – eski uskunani almashtirishgacha ishlagan vaqti, yil; $(T_1 - T_e)$ – texnik vositalarni almashtirish vaqtidan eski uskunalarni me'yoriy ishlash muddatigacha bo'lgan vaqt oralig'i kiradi.

Kapital harajatlarni qoplash muddati loyihadan olingan sof foyda hisobidan to'la qoplanadigan muddatni yil hisobida aniqlaydi. Statik va dinamik qoplash muddati farqlanadi. Statik qoplash muddati dastlabki kapitalni qaytarib olish muddatini aniqlaydi va quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$T_0 = \frac{K}{D_\tau} \quad (5.43)$$

Dinamik qoplash muddati esa, dastlabki kapitalni qaytarib olib me'yoriy foydani olish muddatini aniqlaydi va quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$\sum_{t=1}^{T_0} \frac{D_t}{(1+E)^t} - K = 0 \quad (5.44)$$

SHunday qilib, ma'lum davrda bo'ladigan sarf harajatlar va foyda diskontlash orqali shu kunning qiymatiga keltiriladi.

Elektr mexanik majmualar va tizimlar ish parametrlarini optimallashtirishning asosiy masalasi eng yuqori samaradorlikni ta'minlovchi qiymatlarini aniqlash va bu parametrlarni rostlash ko'zda tutiladi.

Transformator ish rejimi parametrlarini korxona energiya samaradorlik ko'rsatkichlariga ta'siri. Transformatorlarning ish rejimlarini o'rganishda uning yuklamasini tahlil qilish muhim ahamiyatga ega bo'ladi. Bundan tashqari, ayrim hollarda energiya sarfini sexlar bo'yicha emas, TP lar bo'yicha hisoblash qulayroq bo'ladi. Chunki, transformatoridagi isroflar faqat shu podstantsiya yuklamasiga qo'shilishi kerak. Transformator podstantsiyasi o'rnini, sonini, quvvatini energiya tejamlilik nuqtai nazaridan oqilona tanlash masalalari [17] ishlarda ko'rib chiqilgan.

Transformatorlardagi isroflar:

$$\Delta P_{TP} = n \cdot (\Delta P_k \cdot \beta^2 + \Delta P_0) \quad (5.45)$$

bu yerda, n -transformatorlar soni, dona; ΔR_k va ΔR_0 -qisqa tutashuv va salt ishlash quvvat isroflari, kVt; β -transformatorni yuklantirish koeffitsienti.

Transformatoridagi energiya isrofi:

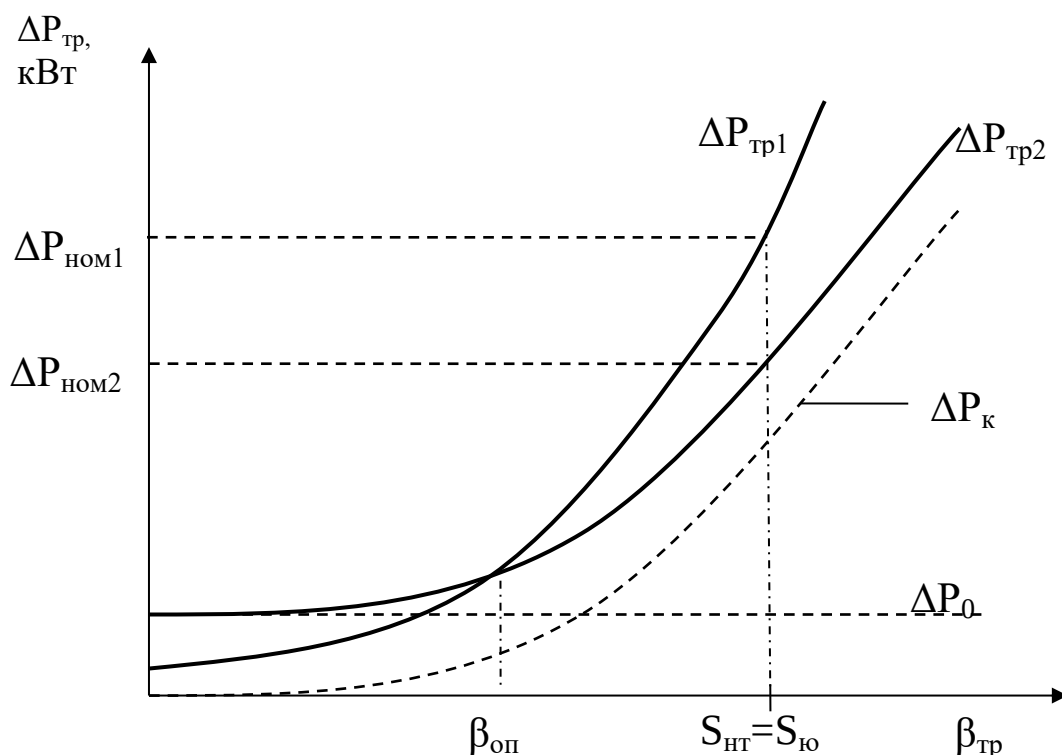
$$\Delta A_{TP} = n \cdot (\Delta P_k \cdot \beta^2 \cdot \tau + \Delta P_0 \cdot T_{ul}) \quad (5.46)$$

bu yerda, τ -maksimal isroflar vaqti, soat/yil; T_{ul} -transformatorni tarmoqqa ulanish vaqti, soat/yil.

Transformatorlar quvvat isrofini yuklantirish koeffitsientiga bog'liqlik grafigi 5.21-rasmda ko'rsatilgan. Rasmdan ko'rinadiki optimal yuklantirish koeffitsientidan katta qiymatda ikki transformatorli podstantsiyada isrof kam bo'ladi. SHuning uchun kam yuklangan transformatorni o'chirish faqat texnik iqtisodiy hisoblashlardan keyin bajarilishi kerak.

Reaktiv quvvatni qoplashning samaradorlik ko'rsatkichlariga ta'siri. Elektr energiyasi isroflarini kamaytirishning yana bir vositasi quvvat koeffitsientini oshirish hisoblanadi. Energotizimda iste'mol qilinadigan reaktiv quvvatning 30 %

dan ortiqrog'i transformatorlarga to'g'ri keladi. Bu quvvatning 80 % transformatorlarning salt ishlashiga to'g'ri keladi. SHuning uchun, odatda kam yuklangan kichik quvvatli transformatorlarga almashtiriladi yoki qoplovchi uskunalar qo'llaniladi. Qoplovchi uskunalar sifatida ko'pincha statik kondensatorlar batareyasi qo'llaniladi [28, 50, 95]. Ular ixcham, kam isrofli va xohlagan quvvatni hosil qilish mumkin bo'lgani uchun keng qo'llaniladi.



5.21-rasm. 1 va 2 transformatorli podstansiya quvvat isrofini yuklanish ko'effitsientiga bog'liqlik grafigi

Transformatoridagi quvvat isrofining kamayishini ko'rib chiqamiz. Reaktiv quvvat qoplanmagan transformatoridagi quvvat isrofi:

$$\Delta P_{TP} = n \cdot (\Delta P_k \cdot \beta^2 + \Delta P_0) \quad (5.47)$$

bu yerda:

$$\beta^2 = \frac{S_{IO}^2}{n^2 \cdot S_{HM}^2} = \frac{P_{IO}^2 + Q_{IO}^2}{n^2 \cdot S_{HM}^2} \quad (5.48)$$

bo'ladi.

Reaktiv quvvat qoplangandan keyin yuklanish koeffitsientining kvadrati quyidagiga teng bo‘ladi:

$$\beta_{ky}^2 = \frac{P_{\text{ю}}^2 + (Q_{\text{ю}} - Q_{ky})^2}{n^2 \cdot S_{\text{нм}}^2} = \frac{P_{\text{ю}}^2 + Q_{\text{ю}}^2}{n^2 \cdot S_{\text{нм}}^2} - \frac{2 \cdot Q_{\text{ю}} \cdot Q_{ky} + Q_{ky}^2}{n^2 \cdot S_{\text{нм}}^2} \quad (5.49)$$

Transformatoridagi quvvat isrofining kamayishi:

$$\Delta P_{TP} = n \cdot (\Delta P_{\kappa} \cdot \beta^2 + \Delta P_0) - n \cdot (\Delta P_{\kappa} \cdot \beta_{ky}^2 + \Delta P_0) = n \cdot \Delta P_{\kappa} \cdot (\beta^2 - \beta_{ky}^2) \quad (5.50)$$

$$\text{bu yerda: } \beta^2 - \beta_{ky}^2 = \frac{P_{\text{ю}}^2 + Q_{\text{ю}}^2}{n^2 \cdot S_{\text{нм}}^2} - \frac{P_{\text{ю}}^2 + Q_{\text{ю}}^2}{n^2 \cdot S_{\text{нм}}^2} + \frac{2 \cdot Q_{\text{ю}} \cdot Q_{ky} - Q_{ky}^2}{n^2 \cdot S_{\text{нм}}^2} = \frac{2 \cdot Q_{\text{ю}} \cdot Q_{ky} - Q_{ky}^2}{n^2 \cdot S_{\text{нм}}^2} \quad (5.51)$$

bo‘ladi va quvvat isrofining kamayishi quyidagi ifodadan topiladi:

$$\Delta P_{TP} = n \cdot \Delta P_{\kappa} \cdot (\beta^2 - \beta_{ky}^2) = n \cdot \Delta P_{\kappa} \cdot \frac{2 \cdot Q_{\text{ю}} \cdot Q_{ky} - Q_{ky}^2}{n^2 \cdot S_{\text{нм}}^2} \quad (5.52)$$

Transformatoridagi kamayadigan energiya isrofi:

$$\Delta W_{mp} = n \cdot \Delta P_{\kappa} \cdot \frac{2 \cdot Q_{\text{ю}} \cdot Q_{ky} - Q_{ky}^2}{n^2 \cdot S_{\text{нм}}^2} \cdot \tau \quad (5.53)$$

Energiya isrofi narxi:

$$\Delta U_{mp} = n \cdot \Delta P_{\kappa} \cdot \frac{2 \cdot Q_{\text{ю}} \cdot Q_{ky} - Q_{ky}^2}{n^2 \cdot S_{\text{нм}}^2} \cdot m \quad (5.54)$$

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Kamharajat energiya tejash tadbirlariga nimalar kiradi?
2. O‘rta harajatli energiya tejash tadbirlariga nimalar kiradi?
3. Katta harajatli energiya tejash tadbirlariga nimalar kiradi?
4. sof diskontlangan foydanim?
5. investitsiyalarni sof foyda keltirish indeksi nima?
6. foydaning ichki me‘yoriy qiymati nima?
7. Kapital harajatlarni qoplash muddati nima?

VI-BOB. ELEKTR MASHINALARNI RAQAMLI MODELLASHTIRISH ASOSLARI

6.1. Elektr mashinalarni kompyuterda modellashtirish asoslari va vositalari

Kalit so'zlar: matematik model, analogli modellashtirish, raqamli modellashtirish, kompyuter dasturi, electronics workbench demo, algoritmi, geometrik modellashtirish, funksiya grafiklarini approksimatsiyalash, interpolatsiya, ekstrapolyatsiya

Ilmiy tadqiqotlar o'tkazishda va malakali kadrlar tayyorlash jarayonida turli xil kompyuter dasturlaridan foydalanish, ta'lim jarayoni uchun sarflanadigan vaqtni kamaytirishga va kadrlar sifatini yaxshilashga yordam beradi. Chunki kompyuter dasturlari orqali o'qish jarayonidagi tajribalarni, hisoblash ishlarini virtual loyixalash mumkin. Elektrotexnika, elektromexanika elektrotexnologiya yo'nalishlari uchun kadrlar tayyorlash jarayonida bir nechta loyixalash ishlari bajariladi, bu loyixalash ishlari qo'lda bajarilib, hisoblashlar bajarish uchun katta vaqt talab qilinadi. Ushbu dasturlar orqali kurs loyixalarini hisoblash uchun ketadigan vaqtni tejash bilan birga loyixalanayotgan elektrotexnik majmualarni ikki yoki uch o'lchovli ko'rinishini ko'rish va shu loyixalash ishida kechadigan jarayonlarni kuzatish mumkin. Bu darslarda loyixalash dasturlarini qo'llash orqali qurilmalarning uch o'lchovli ko'rinishini ko'rsatish mumkin. Qurilmaning uch o'lchovli ko'rinishdagi modellar bilan dars o'tish o'quvchi qurilma haqida tasavvurga ega bo'lishi va shu orqali qurilma haqidagi bilimlarni chuqur o'zlashtirishiga yordam beradi.

Elektr mashinalarni o'rganishning o'ziga xosligi bu uskunalarni hayot uchun xavfli ekanligi va jarayonlarni bevosita kuzatib bo'lmazligi hisoblanadi. Shuning uchun, bu tajribalarni EHMda uskunalarni raqamli modellarida o'tkazish maqsadga muvofiqdir. Chunki, talaba o'rganish jarayonida mustaqil sxemalarni yig'ib

natijalarni tahlil qilib to'g'ri natijaga erishadi. Bunday dasturlar hozirgi paytda keng qo'llanilib kelmoqda, ammo bu dasturlar ichida foydalanishga ancha qulay va ko'rgazmali bo'lgan "electronics workbench demo" dasturini alohida ta'kidlash mumkin. U «windows» operatsion tizimda ishlashga mo'ljallangan bo'lib, ko'p darchali tizimda ishlaydi. Dastur ishga tushirilgandan keyin dastur menyusida elektrotexnika va elektr zanjirlarining elementlarini o'zida jamlagan tasvirli tugmalar paydo bo'ladi. Bu tugmalar elementlarning vazifasiga ko'ra o'ziga jamlagan bo'ladi. Masalan, elektr energiya manbalari, passiv parametrlar, o'lchov asboblari, noxiziqli elementlar, yarim o'tkazgichli elementlar va shunga o'xshashlar. Har bir elementlar tugmasi faollashtirilganda shu guruhga mansub bo'lgan elementlar paydo bo'ladi va tanlanadi. Masalan, Manbalar tugmasi bosilganda, o'zgarma yoki o'zgaruvchan kuchlanish yoki tok manbalari chiqadi. Passiv elementlarda esa, aktiv qarshilik, o'zgarma yoki o'zgaruvchan sig'im yoki induktivlik hosil bo'ladi. O'zgarma tok motorlarini "electronics workbench demo" dasturida o'rganiladi.

Hozirgi zamon hisoblash mashinalari informatsiyani tasvirlash usuliga va ishlash printsiptiga ko'ra ikki sinfga bo'linadi:

Analogli yoki modellovchi hisoblash mashinalari. Bu mashinalarda informatsiya uzluksiz ravishda o'zgaradigan fizik miqdorlar (chiziqlarning uzunligi, valning aylanish burchagi, elektr tokining quvvati, kuchlanishi va h.k.) yordamida tasvirlanadi. Ular, odatda biron fizik jarayon yordamida u yoki bu matematik masalani modellaydi. Bunday mashinalarga hozirgacha keng tarqalgan logarifmik lineyka misol bo'la oladi.

EHMda analogli mashinalardan planimetrlar, integraflar, garmonik va differentsial analizatorlar, elektro va gidro - analizatorlar ishlatiladi. Analogli mashinalarning aniqligi odatda katta bo'lmaydi va ular tor sinfdagi maxsus masalalarni yechish uchun mo'ljallanadi.

Raqamli hisoblash mashinalari. Bu'larda informatsiya biror fizik miqdorning diskret qiymatlari yordamida tasvirlanadi va bu mashinalar biror sanoq tizimi-

(ikkilik, uchlik, o'nlik va x.k.) da tasvirlangan sonlar ustida amallar bajaradi; hisob natijasi yana biror sanoq tizimida yoziladi. Hisobning aniqligi mashinalar so'zi razryadlarining miqdorlariga bog'liq.

EHMlarning murakkab masalalarni yechishga qo'llanilishi algoritmlarning turgunligini talab qiladi. Buning ma'nosi shundan iboratki, odatda biror natijani olish uchun ko'rsatilgan metod bilan ketma-ket hisoblashlarni bajarish kerak, agar aniqlikni orttirsak, bu hisoblashlar ketma-ketligi yanada kattalashadi. Hisoblashning biror qadamida yo'l qo'yilgan xato keyingi qadamlarda ham o'z ta'sirini ko'rsatadi. Bu ta'sir turli algoritm uchun turlichadir.

Agar hisoblashning dastlabki qadamlarida yo'l qo'yilgan xato, keyingi qadamlarda hisoblash aniq, bajarilganda ortmasa yoki xech bo'lmaganda bir xil tartibda bo'lsa, u holda hisoblash algoritmi *dastlabki xatoga nisbatan turgun* deyiladi. Agarda qadamdan-qadamga utganda xato ortib borsa, u vaqtda *algoritm noturgun* deyiladi.

Hozirgi kunda kompyuterda modellashtirish texnologiyasi mavjud bo'lib, uning maqsadi atrofimizni o'rab turgan tabiat, unda ro'y beradigan hodisa, voqealarni va jamiyatdagi o'zgarishlarni anglash, tushunib yetish jarayonini zamonaviy usullar vositasida tezlashtirishdir.

Kompyuterdan foydalanishning muhim yo'nalishlaridan biri – bu, ob'ekt, hodisa yoki jarayonlarni kompyuter yordamida modellashtirishdir. Inson bevosita kuzata olmaydigan fizik, kimyoviy, biologik va boshqa jarayonlarni kompyuterda modellashtirishi mumkin. Modellashtirish kompyuterda masalani yechishning bir tarkibiy qismi bo'lib hisoblanadi. Kompyuterda modellashtirish texnologiyasini o'zlashtirish kompyuter tizimlarini (vositachi qurilma sifatida) yaxshi bilishni va unda modellash texnologiyalarini ishlata olishni talab qiladi.

Kompyuterda modellashtirish ilmiy izlanishlarning yangi usullaridan biri bo'lib quyidagilarga asoslanadi:

1. o'rganilayotgan ob'ektni tasvirlash uchun uning matematik modelini qurish;

2. juda katta tezlikka ega bo'lgan va inson bilan muloqot qila oladigan yangi hisoblash mashinalaridan foydalanish.

Kompyuterda modellashtirishning asl mohiyati quyidagicha: Kompyuter yordamida matematik modelga asoslanib, bir qator hisoblash tajribalari o'tkaziladi, ya'ni ob'ekt yoki jarayon xossalari o'rganiladi, uning optimal parametrlari va ishlash rejimi topiladi, model aniqlashtiriladi.

Umuman olganda, kompyuterli modellashtirish metodologiyasida quyidagi yo'nalishlarga bo'linadi:

1. Geometrik yo'nalishdagi tajribalarni tashkillashtirish koordinatalar tekisligida amalga oshiriladi. Kompyuter geometrik ob'ektlarning xossalarini o'rganish va matematik farazlarni tekshirishda modellarni qurish va ularni tadqiq etish vositasi sifatida ishlatiladi.

2. Ikkinchi yo'nalish turli harakatlarni modellashtirish bilan bog'liq. Kompyuter modellari orqali turli harakatli masalalarni yechish mumkin. Bu ro'y beradigan jarayonlarniing mohiyatini chuqurroq va kengroq anglash, olingan natijalarni haqiqiy baholash va kompyuterda modellashtirish imkoniyatlari haqidagi tasavvurlarning kengayishiga olib keladi.

3. Uchinchi yo'nalish – kompyuter ekranida funksiya grafiklarini modellashtirish – kasbiy kompyuter tizimlarida keng qo'llaniladi. Masalan, Logo dasturi funksiya grafiklari, tenglama va tenglamalar tizimini yechish va ularning natijalarini olish imkoniyatlarini beradi. Eng muhimi, kompyuterda modellashtirish texnologiyasidan foydalanish huquqiy voq'elikni anglash, bilish jarayonini amalga oshirishda yangi bosqich rolini o'ynaydi.

Kompyuterda hisoblash tajribalarini o'tkazish juda qimmatli tabiiy sharoitdagi tajribalarni almashtirishga imkon beradi. U ortiqcha qarajatlarsiz va qisqa vaqtda loyihalashtirilayotgan ob'ekt yoki jarayonni ko'p variantli tadqiq qilishga imkon beradi. Bu esa, murakkab tizimlarni ishlab chiqishda va uni ishlab chiqarishga tadbqiq etishda yetarlicha vaqtni qisqartiradi.

Kompyuterda modellashtirish va hisoblash tajribalari ilmiy tadqiqotlarni o'rganishning yangi usullaridan bo'lib, matematik modellar qurishda ishlatiladigan matematik apparatlarni rivojlantirishni talab etadi hamda matematik usullarni ishlatgan holda matematik modellarni aniqlashtirishga yordam beradi. Zamonaviy yirik ilmiy-texnik va ijtimoiy iqtisodiy muammolarni hisoblash tajribalarini o'tkazish yordamida hal qilish kelajakda muhim ahamiyat kasb etadi. Masalan, atom elektr stansiyalari uchun reaktorlarni loyihalash, gidroelektr stansiya va platinalarni loyihalashtirish, iqtisodiy sohada region yoki bir davlat balans rejalarini tuzish va boshqa.

Ayrim jarayonlar, masalan, muayyan tabiiy sharoitdagi tajribalarni o'tkazish inson hayoti va sog'ligi uchun juda xavfli bo'lsa, bunday joylarda yagona imkoniyat kompyuter hisoblash tajribalaridan foydalaniladi. Masalan, termoyaderli sintez o'tkazish, kosmik fazoni o'rganish, kimyoviy jarayonlarni o'rganish va loyihalash va boshqa.

Kompyuterda modellashtirish hodisa va jarayonlarni matematik modellashtirishga asoslangan bo'ladi. Matematik modellashtirish barcha modellar ichida eng universal modelashtirish sifatida fizik modelni tuzmasdan turib, ob'ekt holati to'g'risidagi ma'lumotlarni olish imkonini beradi va u eng samarali va qimmatlidir. *Matematik modellashtirish* - real ob'ektni, jarayonni yoki tizimni matematik modelga almashtirish yo'li bilan o'rganuvchi, hamda kompyuter yordamida tajriba tadqiqotlarini o'tkazish uchun mo'ljallangan eng qulay vositadir

Matematik model - real ob'ekt, jarayon yoki tizimning matematik terminlarda ifodalangan va uning mavjud belgilarini ifodalovchi, unga tajriban yaqin bo'lgan nusxasidir. Modelning tajribiylik harakteri turli ko'rinishda namoyon bo'lishi mumkin. Masalan, tajriba o'tkazish mobaynida foydalanadigan asboblarning aniqligi olinayotgan natijaning aniqligiga ta'sir etadi. *Matematik model* mantiqiy matematik konstruksiyalar yordamida sanoqli formada ob'ekt, jarayon yoki tizimning asosiy xossalarini ifodalaydi va, bundan tashqari uning parametrlarini, ichki va tashqi aloqalarini ham tasvirlaydi.

Matematik modelni tasvirlash forma va tamoyillari ko'p faktorlarga bog'liq bo'ladi.

Matematik modelni qurish tamoyili quyidagilarga bo'linadi:

1. analitik;
2. imitatsion.

Analitik modelda real ob'ekt, jarayon yoki tizim funktsiya qilish jarayoni aniq funksional bog'lanishlar ko'rinishida yoziladi.

Analitik model matematik muammoga bog'liq ravishda quyidagi turlarga bo'linadi:

- 1) tenglama (algebraik, transsendent, differensial, integral),
- 2) approksimatsiya masalalari (interpolyasiya, ekstrapolyasiya, sonli integrallash va differentsiallashtirish),
- 3) optimizatsiya masalalari,
- 4) stoxastik muammolar.

Ob'ektni modellashtirishda uning murakkabligi ko'p hollarda analitik modelni qurishda qiyin muammolarni keltirib chiqaradi. Bunday hollarda tadqiqotchi imitatsion modellashtirishni ishlatishga majbur bo'ladi.

Matematik model qurish uchun quyidagilar kerak:

- 1) real ob'ekt yoki jarayonni chuqur tahlil qilish kerak;
- 2) mavjud eng asosiy xossa va xususiyatlarni ajratish kerak;
- 3) o'zgaruvchilarni aniqlash kerak, ya'ni ob'ekt xossalari hamda uning asosiy xususiyatlariga ta'sir qiluvchi parametrlar va ularning qiymatlari aniqlanishi kerak;

4) ob'ekt, jarayon yoki tizimning asosiy xossalari o'zgaruvchilar qiymatlariga bog'liqligi mantiqiy-matematik munosabat (aloqa) yordamida aniqlanishi kerak (tenglama, tenglik, tengsizlik, mantiqiy-matematik konstruktsiya);

5) ob'ekt, jarayon yoki tizim ichki bog'lanishlarini cheklanishlar, tenglama, tenglik, tengsizlik va mantiqiy-matematik konstruktsiyalar yordamida ajratish zarur;

6) tashqi aloqalarni aniqlash va ularni cheklanishlar, tenglama, tenglik, tengsizlik va mantiqiy-matematik konstruksiyalar yordamida tavsiflash zarur.

Matematik modellashtirish, ob'ekt, jarayon yoki tizimni tadqiqot qilishdan va uning matematik tavsifini tuzishdan tashqari, yana quyidagilarni ham o'z ichiga oladi:

- 1) ob'ekt, jarayon yoki tizim holatini modellashtiruvchi algoritm tuzish;
- 2) hisoblash va tabiiy tajribalar o'tkazish yordamida model, ob'ekt, jarayon yoki tizimning mosligini tekshirish;
- 3) modelni to'g'rilash;
- 4) modelni ishlatish.

O'rganilayotgan ob'ekt, jarayon yoki tizimni matematik ifodalash quyidagilarga bog'liq:

- 1) tabiatdagi barcha real jarayon yoki tizimlar fizika, kimyo, mexanika, termodinamika, gidrodinamika, elektrotexnika, elastiklik va elastiklik nazariyasi qonunlariga asoslangan holda tuziladi.
- 2) real jarayon yoki tizimni talab qilingan ishonchli va aniqlikda o'rganish va tadqiqot qilish.

Matematik modelni tanlash bosqichida quyidagilar aniqlanadi: ob'ekt, jarayon yoki tizim chiziqli va chiziqsiz, dinamik yoki statik, statsionar yoki nostatsionar. Bulardan tashqari, o'rganilayotgan ob'ekt yoki jarayonning determinallashtirish darajasi ham aniqlanadi.

Matematik model hech vaqt qaralayotgan ob'ekt, jarayon yoki tizimni aynan bir xil ifodalamaydi. U soddalashtirishga asoslangan holda ob'ektni tajribiy ifodalaydi. SHu sababli natija, tahlil qilish natijasida olingan model tajribiy harakterga olib keladi. Uning aniqligi ob'ekt va modelning moslik darajasi bilan baholanadi.

Matematik modelni qurish qaralayotgan ob'ekt, jarayon yoki tizimning oddiy va ancha qo'pol bo'lgan matematik modelini qurish va tahlil qilish bilan boshlanadi. Keyinchalik, kerak bo'lgan holda, model aniqlashtiriladi.

Matematik modelning o'zi ancha murakkab, chiziqli bo'lmashligi mumkin. Buning natijasida uni amaliy matematikaning an'anaviy usullari yordamida sifatli o'rganib bo'lmaydi. Aynan shuning uchun ko'p hollarda anchagina sodda, lekin joriy matematik modelga nisbatan mazmunliroq masalada sifatli tadqiqot o'tkaziladi. Bunday hollarda asosiy modelning soddalashtirilgan masalalari (model uchun model) to'g'risida so'z yuritish lozim.

Matematik modellarni sifatli o'rganishda korrektilik muammolariga katta e'tibor qaratiladi. Avvalo, yechimning mavjudlik masalasi ko'riladi. Unga mos bo'lgan qat'iy natijalar (mavjudlik teoremasi) matematik modelning korrektiligiga kafolat beradi. Bundan tashqari mavjudlik teoremlarining konstruktivlik isbotlari qo'yilgan masalani tajribiy yechish usullariga asos qilib olinishi mumkin.

Amaliy matematik modellashtirishda kiruvchi ma'lumotlarning nisbatan kichik chetlanishlarida yechimning turg'unlik masalasi muhim ahamiyat kasb etadi. Turg'unmaslik (kichik chetlanishlarda yechimning cheksiz ortib ketishi) teskari masalalar uchun harakterli bo'lib, tajribiy yechimni olishda hisobga olinishi kerak.

Yechimning ko'pligi, yagona emasligi chiziqli bo'lmagan matematik modellar uchun xos bo'lishi mumkin. Matematik modellarni sifatli o'rganishda tarmoqlanish nuqtalari, yechimlarning bifurkatsiyasi, zaruriy yechimning ajratib ko'rsatish masalalari o'rganiladi.

Murakkab, ko'p parametrlil modellar kompyuterda sonli usullar bilan o'rganilishi mumkin. Analitik yechimdan farqli o'laroq (u yechimning masalaning u yoki bu shartiga parametrlil bog'liqligini ko'rsatadi), sonli usulda u yoki bu parametrl o'zgargan paytda masalani ko'p marta yechishga to'g'ri keladi. Lekin sonli yechim analitik yechimi bo'lmagan masalalar uchun ham olinishi mumkin.

Matematik modellashtirishda kompyuterlarni qo'llash bo'yicha kamida ikkita bosqich, ikkita darajani ajratib ko'rsatish mumkin. Birinchisi, nisbatan sodda matematik modellarni o'rganish bilan tavsiflanadi. Kompyuterlarni qo'llashning

ushbu bosqichida hisoblash vositalari amaliy matematikaning boshqa usullari bilan bir qatorda ishlatiladi.

Tadqiqotlarda tajribaviy ma'lumotlarni qayta ishlash muhim ahamiyat kasb etadi. Izlanuvchi tadqiqot bo'yicha o'rganilayotgan ob'ekt ma'lumotlarini o'zgartiradi, natijada ob'ekt to'g'risida yangi ma'lumot oladi va uni qayta ishlaydi. Bu ma'lumotlar o'lchovning tasodifiy xatoliklari bilan cheklangan. SHu bois tajribaviy ma'lumotlarni birinchi marta qayta ishlashda asosiy matematik apparat ehtimollar nazariyasi hamda matematik statistikaga asoslanadi. Tajribaviy tadqiqotlar tajriba paytida olingan ma'lumotlarni saqlashga va qayta ishlashga imkon beruvchi o'lchov-hisoblash komplekslari yordamida o'tkaziladi.

Har bir amaliy tadqiqotda sinov ma'lumotlari statistik jihatdan qayta ishlanadi. Alohida omillarning ta'sirini sonli baholash tajribaviy ma'lumotlarni u yoki bu aniqlikda interpolyasiyalaydigan emperik bog'liklarni qurishda bilinadi. Bunday holda mazmunli matematik modellar umuman bo'lmagan approksimatsiyali matematik modellardan foydalanish to'g'risida gapirish mumkin. U yoki bu masalani yechish uchun o'tkaziladigan tajribalar soni va sharti tajribani rejalashtirish bosqichida tanlanadi. Bu yerda muqobil tajriba matematik nazariyasi, tajribani rejalashtirish nazariyasining natijalari jalb qilinadi

Eksperimental tadqiqotlarning zamonaviy rivojlanish bosqichi mukammal qurilmalarning keng hamrovda qo'llanilishi bilan izohlanadi. Qurilmalarning o'zi o'rganilayotgan hodisa yoki jarayonga chetlanishlarni kiritadi. Bunday xatoliklardan qutilish uchun uskunaning matematik modeli quriladi.

Tajribalarni o'tkazish paytida ikkita mutlaqo turli holatni nazarda tutish kerak. Ulardan birinchisi o'rganilayotgan hodisa yoki ob'ekt uchun nazariy ta'rif, matematik model yo'q bo'lib, keyinchalik matematik ta'rif berish maqsadida tajribaviy materialni to'plash masalasining qo'yilishi bilan bog'liq. Bu holda matematik usullar ma'lumotlarni saqlash va qayta ishlash, xususan, emperik bog'liqliklarni o'rnatish uchun qo'llaniladi.

Approksimatsiyali matematik modellarni qurishda emperik formulalarning parametrlarini aniqlash, formulaning o'zini moslashtirish holati tabiiydir. Tajribaviy ma'lumotlar to'plamidan approksimatsiyali modellarning parametrlarini shunday tanlash kerakki, natijada tajribaviy ma'lumotlar katta aniqlikda ta'riflanishi mumkin bo'lsin. Bunda biz minimallashtirish masalalarini tajribiy yechish zaruriyatiga duch kelamiz.

Tajribalarning ikkinchi sinfi o'rganilayotgan ob'ektning nazariy ta'rifi berilgan sharoitda o'tkaziladi. Matematik model tarkibining aniq va modelning parametrlarini aniqlash masalasi qo'yiladi. Naturali tajribaning o'zi ob'ektning u yoki bu xususiyatini aniqlashga, ob'ektning matematik modeliga aniqlik kiritishga qaratilgan.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Electronics workbench demo kompyuter dasturi nima?
2. Analogli va raqamli modellashtirish nima bilan farq qiladi?
3. Geometrik funksiya grafiklarini approksimatsiyalash nima?

6.2. Modellashtirish natijalarini qayta ishlash va umumlashtirish metodlari

Kalit so'zlar: *interpolyatsiya, N'yutonning birinchi interpolyatsion formulasi, oldinga qarab interpolyatsiyalash, N'yutonning ikkinchi interpolyatsion formulasi, orqaga qarab interpolyatsiyalash, interpolyatsiya tuguni, ekstrapolyatsiya*

Energiyani elektromexanik o'zgartkichlarni tahlil qilishda tajribada olingan natijalarni tahlil qilishga to'g'ri keladi. Bunda tajribada olingan kattaliklarni o'zaro bog'liqlik grafiklari asosida bu bog'liklarni analitik ifodasini aniqlash masalasi qo'yiladi. Bu hollarda hisoblash matematikasi usullaridan foydalaniladi.

Aksariyat hollarda bu matematik metodlar masalaning qo'yilishida qatnashadigan funksiyalarni unga biror muayyan ma'noda yaqin va tuzilishi soddaroq bo'lgan funksiyalarga almashtirish goyasiga asoslangan bo'ladi. Bu

vazifani hal qilish maqsadida funktsiyalarni yaqinlashtirish masalasining eng sodda va juda keng qo'llaniladigan qismi — funktsiyalarni interpolatsiyalash masalasi ko'rib chiqiladi.

Interpolatsiya masalasining mohiyati quyidagidan iborat. Faraz qilaylik $y=f(x)$ funksiya jadval ko'rinishida berilgan bo'lsin:

$$y_0 = f(x_0), y_1 = f(x_1), \dots, y_n = f(x_n) \quad (6.1)$$

Odatda interpolatsiyalash masalasi quyidagicha ko'rinishda qo'yiladi: Shundai n -tartibidan oshmagan $R(x) = R_n(x)$ ko'phad topish kerakki, $P(x_i)$ berilgan $x_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$ nuqtalarda $f(x)$ bilan bir xil qiymatlarni qabul qilsin, ya'ni $P(x_i) = y_i$.

Bu masalaning geometrik ma'nosi quyidagidan iborat:

darajasi p dan ortmaydigan shunday

$$y = P_n(x) = a_0x^n + a_1x^{n-1} + \dots + a_n \quad (6.2)$$

ko'phad qurilsinki, uning grafigi berilgan $M_i(x_i, y_i)$ ($i = 0, 1, \dots, n$) nuqtalardan o'tsin (9-rasm). Bu yerdagi $x_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$ nuqtalar interpolatsiya tugun nuqtalari yoki tugunlar deyiladi. $R(x)$ esa interpolatsiyalovchi funktsiya deyiladi.

Amalda topilgan $R(x)$ interpolatsion formula $f(x)$ funktsiyaning berilgan x argumentning (interpolatsiya tugunlaridan farqli) qiymatlarini hisoblash uchun qo'llaniladi. Ushbu operatsiya funktsiyaning interpolatsiyalash deyiladi.

Faraz qilaylik $y=f(x)$ funksiya uchun $y_i=f(x_i)$ qiymatlar berilgan va interpolatsiya tugunlari teng uzoqlikda joylashgan bo'lsin, ya'ni $x_i = x_0 + ih$ ($i=0, 1, 2, \dots, h$) (h – interpolatsiya qadami). Argumentning mos qiymatlarida darajasi h dan oshmaydigan mos qiymatlar oladigan ko'phad tuzish lozim bo'lsin va bu ko'phad quyidagi ko'rinishga ega bo'lsin:

$$P_n(x) = a_0 + a_1(x-x_0) + a_2(x-x_0)(x-x_1) + \dots + a_n(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{n-1}). \quad (6.3)$$

Bu n -tartibli ko'phad. Interpolatsiya masalasidagi shartga ko'ra $R(x)$ ko'phad $x_0, x_1, \dots, x_n$ interpolatsiya tugunlarida $P_n(x_0)=y_0, P_n(x_1)=y_1, P_n(x_2)=y_2, \dots, P_n(x_n)=y_n$ qiymatlarni qabul qiladi. $x=x_0$ deb tasavvur etsak, (4.7) formuladan $y_0=P_n(x_0)=a_0$,

ya'ni $a_0=y_0$. So'ngra x ga x_1 va x_2 larning qiymatlarini berib, ketma-ket quyidagiga ega bo'lamiz:

$$y_1=P_n(x_1)=a_0+a_1(x_1-x_0), \text{ bundan } a_1=\frac{\Delta y_0}{h} \quad (6.4)$$

$$y_2=P_n(x_2)=a_0+a_1(x_2-x_0)+a_2(x_2-x_0)(x_2-x_1), \quad (6.5)$$

ya'ni $y_2 - 2\Delta y_0 - y_0 = 2h^2 a_2$

yoki $y_2 - 2y_1 + y_0 = 2h^2 a_2$, bundan $a_2 = \frac{\Delta^2 y_0}{2!h^2} \quad (6.6)$

Bu jarayonni davom ettirib, $x=x_n$ uchun quyidagi ifodani hosil qilamiz:

$$a_n = \frac{\Delta^n y_0}{n!h^n} \quad (6.7)$$

Topilgan $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ koeffitsientlarning qiymatlarini (6.3) formulaga qo'ysak,

$$P_n(x) = y_0 + \frac{\Delta y_0}{1!h}(x-x_0) + \frac{\Delta^2 y_0}{2!h^2}(x-x_0)(x-x_1) + \dots + \frac{\Delta^n y_0}{n!h^n}(x-x_0) \cdot \dots \cdot (x-x_{n-1}) \quad (6.8)$$

ko'rinishga ega bo'lamiz. Bu formulada $\frac{x-x_0}{h} = q$, ya'ni $x = x_0 + hq$ belgilash kiritilsa, u holda

$$\frac{x-x_1}{h} = \frac{x-x_0-h}{h} = q-1, \quad \frac{x-x_2}{h} = \frac{x-x_0-2h}{h} = q-2, \text{ va x.k.}$$

Natijada N'yutonning 1- interpolyatsion formulasiga ega bo'lamiz:

$$P_n(x) = P_n(x_0 + qh) = y_0 + q\Delta y_0 + \frac{q(q-1)}{2!}\Delta^2 y_0 + \dots + \frac{q(q-1) \cdot \dots \cdot (q-n+1)}{n!}\Delta^n y_0 \quad (6.9)$$

N'yutonning birinchi interpolyatsion formulasini $[a, b]$ ning boshlangich nuqtalarida qo'llash qulay.

Agar $p=1$ bo'lsa, u holda $P_1(x)=y_0+q\Delta y_0$ ko'rinishdagi chiziqli interpolyatsion formulaga, $p=2$ bo'lganda esa

$$P_2(x) = y_0 + q\Delta y_0 + \frac{q(q-1)}{2}\Delta^2 y_0 \quad (6.10)$$

ko'rinishdagi parabolik interpolyatsion formulaga ega bo'lamiz.

N'yutonning birinchi formulasini oldinga qarab *interpolyatsiyalash formulasi* ham deyiladi.

Faraz qilaylik $y=f(x)$ funktsiyaning $n+1$ ta qiymati ma'lum bo'lsin; ya'ni argumentning $n+1$ ta $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ qiymatlarida funktsiyaning qiymatlar $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$ bo'lsin. Tugunlar orasidagi masofa h o'zgarmas bo'lsin. Quyidagi ko'rinishdagi *interpolyatsion ko'phadni* ko'ramiz:

$$P_n(x) = a_0 + a_1(x-x_0) + a_2(x-x_0)(x-x_1) + a_3(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2) + \dots + a_n(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{n-1}) \quad (6.11)$$

Bunda qatnashayotgan $a_0, a_1, \dots, a_n$ noma'lum koeffitsientlarni topishni $x=x_n$ bo'lgan holdan boshlash kerak. So'ngra argumentga $x_{n-1}, x_{n-2}, \dots$ qiymatlar berib, Qolgan koeffitsientlar aniqlanadi.

Yuqorida qurilgan mulohazalarni (6.11) formula uchun ham qo'llasak, u holda noma'lum koeffitsientlar $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ larni topish uchun quyidagilarni hosil qilamiz:

$$a_0 = y_n, \quad a_1 = \frac{\Delta y_{n-1}}{1!h}, \quad a_2 = \frac{\Delta^2 y_{n-2}}{2!h^2}, \quad \dots, a_n = \frac{\Delta^n y_0}{n!h^n}$$

Topilgan koeffitsientlarning qiymatlarini (4.12) formulaga qo'ysak,

$$P_n(x) = y_n + \frac{\Delta y_{n-1}}{1!h}(x-x_n) + \frac{\Delta^2 y_{n-2}}{2!h^2}(x-x_n)(x-x_{n-1}) + \dots + \frac{\Delta^n y_0}{n!h^n}(x-x_n)\dots(x-x_1) \quad (6.12)$$

ko'rinishdagi *N'yutonning ikkinchi interpolyatsion formulasi* kelib chiqadi. Bu formulada $q=(x-x_n)/h$ belgilash kiritsak,

$$P_n(x) = y_n + q\Delta y_{n-1} + \frac{q(q+1)}{2!}\Delta^2 y_{n-2} + \dots + \frac{q(q+1)\dots(q+n-1)}{n!}\Delta^n y_0 \quad (6.13)$$

hosil bo'ladi. Ba'zan bu formulani *orqaga qarab interpolyatsiyalash formulasi* ham deyiladi. (4.14) formuladan $[a,b]$ kesmaning oxirgi nuqtalarida foydalanish qulayroqdir.

Topilishi lozim bo'lgan ko'phadning ko'rinishini quyidagicha olaylik:

$$L_n(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (6.14)$$

x_0 interpolatsiya tugunida

va nihoyat x_n interpolyatsiya tugunida

Ushbu ifodalarni tenglamalar tizimi ko`rinishida yozsak:

bu yerda x_i va y_i ($i=0,1,2, \dots, p$) – berilgan funksiyaning jadval qiymatlari. Bu tizimning determinanti

$x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ tugunlar ustma-ust tushmagan holda noldan farqli bo`ladi. Masala mazmunidan ravshanki,  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$  nuqtalar bir-biridan farqli, demak bu determinant noldan farqlidir. Shuning uchun ham (4.16) tizim va shu bilan birga qo`yilgan interpolatsiya masalasi yagona yechimga ega. Bu tizimni echib, $a_0, a_1, \dots, a_n$ larni topib (4.15) ga kuysak, $L_n(x)$ ko`phad aniqlanadi. Biz  $L_n(x)$  ning oshkor ko`rinishini topish uchun boshqacha yo`l tutamiz. Avvalo fundamental ko`phadlar deb ataluvchi $Q_i(x)$ larni, ya`ni

shartlarni kanoatlantiradigan n -darajali ko'phadlarni ko'ramiz.

239

izlanayotgan interpolatsion ko'phad bo'ladi. (6.17) shartni qanoatlantiruvchi ko'phad

$$Q_i(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_1) \dots (x-x_{i-1})(x-x_{i+1}) \dots (x-x_n)}{(x_i-x_0)(x_i-x_1) \dots (x_i-x_{i-1})(x_i-x_{i+1}) \dots (x_i-x_n)} \quad (6.19)$$

ko'rinishida bo'ladi. (4.19) ni (4.18) ga kuysak,

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n \frac{(x-x_0)(x-x_1) \dots (x-x_{i-1})(x-x_{i+1}) \dots (x-x_n)}{(x_i-x_0)(x_i-x_1) \dots (x_i-x_{i-1})(x_i-x_{i+1}) \dots (x_i-x_n)} \cdot y_i \quad (6.20)$$

Lagranj interpolatsion ko'phadi quyidagi ko'rinishni oladi:

$$L_n(x+th) = \omega_{n+1}^*(x) \sum_{j=0}^n \frac{(-1)^{n-j} f(x_j)}{(t-j)j!(n-j)!} \quad (6.22)$$

Ekstrapolyatsiya. ekstrapolyatsiya, ya'ni argumentning jadvaldagi qiymatlaridan tashqari qiymatlarida funktsiyaning qiymatini topish masalasi ustida to'xtalib o'tamiz. ekstrapolyatsiyalash odatda, jadvalning bir-ikki qadami miqyosida bajariladi. Chunki argumentning jadvaldagi qiymatidan uzoqroq qiymatida ekstrapolyatsiyalanganda xato ortib ketadi. Jadval boshida ekstrapolyatsiyalash uchun N'yutonning birinchi interpolatsion formulasi qo'llanilib, jadval oxirida esa, ikkinchisi qo'llaniladi. Interpolatsion ko'phadning tartibi odatda jadvalning amaliy o'zgarmas ayirmalarining tartibiga teng qilib olinadi.

Teskari interpolatsiya. Teskari interpolatsiya masalasi quyidagicha qo'yiladi: $y=f(x)$ funktsiyaning berilgan $\bar{u}$ qiymati uchun argumentning shunday $\bar{x}$ qiymatini topish kerakki, $f(\bar{x}) = \bar{y}$ bo'lsin. Faraz qilaylik, jadvalning qaralayotgan oralig'ida $f(x)$ funktsiya monoton va demak, bir qiymatli teskari funktsiya $x=\varphi(y)$ ($f(\varphi(y))=y$) mavjud bo'lsin. Bunday holda teskari interpolatsiya $\varphi(y)$ funktsiya uchun odatdagi interpolatsiyaga keltiriladi. $x=\varphi(y)$ qiymatni topish uchun Lagranj yoki N'yutonning tugunlari har xil uzoqlikda joylashgan hol uchun formulalardan foydalanish mumkin. Masalan, Lagranjning interpolatsion formulasi

$$L_n(y) = \sum_{i=0}^n x_i \prod_{j \neq i} \frac{y - y_j}{y_i - y_j} \quad (6.23)$$

ko`rinishga ega bo`lib, qoldiq hadi bo`ladi:

$$\varphi(y) - L_n(y) = \frac{\varphi^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \prod_{i \neq K} (y - y_i) \quad (6.24)$$

Agar $f(x)$ monoton bo`lmasa, yuqoridagi formula yaramaydi. Bunday holda u yoki bu interpolatsion formulani yozib, argumentning ma`lum qiymatlaridan foydalanib va funktsiyani ma`lum deb hisoblab, hosil bo`lgan tenglama u yoki bu usul bilan argumentga nisbatan yechiladi.

N'yutonning birinchi interpolatsion formulasi $[a,b]$ kesmaning boshlangich nuqtalarida interpolatsiyalash va kesmaning oxirgi nuqtalarida ekstrapolyatsiyalash uchun, ikkinchi formulasi esa, kesmaning oxirgi nuqtalarida interpolatsiyalash va kesmaning boshlangich nuqtalarida ekstrapolyatsiyalash uchun qo`llaniladi. Shuni ham aytish lozimki, ekstrapolyatsiyalash interpolatsiyalashga qaraganda kattaroq xatoliklar beradi, ya`ni uning qo`llanish chegarasi cheklangan. Lagranj va N'yuton interpolatsion formulalarini bir-birlari bilan solishtirsak quyidagilar bilan farqlanishini ko`ramiz.

Lagranj formulasidagi har bir had teng huquqli n -tartibli ko`phaddan iborat. Shuning uchun avvaldan (hisoblanmasdan avval) birorta hadini tashlab yubora olmamiz. N'yuton formulasining hadlari esa darajasi oshib boruvchi ko`phadlardan iborat bo`lib, ularning koeffitsientlari faktoriallarga bo`lingan chekli ayirmalardan iborat. Shuning uchun N'yuton formulasidagi kichik koeffitsientlar oldidagi hadlarni tashlab yuborishimiz mumkin. Ya`ni bu holda funktsiyaning oraliq qiymatlarini yetarli aniqlikda sodda interpolatsion formulalardan foydalanib hisoblash mumkin.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. N'yutonning birinchi interpolatsion formulasini yozing?
2. N'yutonning ikkinchi interpolatsion formulasini yozing?
3. Ekstrapolyatsiya nima?

6.3. Elektr mashinalarni tadqiq qilishda foydalaniladigan kompyuter dasturlari

Kalit so'zlar: *Crocodile dasturi, Crocodile Technology dasturi, AutoCAD Electrical dasturi, "Elektrik" dasturi, KiCad dasturi, ELCUT dasturi, Ansys multiphysics dasturi, Maxwell dasturi, Cedrat flux, Comsol multiphysics, Ansys Maxwell dasturi.*

Elektr mashinalardagi elektromexanik va elektromagnit jarayonlarni umumiy foydalanadigan va elektr mexanikasi tadqiqotlari uchun maxsus ishlab chiqarilgan kompyuter dasturlaridan foydalanib analitik tadqiqotlar olib borish mumkin. Bu dasturlarni qisqacha ko'rib chiqamiz [14, 20].

Crocodile dasturi. Elektrotexnika, elektromexanika elektrotexnologiya yo'nalishlari uchun kadrlar tayyorlash jarayonida bir nechta loyixalash ishlari bajariladi, bu loyixalash ishlari qo'lda bajarilib, hisoblashlar bajarish uchun katta vaqt talab qilinadi. Ushbu dasturlar orqali kurs loyixalarini hisoblash uchun ketadigan vaqtni tejash bilan birga loyixalanayotgan elektrotexnik majmualarni ikki yoki uch o'lchovli ko'rinishini ko'rish va shu loyixalash ishida kechadigan jarayonlarni kuzatish mumkin. Bu darslarda loyixalash dasturlarini qo'llash orqali qurilmalarning uch o'lchovli ko'rinishini ko'rsatish mumkin. Qurilmaning uch o'lchovli ko'rinishdagi modellar bilan dars o'tish o'quvchi qurilma haqida tasavvurga ega bo'lishi va shu orqali qurilma haqidagi bilimlarni chuqur o'zlashtirishiga yordam beradi.

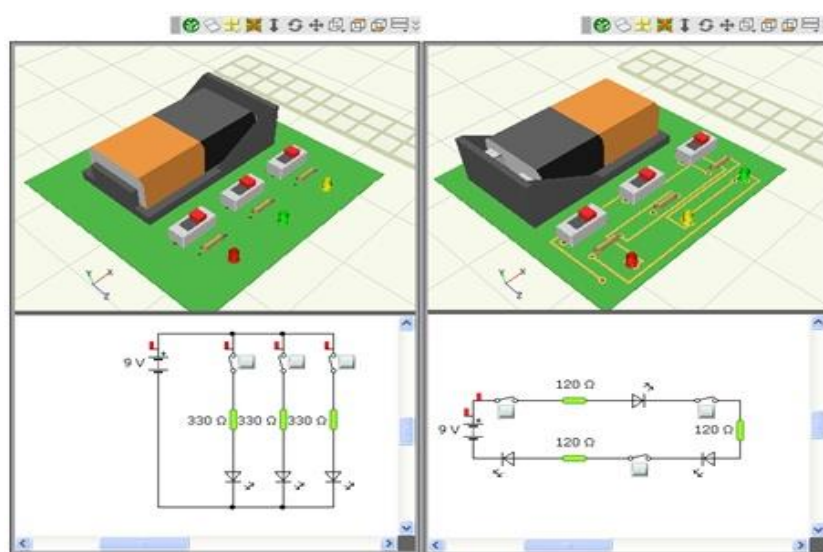
Fan – texnikaning rivojlanishi va axborot texnologiyalari sohasidagi erishilgan yutuqlar insoniyat oldida turgan turli-tuman yangidan yangi muammolarni yechishga imkon beradi. Ta'lim tizimida o'quv jarayonini tashkil qilishning sifat ko'rsatkichlari bo'yicha jahon andozalari darajasiga ko'tarish, zamonaviy pedagogik va axborot texnologiyalarini yurtimizda keng joriy etish metodikasini yaratish dolzarb uslubiy masalalardan hisoblanadi.

Crocodile Physics 605 o'zining yaratgan dasturlarini hozirda uy sharoitida o'qituvchi va o'quvchilar bepul foydalanishlari uchun imkoniyat yaratdi.

Fizika fanida Crocodile Physics 605 dastur muhitidan foydalanish. Crocodile Physics 605 dasturi fizik jarayonlarni modellashtirish va fizikaning mexanika, elektr zanjirlar, optika va to'liq hodisalari bo'limlariga oid tajribalar yaratish va kuzatish imkoniyatini beruvchi dasturdir. Bu kuchli dastur fizik hodisalarni kuzatish, tajribalar o'tkazish va turli murakkablik darajasidagi jarayonlarni modellashtirish imkoniyatini beradi.

Ushbu dastur Crocodile Clips Ltd tomonidan 1994 yildan beri takomillashtirilib kelinmoqda. Dasturdan masala yechishda, virtual laboratoriya ishlarini va namoyish tajribalarini tashkillashtirishda keng foydalansa bo'ladi. Dastur fizikaning barcha bo'limlari bilan ishlash, jarayonlarni chuqur o'rganish imkoniyatini yaratadi.

Dasturning o'ziga xos xususiyatlari: Fizik hodisalarni namoyish etuvchi optimal dastur, fizik jarayonlarni kompyuterda modelashtirish imkoniyati, mustaqil modellashtirish imkoniyatini beruvchi sodda interfeys, laboratoriya sharoitida o'tkazish qiyin bo'lgan tajribalarni amalga oshirish va kuzatish, dasturlning kuchli instrumentariyasi, tajribada qatnashayotgan fizik kattaliklarning qiymatini juda yaxshi aniqlik bilan hisoblash imkoniyatini beradi, fizik hodisada qatnashayotgan fizik kattalik bilan boshqa fizik kattaliklar o'rtasidagi grafikli bog'lanishni hosil qilish, yaratilgan modellarni saqlash va qog'ozga chop etish mumkin.



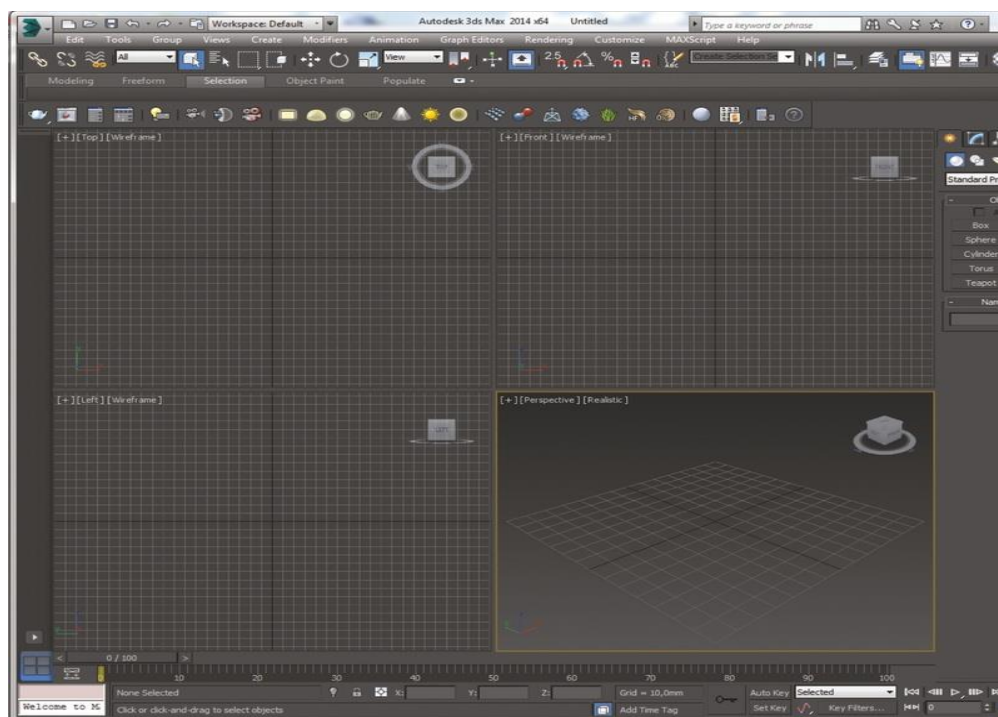
6.1-rasm. Crocodile Technology dasturi interfeysi.

Crocodile Technology dasturi. Crocodile Technology dasturidan elektrotexnika, elektr zanjirlar nazariyasini o'rganish kurslarida ham foydalanish mumkin. Dastur elektron konstruktor bo'lib, u monitor ekranida elektr sxemalarini yig'ish jarayonini xuddi haqiqiy tajribadagi singari imitatsiya qilish, elektr kattaliklarni multimetrda (3 o'lchovli), ampermetr va voltmترلarda o'lchash imkoniyatini beradi.

Masalan, dasturda: Mikroprotsessorlarni dasturlash va robototexnikaga oid modellarning 3D ko'rinishda simulyatsiyalashtirish mumkin.

- Konstruktor detallarining tasviri va o'lchov asboblarning sxematik va haqiqiy ko'rinishda berilgan;
- Qarshilikdan oqib o'tayotgan tok quvvatining qiymati berilgan nominaldan ortib ketsa, qarshilik (portlab) kuyadi, bu esa ekranda uning rangi o'zgarib qoraygan detal ko'rinishiga o'tishi bilan ko'rsatiladi;
- Lampochka va elektr isitgich asboblari quvvatning nominal qiymatida yorqinlashadi, agar ulardagi quvvat ishchi qiymatidan ortib ketsa — kuyadi va bu asbob ekranda qorayib qoladi. Xuddi shuningdek ekranda boshqa detallardagi fizikaviy kattaliklarning o'zgarishi imitatsiya qilinadi;
- Ko'pgina jarayonlar va ularning natijalari tovushli effektlar orqali ifodalanadi. Bularning barchasi, talaba o'zi yo'l qo'ygan xatolarini ko'rishi, muvaffaqiyatsiz bajarilgan tajribaning sabablarini aniqlashni o'rganishi va elektr sxemalarini tajribani haqiqiy qurilmalarda bajarishdan oldin tahlil qilish ko'nikmalarini hosil qilish imkonini beradi.

Bu dastur, kasbi kim bo'lishidan qat'iy nazar foydalanuvchini izlanuvchanlikka, ijodiy fikr yuritishga, ish natijalarini tahlil qilishga o'rgatadi. Dastur imkoniyatlari juda keng bo'lib, undan amaliy mashg'ulotlarda (ya'ni masalalar yechishda) ayniqsa, virtual laboratoriya ishlarini bajarishda keng foydalanish mumkin.



6.2-rasm. AutoCAD Electrical dasturi asosiy oynasining ko'rinishi.

AutoCAD Electrical dasturi. 3D-modellashtirish o'zida maxsuslashtirilgan dasturiy ta'minotdan foydalanib, 3D-modelni (yoki uch o'lchovli obyekt ko'rinishidagi karkas model) ishlab chiqish tartibini ifodalaydi. Uch o'lchovli model chiziqlar va egri sirtlar bilan o'zaro bog'langan ko'pgina nuqtalar yordamida yaratiladi. Uch o'lchovli modellashtirish qo'llaniladigan sohalar doimo kengayib bormoqda. U quyidagi: o'yinlar, ya'ni realistik personajlarning modellashtirilishi amalga oshirilishi; tibbiyot — inson tanasi organlarining alohida modellarining yaratilishi; muhandislik — transport vositalari, yangi qurilma va inshootlar modeli ishlab chiqilishi; kinomatografiya — turlicha maxsus effektlar va xayoliy personajlar yaratilishi kabi sohalarni hamrab olmoqda. Shuningdek, reklama sohasida ham 3D-modellashtirishdan yetarlicha foydalanib kelinmoqda.

Mukammal dasturlardan tashqari, amaliy paketlar deb ataluvchi dasturlar ham mavjud. Ular tor ixtisosli funksiyalarni yaratishga yo'naltirilgan bo'lib, yuqorida keltirilgan muharrirlardan birida mukammal sahnani yaratishga yordam beradi. Masalan, Curios Labs Poser dasturi allaqachon tayyorlangan personajlar

bilan ishlashga va boshqa grafik muharrirga import qilishga yo'naltirilgan. DAZ Bryce — virtual tabiiy landshaftlarni yaratishga mo'ljallangan grafik paket. Tajribali foydalanuvchi o'zining loyihasini yaratish uchun ko'p hollarda bir qancha uch o'lchovli modellashtirish dasturlaridan foydalanadi. Xususan, ZBrush dasturi juda qulay hisoblanadi. Ushbu dastur grafik planshetlardan foydalanib, obyektlarga turli xil cho'tkalar bilan chizish orqali ularni modellashtirish imkonini beradi. Personaj modelini uch o'lchovli modellashtirish dasturlaridan birida yaratib, so'ngra Zbrush dasturiga import qilish va ishni oxirigi yetkazish (ajinlar, burushgan joylarni qo'shish va boshqalarni amalga oshirish) mumkin.

"Elektrik" dasturi. Elektr ta'minotini loyixalash kabellar va simlar turiga, elektr ta'minotidagi ist`emolchilar soni va xususiyatlariga bog'liq. Loyixalash jarayonini soddalashtirish maqsadida davlat standartlariga va texnik hujjatlarga mos keluvchi ma'lumotlar asosida oldindan kiritilgan formulalar yordamida hisoblashlar bajariladi. Elektr ta'minotini loyixalashda ishlatiladigan dasturlar katta korporatsiyalar tomonidan va individual programmistlar tomonidan taqdim etiladi.

Elektr energetiklar uchun ishlatiladigan "Elektrik" dasturining asosiy maqsadi elektr energetikning ishini sezilarni kamaytirish, hisoblashni bajarish uchun va elektr sxemasini loyixalash uchun minimum vaqt sarflashdir.

"Elektrik" dasturi imkoniyatlari:

- bir yoki uch fazali tokning aniq qiymatlari asosida elektr qurilamaning quvvatini hisoblash, yoki aksincha, elektr qurilmaning quvvatini bila turib, bir fazali ist`emolchining ist`emol qiladigan tokini va uch fazali ist`emolchining ist`emol qiladigan tokini hisoblash mumkin;
- tanlangan o'tkazgichning kesim yuzasida hosil bo'ladigan nominal tok va quvvatini aniqlash;
- qisqa tutashuv tokini aniqlash;
- tarmoqdagi kuchlanish isrofini aniqlash;
- kiritilgan qiymatlar asosida talab qilinadigan o'tkazgichning kesim yuzani aniqlash;

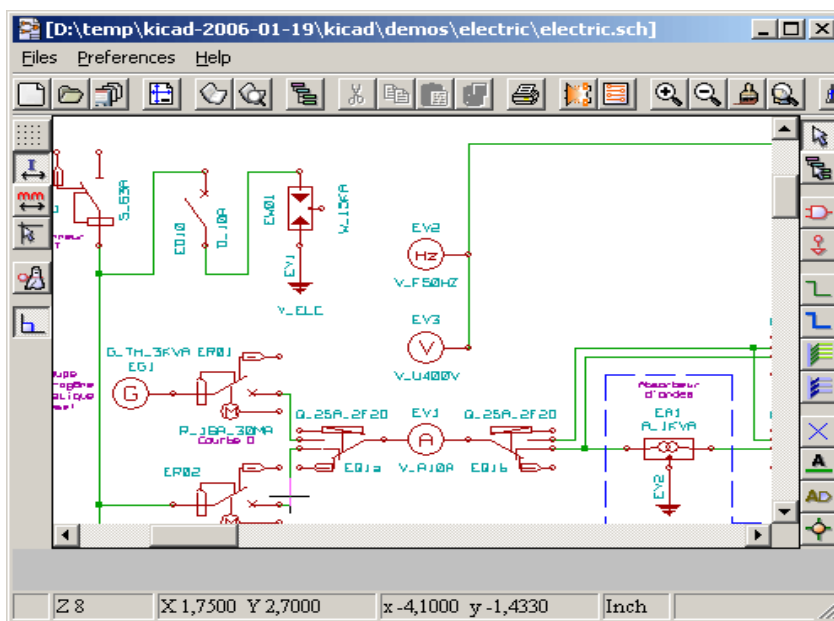
- bir nechta kriteriyalar orqali kabel va simlarni sinab ko'rish;
- manbani yerga ulashni hisoblash.

KiCad dasturi. KiCad tarkibiga kiruvchi dasturlar:

- Kicad – loyixalar boshqaruvchisi;
- eeschema – elektr sxema tahrirlovchisi;
- pcbnew – asosiy platar tahrirlovchisi
- Kutubxonadagi elementlarni plataga joylashtirish uchun dastur

ELCUT dasturi. Elcut (www.elcut.ru) xalharo nomlanishi Quickfield (www.quickfield.com).

ELCUT — muhandislar uchun ikki o'lchovli modellarni tahlil qilish uchun mo'ljallangan kompyuter programmasi. Kompyuter dasturlashtirish va sonli tahlil ishlab chiqarishda qimmat harajatlarni tejash bilan birga, uzoq davom etadigan tajribalar qisman yo'qotish, ishlab chiqarish jarayonini loyixalash va muhandislik ishlarini rivojlantirish uchun xizmat qiladi.



6.3-rasm. KiCad dasturi sxemalarni yig'ish oynasi.

ELCUT quyidagi vazifalarni bajaruvchi modullardan tashkil topgan:

- Magnitostatika

- Sinusoidal magnit maydon
- Statsionar bo'lmagan magnit maydon.
- Elektrostatika
- O'zgarmas toklarning elektr maydoni
- O'zgaruvchan toklarning elektr maydoni
- Issiqlik uzatish
- Egilish deformatsiyasi

Faqat ikki o'lchamli ko'rinish hosil qila oladi. Induksion qizitishda sinusoidal magnit maydon, issiqlik uzatish va egilish deformatsiyasi orqali hisoblashlar bajariladi.

ELCUT dasturi OOO «Tor» kompaniyasining yagona dasturi hisoblanib 20 yildan ko'proq vaqtdan buyon rivojlanish bilan birga, foydalanuvchilar tomonidan keng foydalanib kelinmoqda.

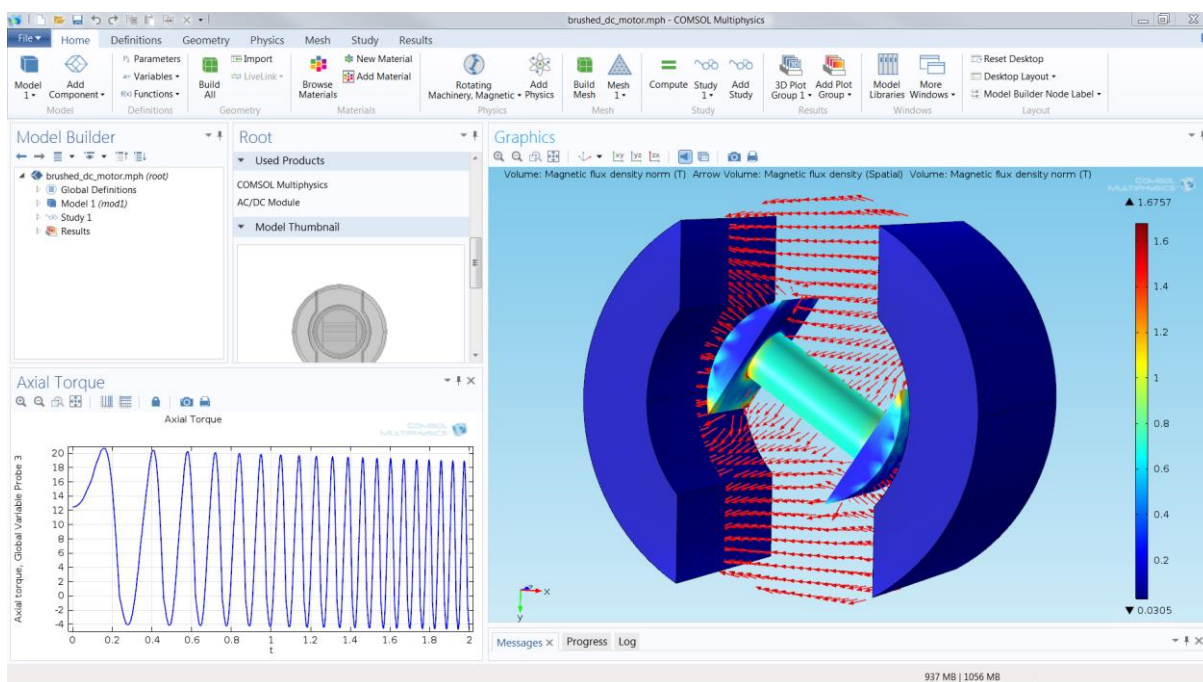
Dasturda ko'p afzalliklar bilan bir qatorda, bir qator kamchiliklarga ega. Eng asosiy kamchiligi esa ushbu dastur orqali loyixalanayotgan modelning faqatgina ikki o'lchovli ko'rinishini ko'rish mumkin, uch o'lchovli ko'rinish taqdim etadigan dasturlni yaratish bo'yicha ishlar olib borilmoqda.

Ansys multiphysics dasturi(www.ansys.com). Tarkibida turli xil hisoblash dasturlari bo'lgan qiyinlik darajasi yuqori vazifalarni ham bajara olish qobiliyatiga ega bo'lgan dastur. Elektromagnit va issiqlik hodisalarini ikki o'lchamli va uch o'lchamli ko'rinishlarda hisoblovchi dastur. Ansys multiphysics dasturi, nomi bilan aytganda ham kichik fizik hodisalarni tahlil qiluvchi dasturiy ta'minot hisoblanib sanoatda barcha qurilmalarni mustahkamlikka tekshirish yoki elektromagnit maydonda sinab ko'rish, issiqlik ta'siri kuzatish va qurilmalarni boshqa ishlab chiqarish jarayonini tahlil qiladi.

Maxwell – dasturi (www.ansys.com) elektromagnit maydonda hosil bo'ladigan hodisalarni hisoblash uchun chuqurlashtirilgan dastur. Loyixalanayotgan elektr mashinalarni ikki o'lchovli yoki uch o'lchovli ko'rinishini tuzish mumkin. Dastur issiqlik hodisalar bilan ishlash uchun mo'ljallanmagan,

faqatgina dasturlning oxirgi versiyasida ANSYS dastur kompleksi bilan bog'langan. Shuning uchun oxirgi versiyalarida ANSYS va Maxwell dasturlari bilan bog'lab, elektr mashinalaridagi issiqlik hodisalarini ham hisoblash mumkin. Hisoblash jarayoni ancha aniqligi bilan ajralib turadi [20].

Cedrat flux 2D/3D (www.cedrat.com). Fransuz dasturiy ta'minoti hisoblanadi. Elektromagnit va issiqlik jarayonlarni ikki o'lchovli va uch o'lchovli ko'rinishlarda hisoblashlarni amalga oshiradi. Lekin ba'zi bir hisoblashlarni faqatgina ikki o'lchovli ko'rinishda bajarishga to'g'ri keladi. Masalan induksion issiqlik hodisasini. Lekin dastur o'zining sal eskirgan va chalkash interfeysi bilan foydalanuvchilar tomonidan kamroq ishlatiladi.



6.4-rasm. Comsol multiphysics dasturida loyihalangan elektr mashinalar

Comsol multiphysics (www.comsol.com). Comsol multiphysics - sanoatda ishlatiladigan qurilmalarni modellashtirish uchun, imkoniyatlari ancha keng dastur hisoblanadi. Ushbu dastur yordamida nafaqat elektromagnit, mexanik, gidrodinamik va boshqa hodisalarni modellashtirishda keng qo'llaniladi. Dastur juda keng

xil ko'rinishdagi chulg'amlarni induktiv va aktiv qarshiligini hisoblash uchun imkoniyatlarga egaligi uchun, ushbu dasturdan foydalanish uchun foydalanuvchidan anchayin kuchli kompyuter bilan ta'minlanishni talab qiladi.

Coil2D Pro – har mo'ljallangan dastur. Dasturda qizish jarayoni yuzaga kelganda chulga'mning qizigan qismlarini ranglar bilan ifodalash xususiyatiga ega. Ko'rib chiqilgan dasturlar imkoniyatlari tahlili shuni ko'rsatadiki elektr mashinalardagi elektr mexanik va elektromagnit jarayonlarni tahlil qilishda eng qulay dastur bu **Ansys Maxwell dasturi paketi** ekanini ko'rish mumkin. Shuning uchun ushbu dasturiy paketni batafsil ko'rid chiqamiz.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. Crocodile Technology dasturi qanday imkoniyatlarga ega?
2. AutoCAD Electrical dasturi qanday imkoniyatlarga ega?
3. KiCad va ELCUT dasturlari qanday imkoniyatlarga ega?
4. Comsol multiphysics dasturi qanday imkoniyatlarga ega?

6.4. ANSYS Electromagnetics suite dasturiy paketining imkoniyatlari tahlili

Kalit so'zlar: *ANSYS kompleks dasturi, Ansys Electromagnetics Suite, ANSYS Maxwell, ANSYS Simplorer, ANSYS RMxprt, ANSYS PExprt, ANSYS Alinks for MCAD, ANSOFT Maxwell, ANSYS Maxwell, RMxprrt*

Hozirda ishlab chiqarish jarayonida va ushbu jarayon uchun malakali kadrlar tayyorlashda qo'llanilayotgan kompyuter dasturlaridan juda keng foydalanilyapti, ulardan biri ANSYS kompleks dasturidir. Bu dastur sanoat korxonlarini avtomatlashtirilgan loyixalash va ularda ro'y beradigan juda ko'p jarayonlarni tahlil qilish uchun mo'ljallangan dastur bo'lib, tarkibida ko'plab dasturlarni jamlagan [14].

ANSYS kompleks dasturiga 1970 – yilda asos solingan, hozirda bu kompaniya tarkibida ko'plab Ph.D. ilmiy darajaga ega bo'lgan 3000 dan ortiq mutaxassis faoliyat yuritib kelmoqda. ANSYS nufuzi bo'yicha muhandislik modellashtirishda jahonda yetakchilardan hisoblanadi. Bu dastur dunyodagi eng

innovatsion kompaniyalarga o'z mijozlarini eng yaxshi mahsulotlar bilan ta'minlashi uchun yordam beradi. Dasturiy ta'minot muhandislik hisoblarda eng yaxshi va eng keng portfel bo'lib faqat xayol kuchi bilan cheklangan loyihalar va muhandislik loyihalashning eng qiyin masalalarini hal qilishda yordam beradi.

ANSYS – muhandislikda ishlatiladigan avtomatlashtirilgan hisoblashlar uchun universal dastur hisoblanib, turli xil tizimlarni hisoblashda ishlatiladigan dasturiy ta'minotlardan tashkil topgan:

- gidrodinamik hisoblashlar tahlili;
- mexanik deformatsiyalanuvchi qattiq jismlar tahlili;
- elektromagnetizm;
- issiqlik tahlili;
- ko'p tarmoqli tahlil.

Ushbu dasturlar orqali sanoatdagi texnologik jarayonlarni modellashtirish va jarayonlarni tahlil qilish imkonini beradi. ANSYS dasturiy kompleksi o'z ichiga elektromagnit hodisalarni o'rganuvchi kompleks dastur (Ansys Electromagnetics Suite, ANSYS Maxwell, ANSYS Simplorer, ANSYS RMxrt, ANSYS PExprt, ANSYS Alinks for MCAD), mexanik jarayonlarni o'rganuvchi dastur (Ansys mechanical, ANSYS Fatigue Module, ANSYS Composite PrepPost), Suyuqlik va gazlar dinamikasi o'rganuvchi dasturlar(ANSYS FLUENT, ANSYS CFX, ANSYS Forte, ANSYS Chemkin-pro), ko'p tarmoqli tahlillarni olish uchun (ANSYS Multiphysics) va boshqa 50 ga yaqin dasturlardan tashkil topgan.

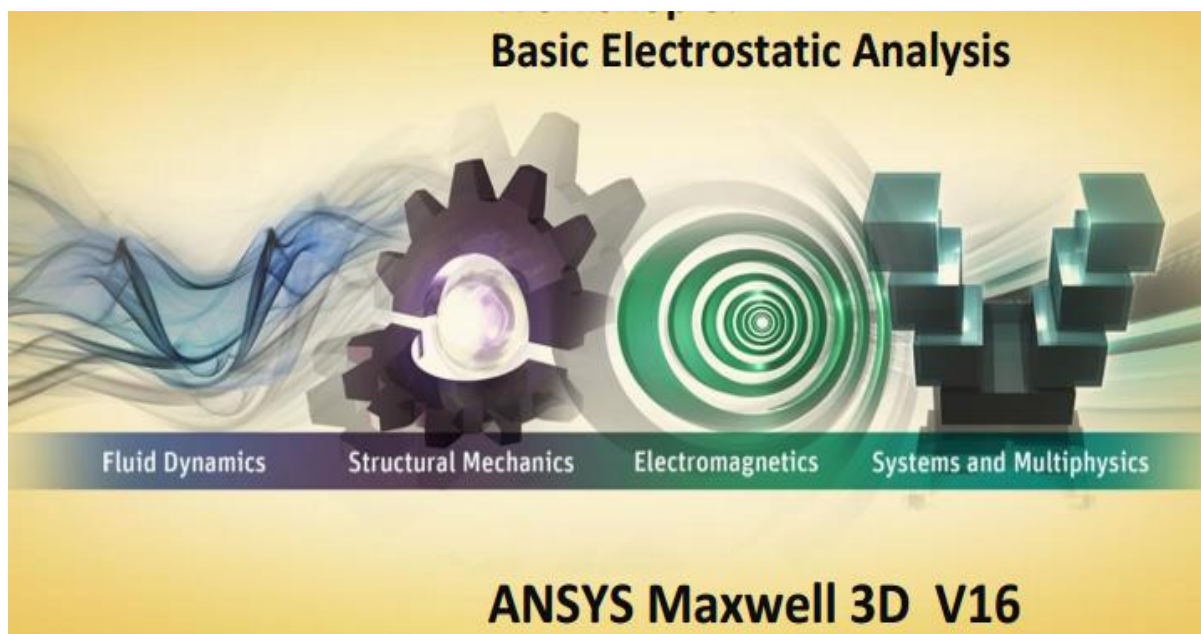
Elektromexanik tizimlarni loyixalashda ANSYS Electromagnetics Suite dasturiy kompleksidan foydalanish juda ko'p qulayliklarga ega. Ushbu kompleks dastur o'z ichiga ANSYS Electronics (Elektronika qurilmalaridagi jarayonlarni o'rganish), ANSYS HFSS (Ikki yarim qutbli elektromagnit maydonda yuqori chastota va tezlikdagi qurilmalarni yuqori aniqlikda, tezda 3D ko'rinishda loyixalash), ANSYS Icepak (Elektrotexnika qurilmalarining sovutilish jarayonlarini o'rganish), ANSYS Maxwell (Elektr mashinalardagi jarayonlarni tahlil qilish), ANSYS SIwave EMI electron majmualar tuzilmasni va bosma

elektron platalarni chiqish signallari to'laqlonligini va tahlilini amalga oshiradigan umumiy platforma hisoblanadi. ANSYS Q3D Extractor elektron qurilmalarni loyixalovchi muhandislar uchun 2D va 3D muhitda elektron qurilmalar ta'minotidagi xalaqit beruvchi(parazit) signallarni vujudga kelishini tatqiq qilish imkonini beradi. ANSYS Simplorer tizimlarni virtual prototiplarini modellashtirish, imitatsiyalash va tahlil qilish uchun keng imkoniyatlarga ega bo'lgan dastur xisoblanadi. Bu loyixalash guruhiga mahsulotni tuzilmasini yaratishda uning konstruktiv parametrlarini bir necha mezonlar asosida optimallashtirish va unumdorligini oldindan tahlil qilish imkonini beradi.

Innovatsion loyihalarni sanoatda qo'llash elektr mashinalarni yuqori ko'rsatkichlar bilan ishlashini, ular konstruksiyasini optimal variantini yaratishda ro'y beradigan turli jarayonlarni kuzatishda ANSYS Electromagnetics Suite dasturi tarkibiga kiruvchi Maxwell dasturidan foydalanish juda ko'p qulayliklarga ega.

ANSOFT Maxwell / ANSYS Maxwell (ANSYS Electromagnetics) dasturi – sanoatda ishlab chiqarish jarayonida qo'llanilayotgan har xil turdagi dvigatel, datchiklarni, transformatorlarni va boshqa elektr va elektromexanik qurilmalarni, elektromagnit maydonni modellashtirish asosida ikki o'lchovli va uch o'lchovli modellarni loyihalash va qurilmalarni xususiyatlarini o'rganish uchun qo'llaniladigan dasturiy ta'minot. Maxwell - (Finite Element Method - FEM) hisoblash metodi asosida ishlaydi va elektromagnit va elektr maydon statik, garmonik hisoblash bilan birga magnit maydondagi o'tkinchi jarayonlarni aniq hisoblash xususiyatiga ega.

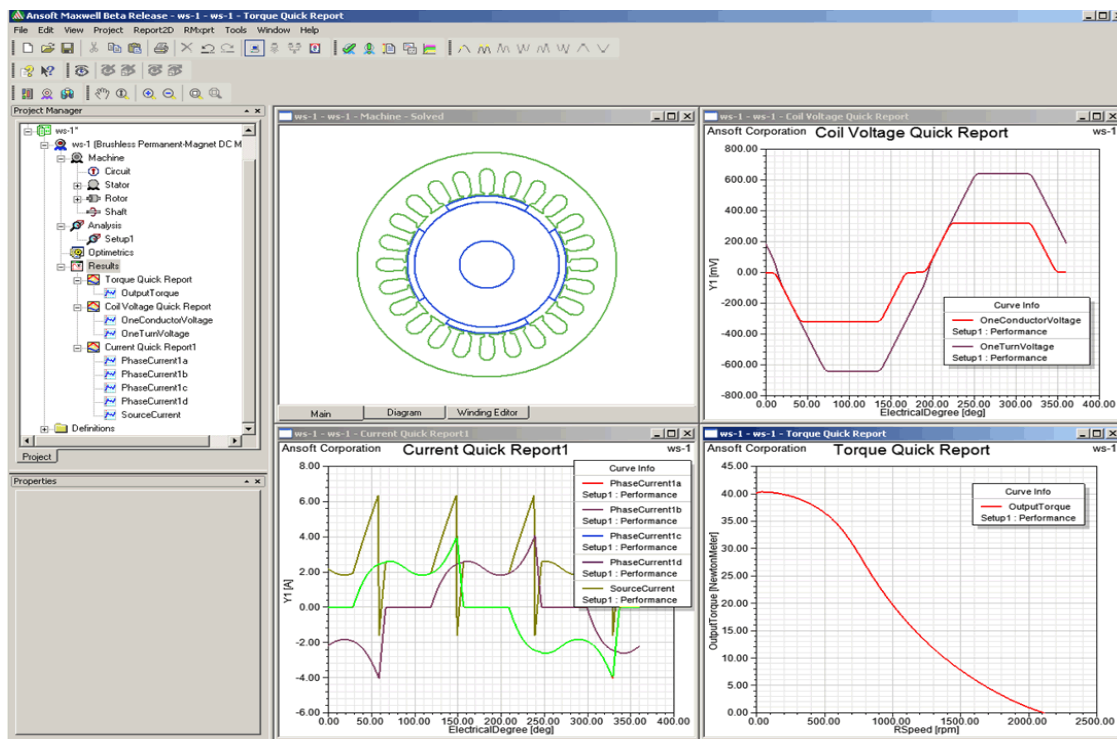
Maxwell dasturi orqali elektr mashinalar ya'ni motorlar generatorlar transformatorlar mashinalar detallarida elektr maydon hosil qilish usuli bilan tahlil qilinishi va qurilmalar konstruksiyasining o'lchamlari bir necha qiymatlari o'zgartirilib ular orasidan sanoatda qo'llash uchun maqbul variantlari tanlab olinishi mumkin.



6.5-rasm. ANSYS Maxwell kompleks dasturi tarkibidagi dasturlar.

Maxwell dasturining versiyalari. ANSOFT Maxwell / ANSYS Maxwell dasturiy ta'minotining 11 versiyasigacha bo'lgan versiya qiyin va ancha eski ko'rinishda edi. **ANSYS Maxwell** dasturi **ANSYS Electromagnetics** dasturiy kompleksi tarkibiga kiradi. Maxwell foydalanuvchilari uchun dastur go'yasiga yaqin bo'lgan dasturlardan foydalanish dastur imkoniyatlarni oshiradi. Bunday dasturlarga quyidagilar kiradi: Maxwell (ePhysics, Simplorer) va modellashtirish jarayonini soddalashtirish uchun foydalaniladigan Maxwell (RMxpirt, PExpirt, Optimetrics, Maxwell Circuit Editor, Q3D Extractor) dasturlari kiradi.

RMxpirt -Elektr mashinalarni modellashtirish uchun dasturiy ta'minot. Bu dastur Maxwell 2D va Maxwell 3D dasturi kabi Maxwell dasturi tarkibiga kiruvchi dastur hisoblanadi. RMxpirt – aylanma harakat hosil qiluvchi elektr mashinalarni loyihalash jarayonini tezlashtirish va optimallashtirish uchun qo'llaniladigan dasturiy ta'minot. Ushbu dasturiy ta'minot foydalanuvchidan faqat birlamchi ma'lumotlarni kiritishni talab qiladi xolos, ya'ni: geometrik parametrlari va stator va rotor materiallarining xususiyatlari, chulg'am turi va ulanish guruhi, ta'minot, ist`emolchi, sovitish usuli haqida malumotlar. Dasturdagi standart algoritmlar va tayyor formulalar yordamida zamonaviy kompyuterlarda birta modelni hisoblash uchun milisekundlar yetarli xolos.



6.6-rasm. RMxprt dasturiy ta'minotining asosiy oynasi.

RMxprt quyidagi tipdagi motorlarni modellashtirishni taklif qiladi:

- Three-phase induction motors (Uch fazali asinxron motor);
- Single-phase induction motors (bir fazali asinxron motor);
- Three-phase synchronous motors and generators (Uch fazali sixron motor yoki generator);
- Brushless permanent-magnet DC motors (Shotkasiz doimiy magnitlardan tuzilgan o'zgaras tok motori);
- Adjust-speed synchronous motors and generators (Chastotasi boshqariluvchi sinxron motor yoki generatorlar);
- Permanent-magnet DC motors (doimiy magnitli o'zgaras tok motori);
- Switched reluctance motors (Ventil-intuktorli motor);
- Line-start permanent-magnet synchronous motors (Uyg'otish tavsiflari yaxshilangan sinxron motor);
- Universal motors (Universal motorlar);
- General DC motors and generators (O'zgaras tok motori yoki generatori);

- Claw-pole alternators (taqasimon qutbli o'zgaras tok generatori);
- Non-salient synchronous motors and generators (Noayon qutbli motor va generatorlar).

NAZORAT SAVOLLARI:

1. ANSYS kompleks paketi qaysi dasturlardan iborat?
2. Ansys Electromagnetics Suite dasturi qanday imkoniyatlarga ega?
3. ANSYS Maxwell paketi qaysi dasturlardan iborat?

6.5. Elektr mashinalarni ANSYS Maxwell dasturida loyihalash asoslari

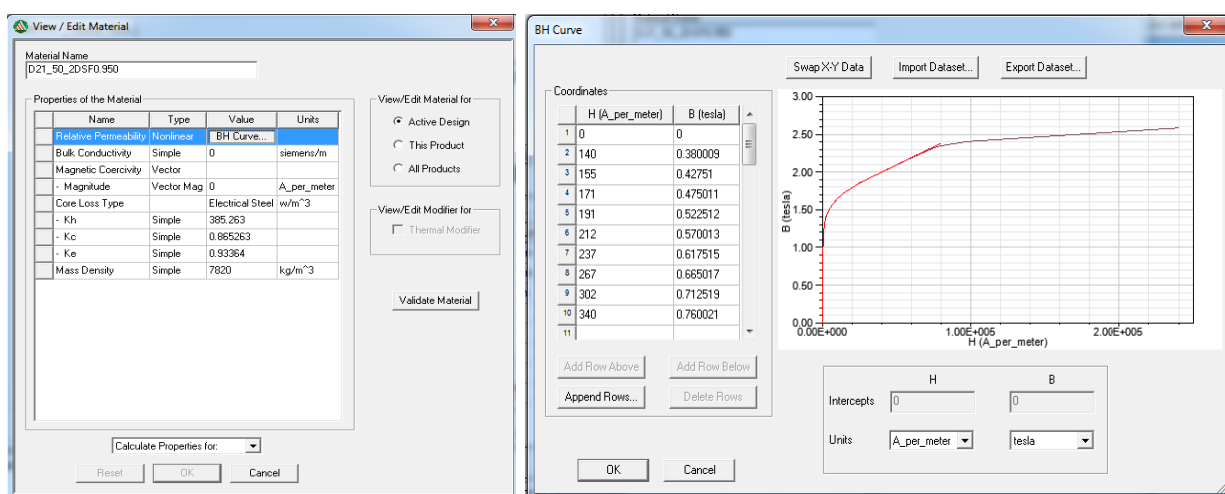
Kalit so'zlar: *CAD dasturi, CAM dasturi, CAE dasturi, elektromexanik tavsif, mexanik tavsif, uch o'lchovli grafika, Mashina detallari, vizuallashtirish, loyixalash.*

Elektr mashinalarni tadqiq qilishda qo'llanilayotgan kompyuter dasturlarining aksariyati mashinalarning elektr (tok, kuchlanish, quvvat va sh.o'.) va mexanik (tezlik, moment) kattaliklarini o'rganishga ixtisoslashgan bo'lib magnit va elektromagnit jarayonlarni o'rganishda qiyinchiliklar kuzatiladi. Bu aynan elektr mashnalarda qo'llanilayotgan elektrotexnika materiallardan xossalarini e'tiborga olgan holda elektromexanik o'zgartirishlarni tadqiq qilish imkoniyatini beruvchi EHM dasturlariga ehtiyojni keltirib chiqaradi. Zamonaviy tadqiqot uslublarida o'zida mujassamlantirgan Maxwell ANSYS dasturi aynan shu muammolar yechimini aniqlashga yo'naltirilgan. Bu dastur ayniqsa elektr mashinalarni loyihalash jarayonida muvafaqiyatli foydalanib kelinmoqda. Zamonaviy tadqiqotchilar ushbu dastur imkoniyatlaridan foydalanish malakasiga ega bo'lishlari lozim bo'ladi. Quyidagi misolda asinxron mashinalarni ushbu dasturda loyihalash samaradorligini belgilovchi omillarga to'xtalib o'tamiz.

Asinxron motorni loyihalash tartibini ko'rib chiqamiz. Buning uchun Maxwell dasturi tarkibidagi ANSYS RMxpert dasturidan foydalaniladi, dastlab dastur taklif

qilayotdan elektr motorlar yoki generatorlar orasida o'zimiz hisoblamoqchi bo'lgan motor Three-Phase Induction motor tanlandi (6.7-rasm).

Dasturning chap qismidagi menyudan “machine” tugmasini bosish orqali mashinalarning stator va rotor qismlari parametrlari o'zgartirish uchun kengaytirilgan menyuga o'tiladi. Ushbu menyuda birinchi bo'lib mashinalarning asosiy marametrlari kiritiladi ya'ni qutblar soni=4, quvvati 7500 vatt, tezligi=1495 ayl/min, nominal kuchlanishi 380 V, so'ngra “machine” bo'limining ichki qismidagi stator o'lchamlari kiritiladi ya'ni stator tashqi diametri=235 mm, stator ichki diametri=145 mm va boshqa qo'shimcha ko'rsatkichlari kiritiladi.



6.7-rasm. D21_50_2DSF0.950 tipidagi metallning xususiyatlari

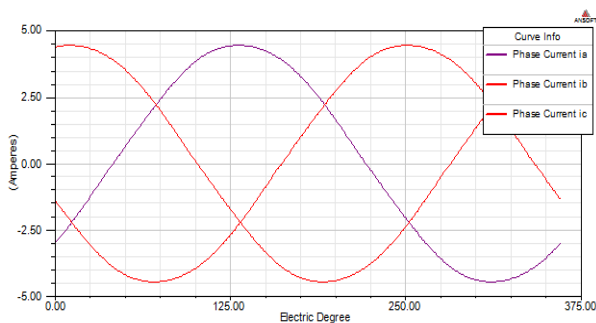
6.7-rasmda hisoblash ishida foydalanilgan materilallarning ba'zilarining xususiyatlari ko'rsatilgan. Qurilmaning bunday xususiyatlarga ega bo'lishi, elektr mashinalar real sharoitdagi ko'rsatgichlariga ega bo'lishi uchun katta hissa qo'shadi.

Barcha qiymatlar kiritilgandan so'ng asinxron mashinalarni tahlil qilish maqsadida uning tahlil parametrlari sozlanadi. Bunda masalan, mashinalar turi motor, chiqish quvvati 7500 watt, chiqish kuchlanishi 380 volt, aylanish tezligi 1495 ayl/min, tashqi temperature esa 75 C° qilib belgilanadi.

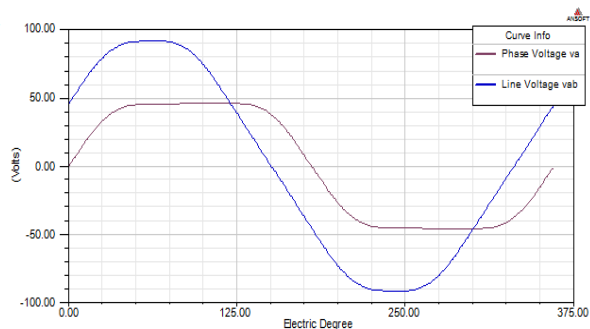
Asinxron mashinalar tahlil qilingandan so'ng, dastur yuqori qismida paneldan diagrammalar ko'rinishidagi buyruq tanlanadi. Bu buyruq orqali biz

tahlil qilingan mashinalarning ko'pgina harakteristikalarini diagrammalar ko'rinishida ko'rishimiz mumkin bo'ladi.

Hisoblash ishida yuqoridagi qiymatlar asosida dastur tarkibidagi hisoblashlar orqali elektr mashinalar tahlil qilinadi. Quyidagi rasmlarda tahlil qilingan elektr mashinalarning berilgan ko'rsatkichlar asosida hisoblangan qiymatlar diagramma ko'rinishida berilgan.

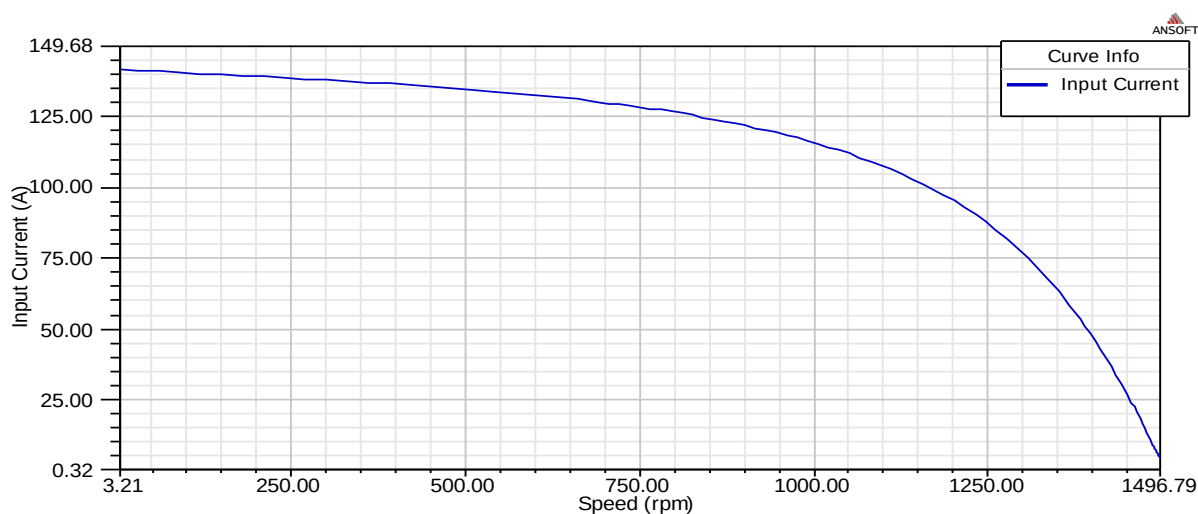


6.8-rasm. Uch fazali tok



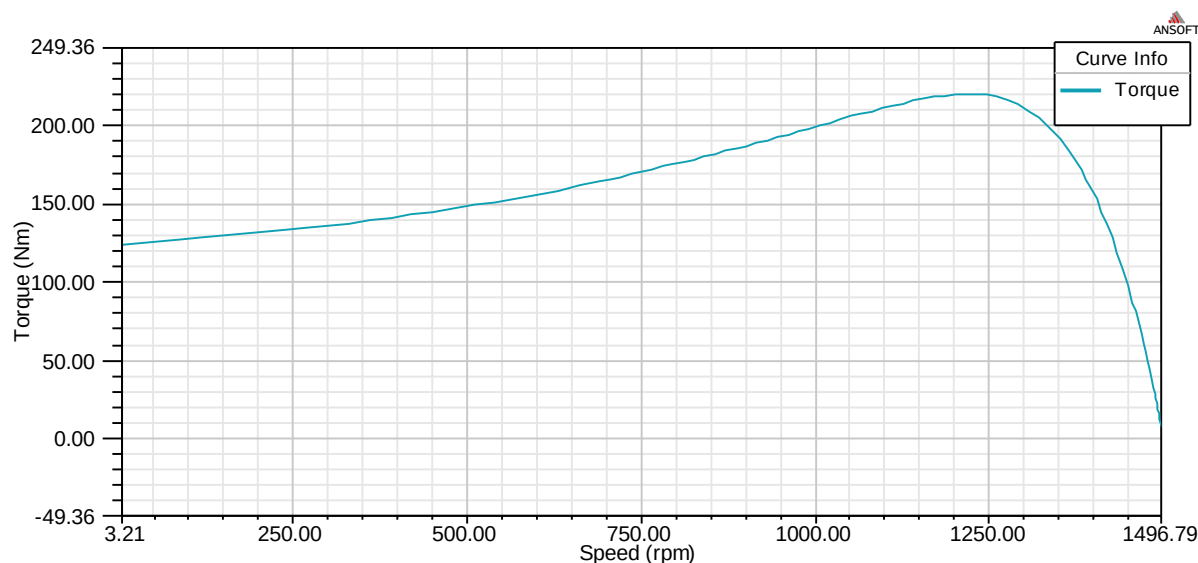
6.9-rasm. Faza va liniya kuchlanishi

Texnologik jarayonlarda elektrotexnik tizimlarni va ular asosida qilinayotgan innovatsiyalarni sanoatda qo'llashda CAD/CAM/CAE dasturlarida foydalanish tizim loyixalash jarayoni harajatlarini, vaqtini va boshqa bir qator omillarni tejashda katta ahamiyatga ega. Chunki hozirda qurilmaning optimal ko'rsatkichlarga ega bo'lishi uchun ko'pgina loyihalash jarayonlarida tajibalarni ko'p marotaba takrorlash zarur bo'ladi va bu o'z novbatida tajribalar o'tkazish uchun talab qilinadigan katta harajatlarni va ishchi kuchini talab qiladi.



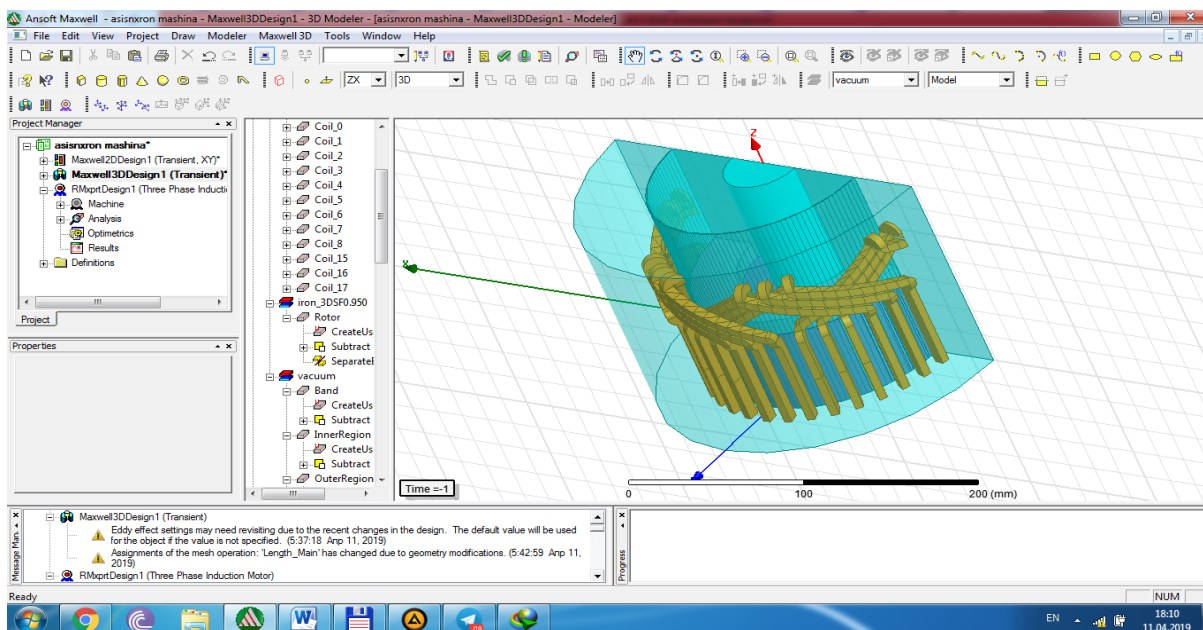
6.10-rasm. Motor stator toki va motor tezligiga bog'liqligi grafigi

Quyidagi rasmlarda elektromexanik tavsif (stator toki va motor tezligiga bog'liqligi) 6.10–rasmda, mexanik tavsif (motor tezligi va momenti bog'liqligi) 6.11–rasmda ko'rsatilgan.



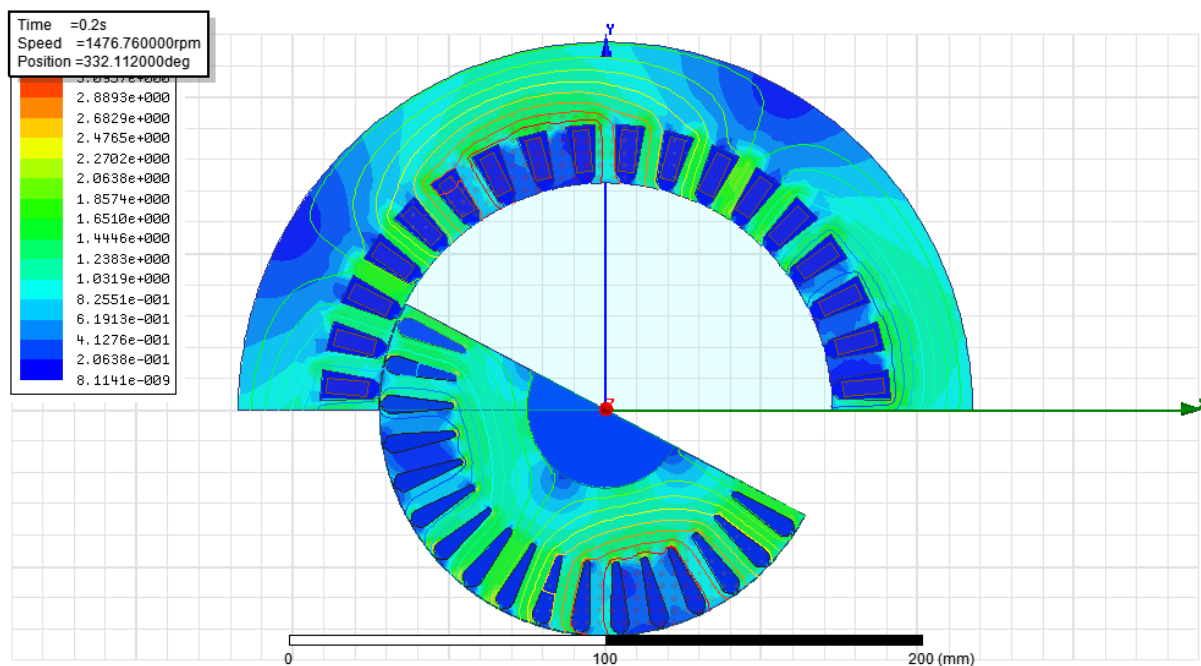
6.11–rasm. Motor momentini motor tezligiga bog'liqligi grafigi

6.12-rasmda asinxron mashinalarni uch o'lchovli grafikada loyihalash natijalari ko'rsatilgan. Bu natijalarni elektr mashinalarni tuzilishini o'rganish jarayonida qo'llash ham yuqori samara beradi. Mashinalar detallari yorqin ranglarda ajratilib va qirqim bergan holda ko'rsatiladi.



6.12-rasm. Loyihalangan asinxron motor statorining uch o'lchamli tasviri

Maxwell ANSYS dasturining asosiy afzalligi elektr mashinalardagi elektromagnit jarayonlarni vizuallashtirish (ko'rish) imkoniyatidir. 6.13–rasmda asinxron motorda vujudga keladigan magnit maydonning vizuallashtirilgan holati keltirilgan. Magnit maydon kuchsiz bo'lgan qismlar och rangda, kuchli bo'lgan qismlar esa to'q ranglarda berilgan.



6.13-rasm. Loyihalangan elektr mashinalarda magnit maydonni ko'rinishi.

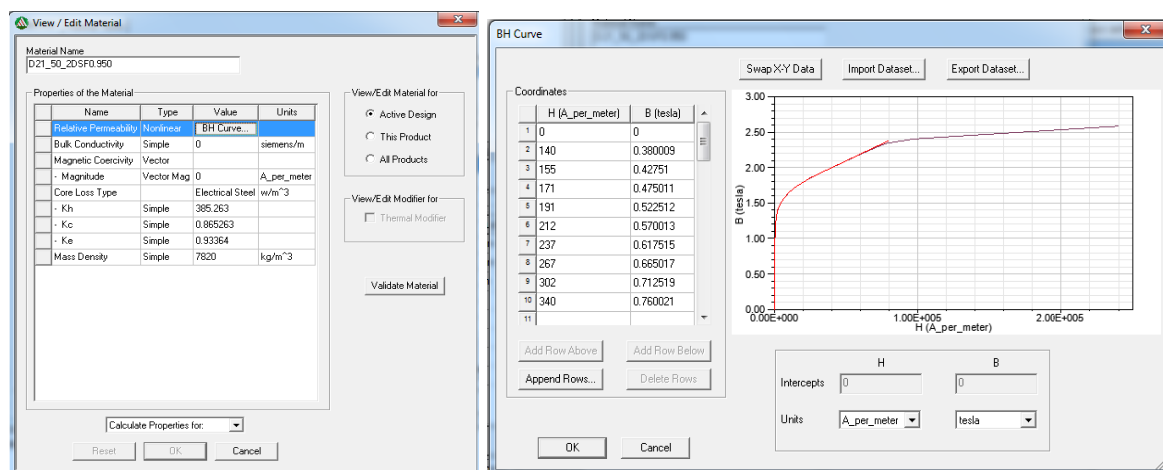
Sinxron generatorning ansys maxwell dasturida loyihalash. Sinxron mashinalarning statori tuzilishi jihatidan asinxron mashinalarning statoridan farq qilmaydi. Stator mashinalarning korpusi, statorning po'lat o'zagi va po'lat o'zak pazlariga joylashtirilgan birta yoki uchta chulg'amdan tuzilgan. Sinxron mashinalar bir fazali va uch fazali bo'lishi mumkin. Mashinalarning rotoriga magnit qutblari o'rnatiladi. Qutblarning po'lat o'zagida o'zgarmas tok manbaidan ta'minlanadigan chulg'am bor. Bu chulg'am sinxron mashinalarning qo'zg'atish chulg'ami deyiladi. Rotor qutblaridagi bu chulg'amga o'zgarmas tok halqa va cho'tka orqali o'zgarmas tok manbaidan beriladi.

Loyixalash jarayonida elektr mashinalarning barcha qismlari o'lchami kiritiladi (stator tashqi va ichki diametri qutblar soni pazlar soni va o'lchamlari chulg'am diametri va ulanish guruhi kiritiladi). Maxwell dasturi tarkibidagi

ANSYS RMxprt dasturi 19 turdagi elektr motorlarni loyixalash uchun maxsus dastur hisoblanib dastur motorlar loyixalashda ishlatiladigan ko'rsatkichlar kiritilishi qulayligi bilan ajralib turadi. Mashinalar qaysi materialdan tayyorlanganligi ko'rsatish uchun dasturdagi kutubxonasidagi materiallardan foydalanish ancha qulayliklar yaratadi, chunki bu yerda materiallar xususiyatlari, ya'ni magnit o'tkazuvchanligi, qarshiligi, zichligi va boshqa bir qator xususiyatlari kiritilgan.

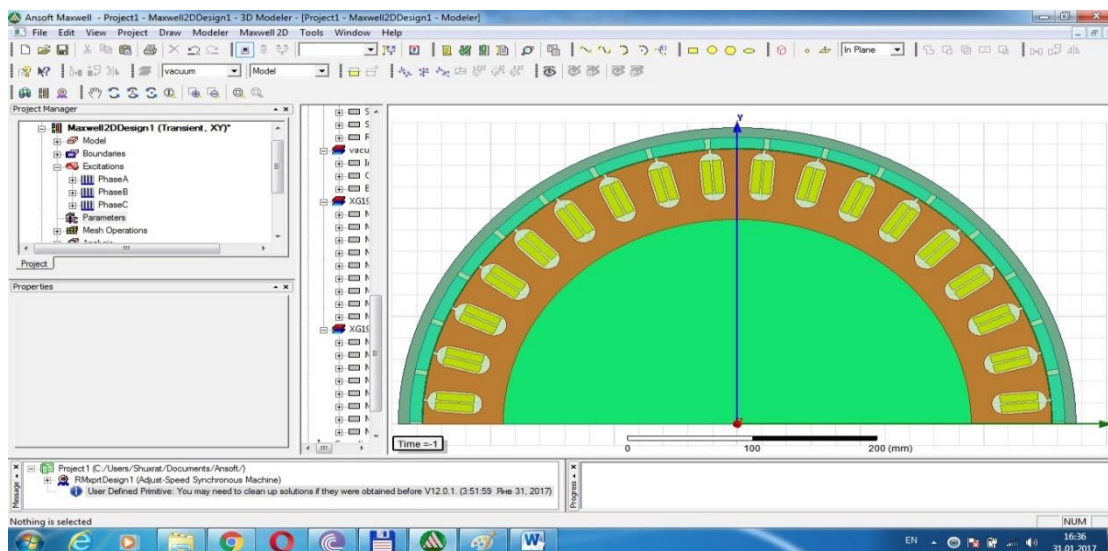
Dastlab Maxwell dasturi tarkibidagi ANSYS RMxprt dasturidan foydalaniladi va dastur taklif qilayotgan elektr mashinalar yoki generatorlar orasida o'zimiz hisoblamoqchi bo'lgan generator ya'ni birinchi ustunda ko'rsatilgan sinxron generator tanlanadi.

Dasturning chap qismidagi menyudan "machine" tugmasini bosish orqali mashinalarning stator va rotor qismlari parametrlari o'zgartirish uchun kengaytirilgan menyuga o'tiladi. Ushbu menyuda birinchi bo'lib mashinalarning asosiy marametrlari kiritiladi ya'ni qutblar soni=36, rotor joylashuvi-tashqi, rotor tezligi $n_2=250$ ayl/min, boshqaruv usuli-AC(o'zgaruvchan tok), so'nga machine bo'limining ichki qismidagi stator o'lchamlari kiritildi ya'ni stator tashqi diametri $D_1=510$ mm, stator ichki diametri $D_2=380$ mm va boshqa qo'shimcha ko'rsatkichlari kiritiladi, stator o'lchamlari kiritilgandan keyin rotor ko'rsatkichlari ham kiritilib unga qalinligi 10 mm bo'lgan XG-196/96 tipli magnit ichki qismi 0.9 qismini hamrab olgan holatida o'rnatiladi.



6.15-rasm. D21_50_2DSF0.950 tipidagi metallning xususiyatlari

6.15-rasmda hisoblash ishida foydalanilgan materilallarning ba'zilarining xususiyatlari ko'rsatilgan. Qurilmaning bunday xususiyatlarga ega bo'lishi, elektr mashinalar real sharoitdagi ko'rsatgichlariga ega bo'lishi uchun katta hissa qo'shadi.

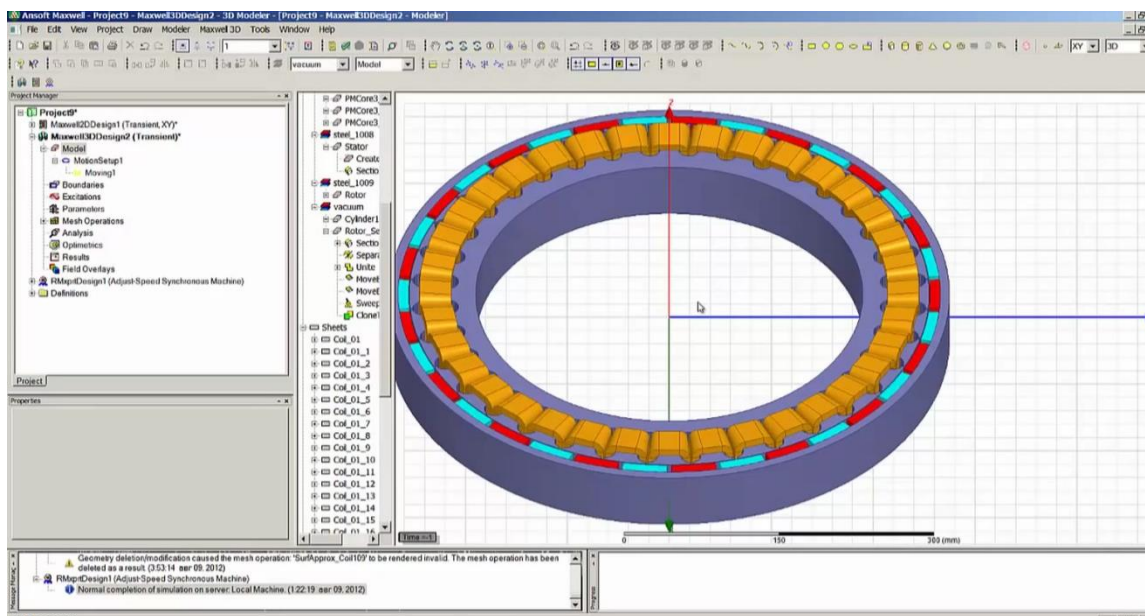


6.17-rasm. Loyixalanayotgan sinxron generatorning 2D ko'rinishdagi tasviri.

Barcha qiymatlar kiritilgandan so'ng sinxron mashinalarni tahlil qilish maqsadida uning tahlil parametrlari asoslanadi. Bunda mashinalar turi generator, chiqish quvvati 3000 watt, chiqish kuchlanishi 220 volt, aylanish tezligi 250 ayl/min, tashqi temperatura esa, 25 C° qilib belgilangan.

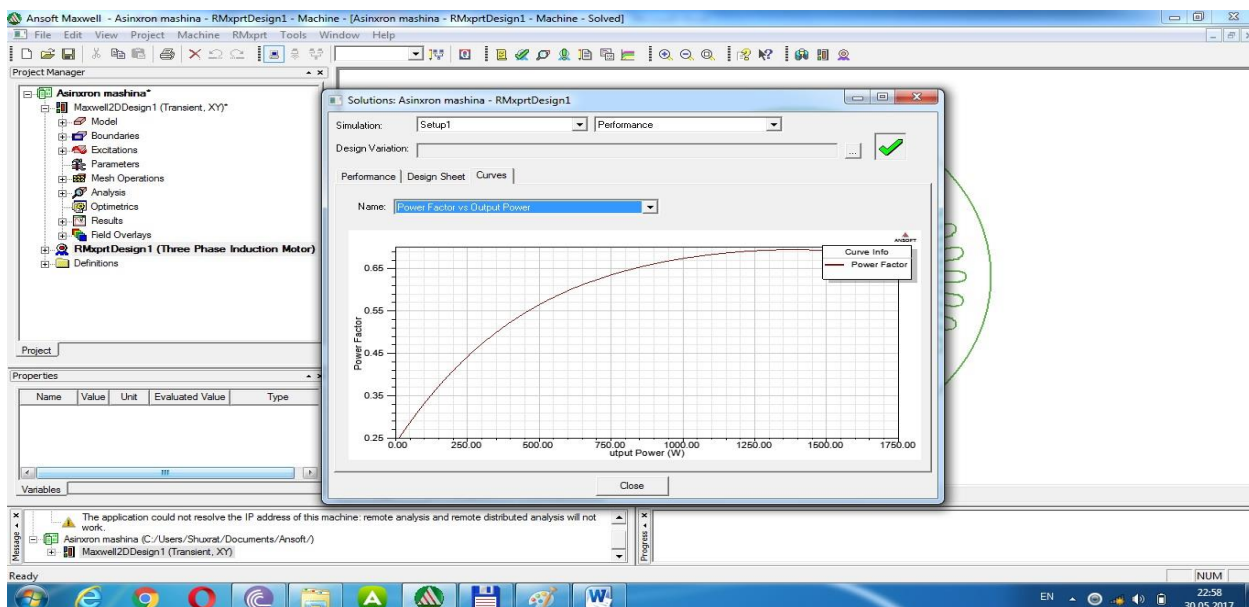
Maxwell dasturining boshqa bir loyixalash dasturlaridan yana eng katta afzalliklaridan biri, loyixalanayotgan obyektning uch o'lchovli ko'rinishi orqali loyixalash imkoniyatidir. Bunday usul orqali loyixalovchi loyixalanayotgan obyektida yuz beradigan o'lchamlaridagi o'zgarishlarni yoki ularda kechayotgan jarayonlarni loyixalash vaqtining o'zidayoq kuzatish mumkin.

Sinxron mashinalar tahlil qilingandan so'ng, dastur yuqori qismida paneldan diagrammalar ko'rinishidagi buyruq tanlash mumkin. Bu buyruq orqali biz tahlil qilingan mashinalarning ko'pgina harakteristikalarini diagrammalar ko'rinishida ko'rish mumkin bo'ladi.



6.18-rasm. Loyixalanayotgan sinxron generatorning 3D ko‘rinishdagi tasviri.

Maxwell dasturida sinxron generatorning ba’zi o‘lchamlari kiritish orqali boshqa qiymatlari hisoblab chiqish mumkin. Virtual loyixalangan sinxron generatordagi jarayonlar, qiymatlar tahlil qilinib va tahlil so‘ngida olingan natijalar 6.19–rasmda ko‘rsatilgan. Rasmda, modellash natijasida olingan quvvat koefitsientini ist`emol quvvatiga bog‘liqlik grafigi ko‘rsatilgan.



6.19-rasm. Quvvat koefitsientini ist`emol quvvatiga bog‘liqlik grafigi

Hisoblash ishida quyidagi qiymatlar asosida dastur tarkibidagi hisoblashlar orqali elektr mashinalar tahlil qilingan. Quyidagi rasmlarda tahlil qilingan elektr mashinalarning berilgan ko'rsatkichlar asosida hisoblangan qiymatlar diagramma ko'rinishida berilgan.

Xulosa qilib aytganda texnologik jarayonlarda elektrotexnik tizimlarni va ular asosida qilinayotgan innovatsiyalarni sanoatda qo'llashda CAD/CAM/CAE dasturlarida foydalanish tizim loyixalash jarayoni harajatlarni, vaqtini va boshqa bir qator omillarni tejashda katta ahamiyatga ega. Chunki hozirda qurilmaning optimal ko'rsatkichlarga ega bo'lishi uchun ko'pgina loyixalash jarayonlarida tajribalarni ko'p marotaba takrorlash zarur bo'ladi va bu o'z novbatida tajribalar o'tkazish uchun talab qilinadigan katta harajatlarni va ishchi kuchini talab qiladi.

NAZORAT SAVOLLARI:

1. CAD\CAM\CAE dasturlari nima uchun ishlatiladi?
2. Qaysi dasturlar uch o'lchovli grafikada ishlaydi?
3. Kompyuterda loyixalashni afzalliklari nima?

6.6. Elektr mashinalardagi dinamik jarayonlarni «matlab» dasturida tahlil qilish

Kalit so'zlar: CAD, CAM,CAE, elektromexanik tavsif, mexanik tavsif, uch o'lchovli grafika, Mashina detallari, vizuallashtirish, loyixalash, «matlab» dasturi, Simulink, imitatsiya va tahlil qilish, interaktiv vositalar, dinamik jarayonlar, Solver ilovasi, salt ishlash rejimi, ishga tushirish, Sinxron mashinalarni yurg'izish, Sinxron mashinalarning "tebranishi".

Elektr mashinalardagi dinamik jarayonlarni hisoblashda differensial va integral matematik ifodalardan keng foydalaniladi. Bu matematik ifodalarni an'anaviy algoritmik tillarda dasturlash ancha qiyinchilik tug'diradi. Bundan tashqari, bu tillar malakaviy mutaxassisni talab etadi. Masalan, integrallash va differensiallash amallari raqamli hisoblash usullariga keltirilishi lozim. Hozirgi paytda bunday masalalarni yechish uchun «matlab» dasturi qo'llanilmoqda. Bu dasturlni elektrotexnika masalalariga qo'llash juda qulay bo'lib, dasturlar

matematik ifodalar ko‘rinishida yozilib maxsus bilimni talab qilmaydi. Bunda aniq yoki noaniq integral, hosila, matritsalar ustida amallar, kompleks sonlar va irratsional sonlar ustida amallar daftar qog‘oziga qanday yozilsa shunday yoziladi. Bunda natija darhol olinadi. Matematik ifodalar jadval ko‘rinishida chiqadi va matematik ifoda turi aniqlanib dastur yozila boshlanadi.

MATLAB dasturlash tili sifatida 70-yillar sungida Nyu- Meksiko Universitetidagi kompyuter fanlari fakulteta (iigl. *computer science department at the University of New Mexico*) dekani Klivom Mouler (ingl. *SI eve Moler*) tomonidan ishlab chikilgan. Dasturlni yaratishdan maksad talabalarga Linpack va HISPACK dasturlarining bibliotekalaridan Fortranni o‘rganmasdan ham foydalalanish imkoniyatini berish bo‘lgan. Tez orada yangi dasturlash tili boshsa universitetlarda ham keng tarqaladi va amalny matematika soxasida ishlovchi olimlar tomonidan katta kizikish bilan kutib olinadi. MATLAB tizimidan xozirgi vaqtda Evropa, AKSH, YAponiya davlatlarida aksariyat mutaxassislar foydalanadi va u kupchilik operatsion tizimlarda, jumladan GNU/Linux, Mac OS, Solaris, Microsoft Windows va boshqalarda ishlaydi.

Elektr mashinalarini modellashtirish MATLAB tizimini Simulink dasturiy ta’minoti bilan amalga oshiriladi. MATLAB dasturlar paketining asosiy dasturlaridan biri Simulink paketi hisoblanadi. Simulink — dinamik tizimlarni modellashtirish, imitatsiya va tahlil qilish uchun interaktiv vositadir. U grafik blok-diagrammalarni qurish, dinamik tizimlarni imitatsiya qilish, tizimlarning ishlashini tekshirish va loyihalarni mukammallashtirish imkoniyatlarini beradi. Simulink MATLAB bilan to‘la integrallashgan.

Simulink ni ishga tushirish quyidagicha amalga oshiriladi. MATLAB dasturining asosiy oynasi ochilgandan keyin Simulink dasturini quyidagi usullar bilan ishga tushiriladi:

- Simulink tugmasini bosish;
- MATLABning bosh oynasidagi buyruq satrida Simulink so‘zini terib klaviaturadagi <Enter> klavishasini bosish;

- File menyusida Open... buyrug'ini bajarish va modelning faylini (mdl-fayl) ochish.

SIMULINK muhitida model yaratish uchun quyidagi ishlar bajariladi:

- File/New/Model, buyrug'i yoki asboblari panelidagi  tugma yordamida modelning yangi fayli yaratish. Modelning yangi yaratilgan oynasi 1-rasmda ko'rsatilgan;

- Model oynasida bloklarni joylashtiring. Buning uchun bibliotekaning kerakli bo'limi ochiladi (masalan, *Sources*— manbalar). So'ngra kerakli blokni kursor bilan ko'rsatiladi va sichqonchaning chap tugmasini bosib yaratilgan oynaga suriladi. Bloklarga ega bo'lgan model oynasi 2-rasmda ko'rsatilgan. Agar blokni yo'qotish zarur bo'lsa uning ustida sichqonchaning chap tugmasi bosiladi, keyin esa klaviaturadagi *Delete* klavishi bosiladi.

- Blokning parametrlari o'zgartiring. Buning uchun blok tasvirining ustida sichqonchaning chap tugmasi ikki marta bosing. Blokning parametrlarini tahrirlash oynasi ochiladi. Kerakli o'zgartirishlar kiritilgandan keyin OK tugmasini bosish yo'li bilan oyna yoping. Misol sifatida 3-rasmda *Sygnal Generator* bloki parametrlarini rostdash oynasi ko'rsatilgan.

- Hamma zarur bloklar sxemaga joylashtirilgandan keyin sxema elementlarini o'zaro ulang. Bloklarni o'zaro bir-biriga ulash uchun blokning chiqishiga kursor olib boriladi va sichqonchaning chap tugmasi bosilgan holda boshqa blokning kirishigacha liniya chiziladi. Bog'lanish liniyasida tarqalish nuqtasini hosil qilish uchun tugun joylashishi zarur bo'lgan nuqtada sichqonchaning o'ng tugmasi bosing kerakli liniyani chizing. Chizilgan liniyani yo'qotish uchun uni tanlang va klaviaturadagi *Delete* klavishi bosing. Bloklari bir-biri bilan ulangan modelning sxemasi 4-rasmda keltirilgan.

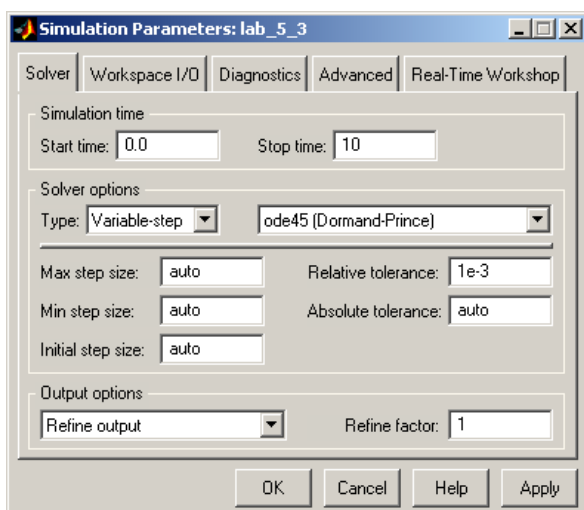
Ushbu dasturda elektr mashinalarni o'rganish uchun alohida manbalar to'plami tashkil etilgan bo'lib o'zgaruvchan va o'zgarmas tok mashinalarini tadqiq qilish imkoniyati yaratilgan. «Sources» elementlar to'plamidan kerakli elektr mashinalar tanlanib sxemaga kiritiladi va zarur bo'lgan nazorat elementlari

sxemaga kiritilib sxema ishga tushiriladi. Quyidagi sxemada o'zgarmas tok motorini tadqiq qilish sxemasi keltirilgan. Tajriba ishini bajarish tartibi quyida keltirilgan.

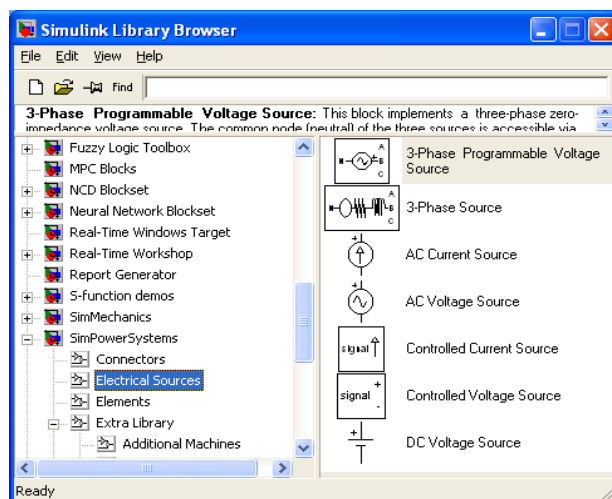
Xozirgi vaqtda MATLAB ilmiy-texnikaviy xisoblashlar uchun eng mukammal dasturlash tizimidir.

Asinxron motordagi dinamik jarayonlarni "Matlab" muhitida tadqiq etish. Asinxron motorni modellashtirishda 2-bobda ko'rib chiqilgan matematik ifodalardan foydalaniladi. Modellashtirishda "Matlab" paketidagi "Simulink" oynasidan foydalaniladi. Buning uchun differensial tenglamalar ma'lum bir tartibda analogli modellashtirish tamoyillariga asosan yig'iladi va natijalar olinadi.

Bunda elektr mashinalardagi dinamik jarayonlarni tavsiflovchi quyidagi differensial tenglamalardan foydalaniladi.



(a)

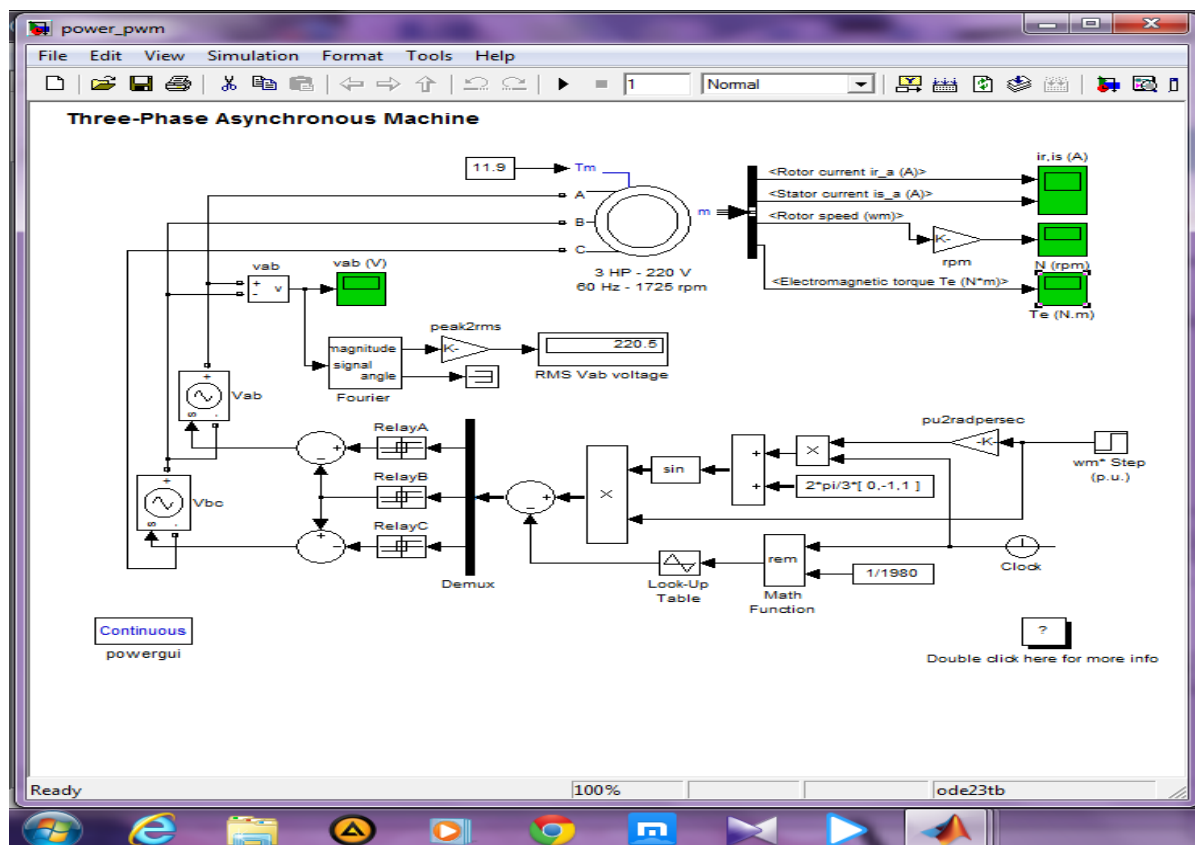


(b)

6.20-rasm. Elektr sxema parametrlarini - (a) va boshqaruv elementlarini tanlash oynasining ko'rinishi

Hisoblashlar bajarilishidan oldin hisoblash parametrlarini panel oynasining Simulation/Parameters menyusida o'rnatish. Modelni hisoblash parametrlari Solver ilovasida joylashgan boshqarish elementlari yordamida o'rnatiladi. Ushbu parametrlar uchta guruhga bo'lingan (6-rasm): *Simulation time* (Modellash intervali yoki boshqacha so'z bilan aytganda, hisoblash vaqti), *Solver options* (Hisoblash parametrlari), *Output options* (Chiqarish parametrlari).

Hisoblashlarni bajarish uchun asboblar panelidagi Start tugmasi bosiladi. Elektr energiyasi manbalari Electrical Sources bibliotekasini ochib (2-rasm) “Uch fazali boshqariladigan manba” tanlanadi.

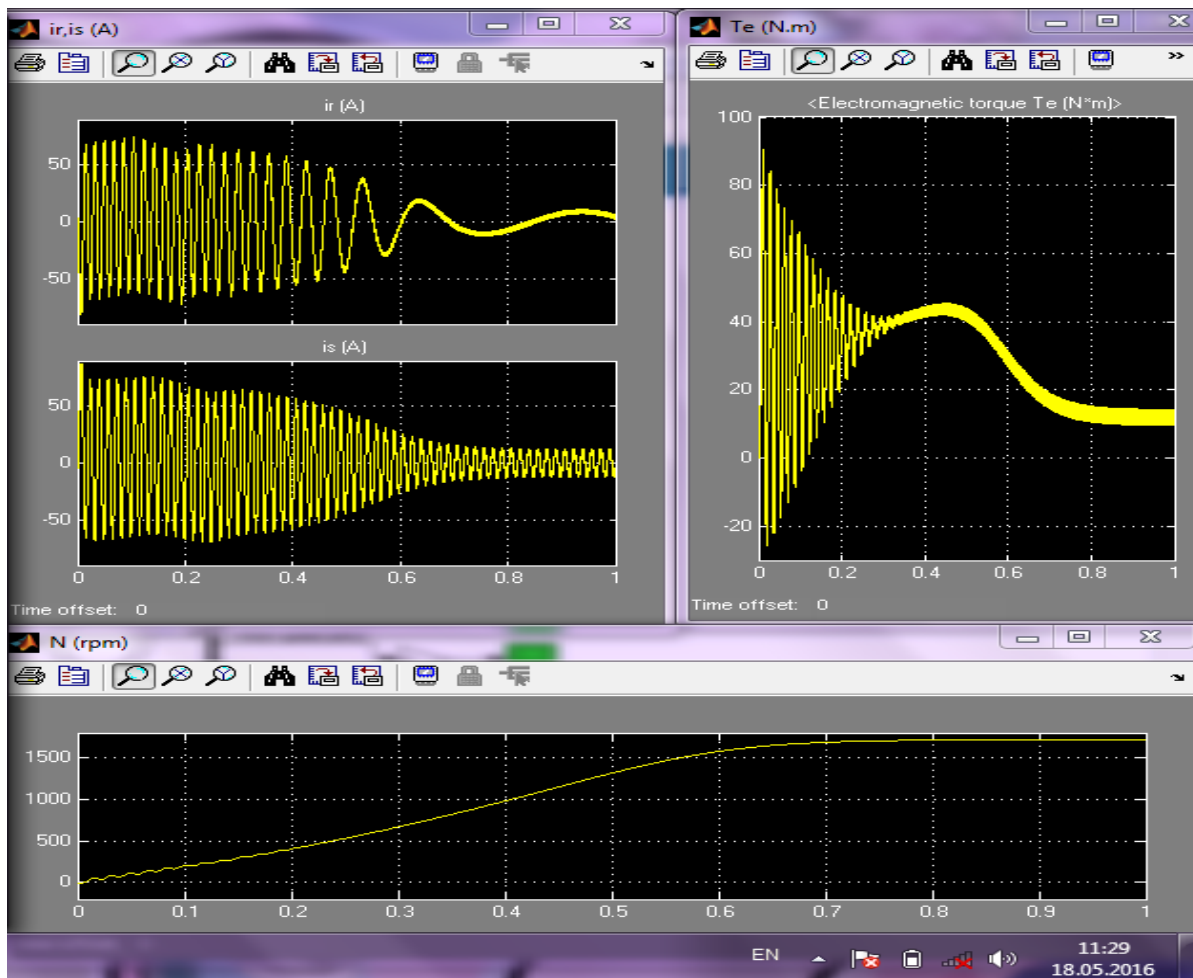


6.21-rasm. Rotori qisqa tutashgan asinxron motorni tadqiq qilish uchun yigʻilgan sxema.

Oʻzgaruvchan kuchlanish manbasi AC Voltage Source bloki va uning sozlash oynasini (6.21–rasm) ochib, unda oʻzgaruvchan kuchlanishning amplitudasi, boshlangʻich fazasi va chastotasining qiymatlari oʻrnatiladi. Measurements maydonida Multimeter bloki yordamida kuzatish va oʻlchash uchun kuchlanishni (Voltage) belgilanadi (6.20, b -rasm).

Yigʻilgan sxema asosida asinxron motorni yurgʻizish jarayoni egriliklarini olamiz. 6.22–rasmda AM ni yurgʻizishda motor momenti, tezligi, stator va rotor toklarini oʻzgarish egriliklari keltirilgan. Rotor toki chastotatsi kamayib borib 1-2 gs atrofida barqarorlashib borishini koʻrish mumkin. Rotor toki yurgʻizish davomida 5-6 martaga kamayib boradi. SHu jumladan, stator toki ham kmayib

boradi lekin tok chastotasi o'zgarmaydi. Pastki qismda motor tezligini o'zgarishi ko'rsatilgan. YUqori o'ng tomonda motor momentini o'zgarishi keltirilgan. Motor nominal yuklamaning 20%da 1 sekund davomida ishga tushirilgan. Motor 4 qutbli bo'lib salt ishlash nominal tezligi 1500 ayl/min tashkil etadi.

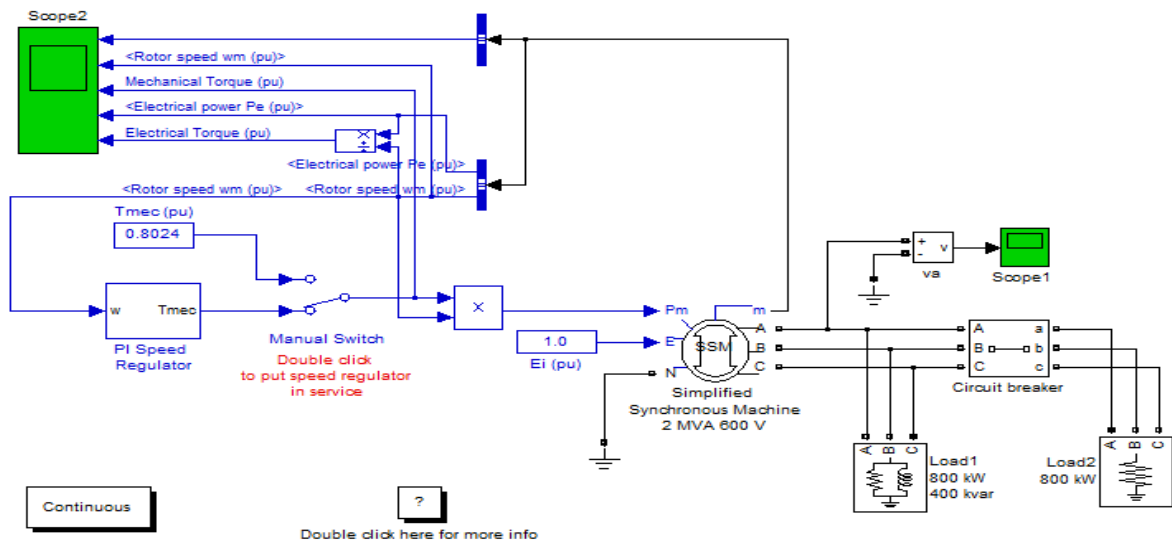


6.22-rasm. Asinxron motorni salt ishlash rejimida ishga tushirish.

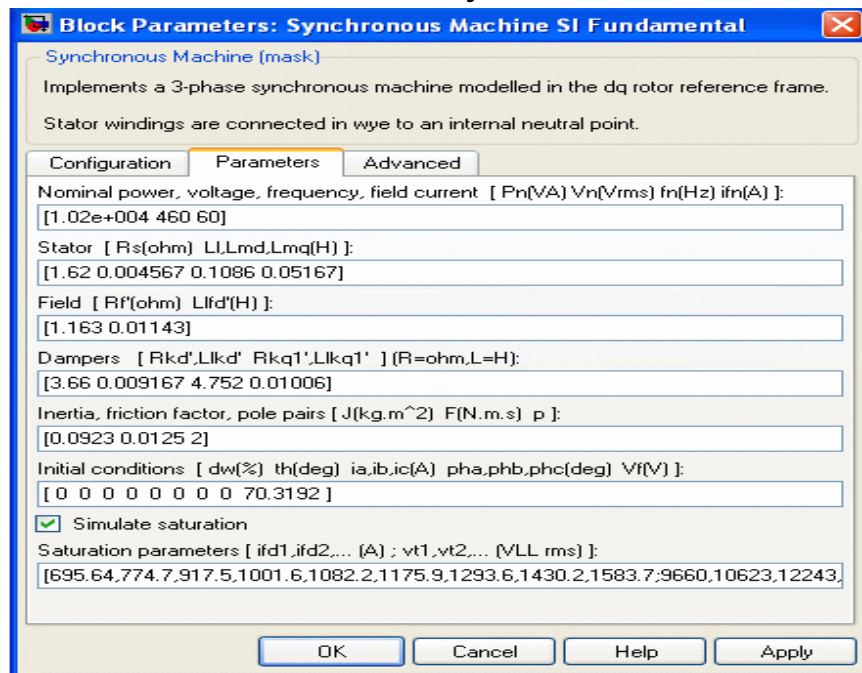
Rasmda ko'rinadiki yurg'izish toklari va momentning qiymati ham ancha kichik ekanligini ko'rish mumkin. Salt ishlash jarayoni nominal kuchlanish bilan olingan. salt ishlash jarayoni 0.4 sek atrofida tugashini kuzatishimiz mumkin.

Sinxron mashinalar dinamik jarayonlarini "Matlab" dasturida tadqiq qilish. Sinxron mashinalarni "Matlab" dasturida modellash uchun 2-bob 2.2-paragrafdagi matematik ifodalardan foydalanamiz. Dastlab "Simulink" dasturi menyusidagi elementlardan quyida 6.23-rasmda ko'rsatilgan sxemani yig'amiz. Bunda kerakli o'lchash va qayd qilish asboblari kiritamiz.

Simplified Synchronous Machine - Speed Regulation

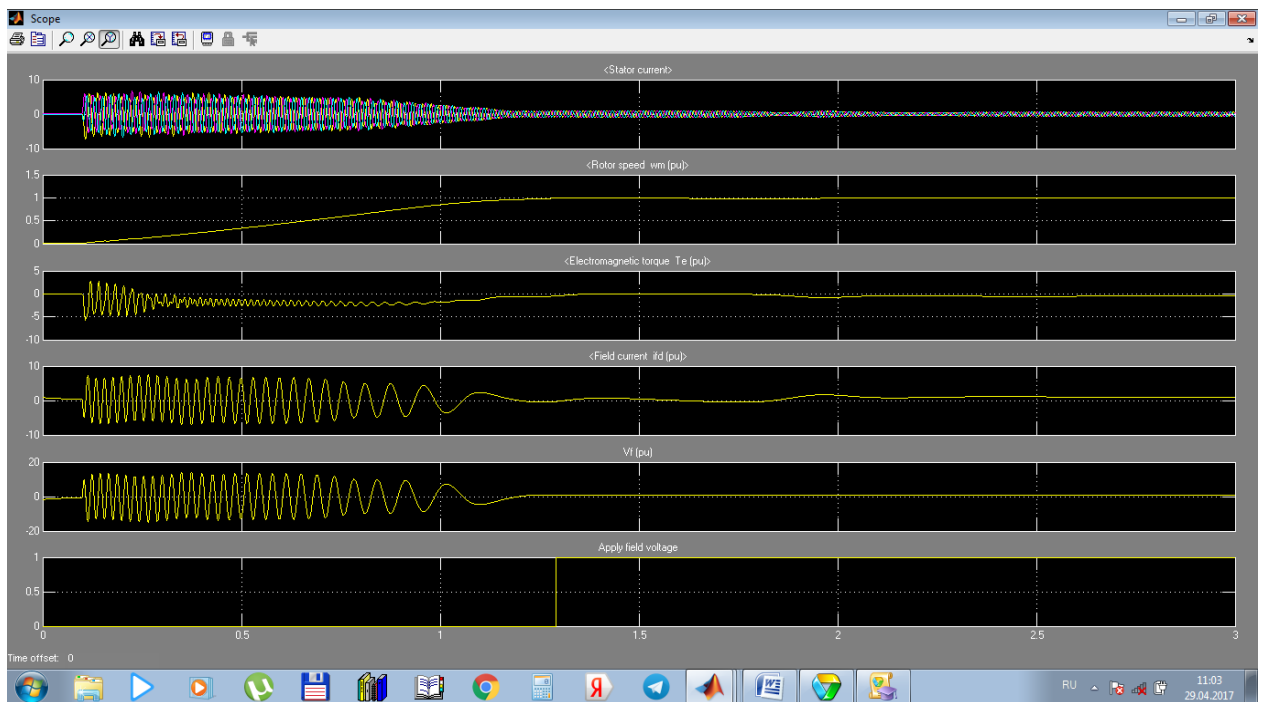


6.23-rasm. Sinxron mashinalarni dinamik jarayonlarini tatqiq etuvchi strukturaviy sxemasi

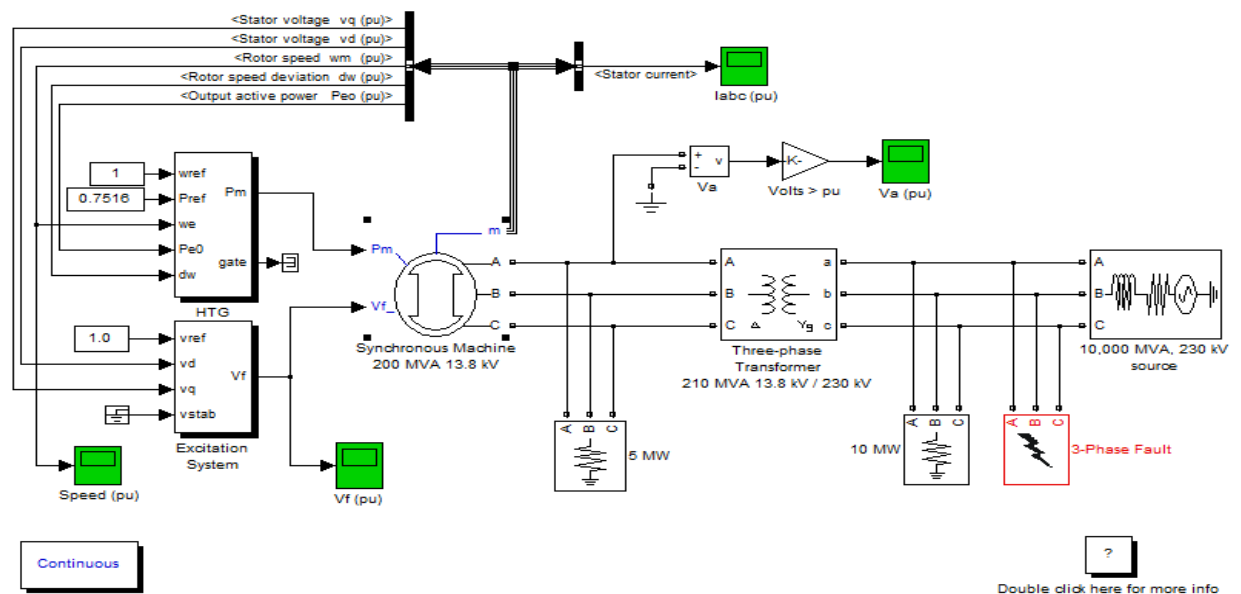


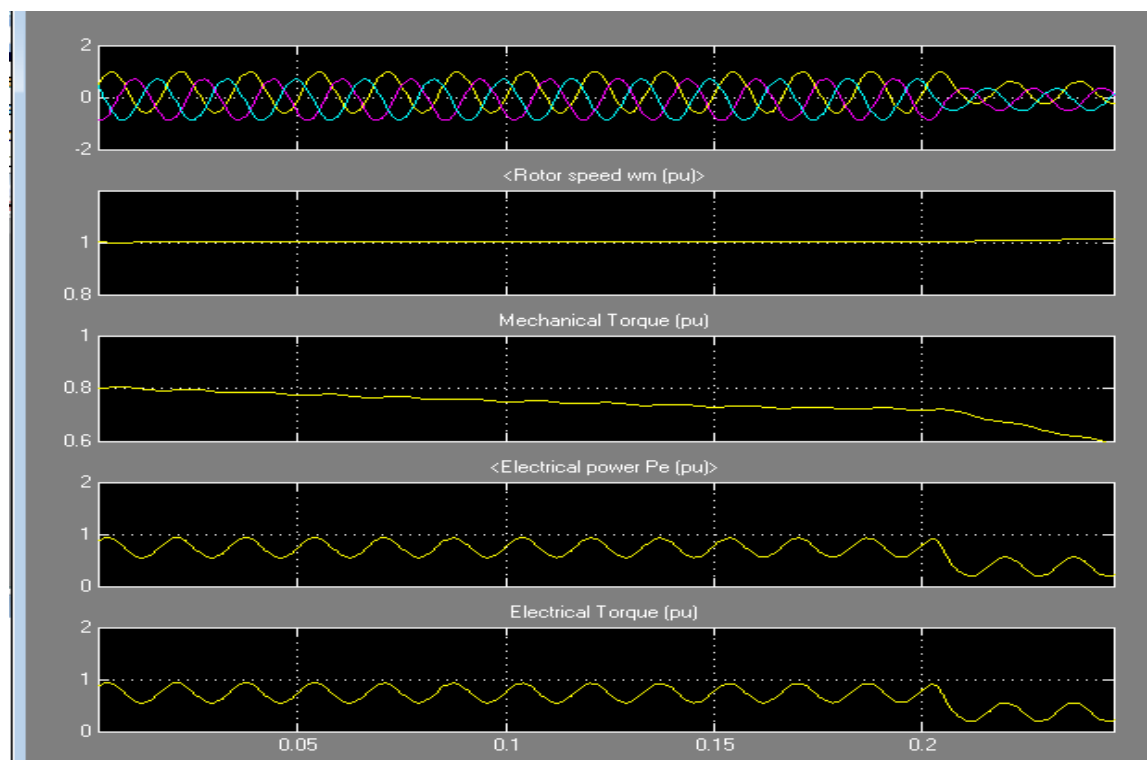
6.24-rasm. Sinxron mashinalar parametrlarini son qiymatlarini belgilash.

Sinxron mashinalar parametrlarini o'zgartirish oynasidan kerakli parametrlarning son qiymatlarini kiritamiz (6.24-rasm). Jumladan, uch fazali simmertik kuchlanishlar tizimini tanlaymiz. Kuchlanishlar sinxron mashinalarni chiqishida qayd qilinadi.



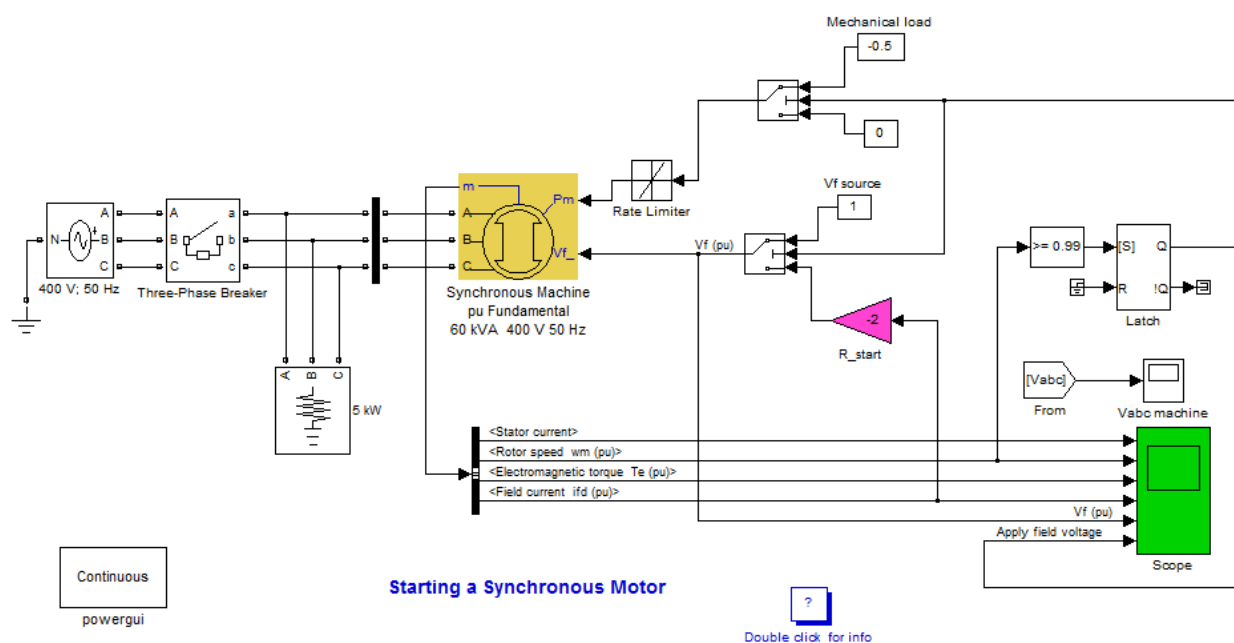
Sinxron mashinalarga beriluvchi elektr energiyasi parametrlarini oʻzgartirish uchun chatota va kuchlanish oʻzgartirish sxemaga kiritamiz va dinamik jarayonlarni tahlil qilamiz.





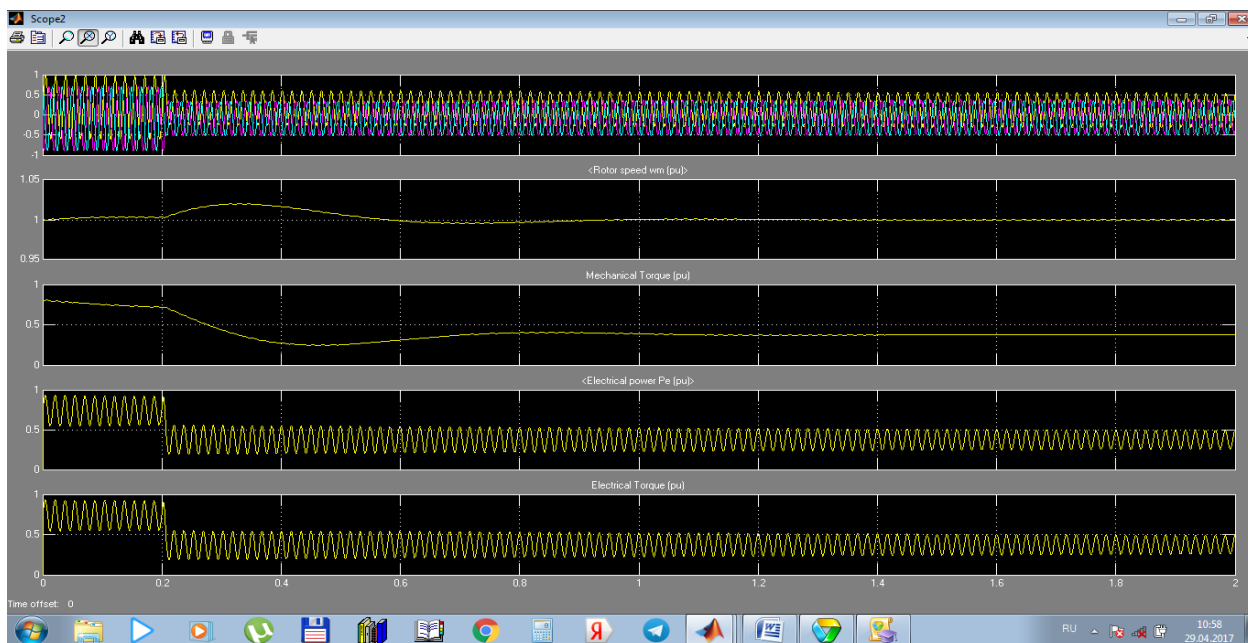
6.27-rasm. Sinxron mashinalarning “tebranishi” hodisasini kuzatish.

Keyingi 6.28–rasmda sinxron mashinalardagi tezlikni rostlash jarayoni ko‘rsatilgan. Rostlash jarayoni kuzatish uchun quyidagi sxema yig‘iladi. Bunda kerakli o‘lchov va qayd qilish asboblari sxemaga kiritiladi. Qaysi parametrlar ossillograf ekraniga chiqarilishi belgilanadi.



6.29-rasm. Sinxron mashinalarda rostlash jarayonini kuzatish uchun yig‘ilgan sxema.

6.30-rasmda sinxron mashinalarda tezlik o'zgarganda vujudga keladigan o'tish jarayonlari ko'rsatilgan. Yuqoridan pastga qarab: stator toki, rotor tezligi, mexanik moment, elektr quvvat va elektromagnit moment ko'rsatilgan.



6.30-rasm. Sinxron mashinalarda tezlikni rostdash jarayoni.

Quyidagi sxemada rotor tezligini tebranishi jarayoni kuzatilgan. Bunda stator toki, rotor tezligi, mexanik moment, elektr quvvat va elektromagnit moment o'zgarishi egriliklari ko'rsatilgan.

Elektr mashinalarni raqamli modellashtirish eksperimental tadqiqotlarni arzonlashtirish va muddatini qisqartirish imkonini beradi. Kompyuter modelida qisqa muddatda ko'p variantdagi tadqiqotlarni o'tkazish imkoniyati paydo bo'ladi.

NAZORAT SAVOLLARI?

1. CAD\ CAM\CAE dasturlarining vazifalari nima?
2. Qaysi dasturlar uch o'lchovli grafikada ishlaydi?
3. «matlab» muhitida Simulink dasturi qaysi qurilmalarni modellashtirishga mo'ljallangan?
4. Sinxron mashinalarning “tebranishi” hodisasi nima?

5. XULOSA

«Analitik elektromexanika» fanini o'qitishdan maqsad – tadqiqotchilarda energiyani elektromexanik o'zgartgich (EEMO') tahlilining asoslari va EEMO' larning ekspluatasion ish rejimlarini tahlil qilishga oid bilim va ko'nikmalarni shakllantirishdir. Fanning vazifasi esa, talabalarga energiyani elektromexanik o'zgartgichlarning ish rejimlarini matematikaning takomillashtirilgan metodlari asosida tahlil qilib, ulardan chiqarilgan to'g'ri xulosani amaliyotga tatbiq qilish yo'llarini o'rgatishdan iborat.

”Analitik elektromexanika” fani “Elektr mexanikasi” mutaxassisligining integrallashgan kursi bo'lib, elektr mashinalari va kuch transformatorlarining o'ziga xos xususiyatlarini hisobga olgan holda ta'lim, fan, texnika, texnologiya va ishlab chiqarishning “Elektr mexanikasi” sohasidagi yutuqlarini o'rgatuvchi fandir. Bu fanning asosiy vazifasi energiyani elektromexanik o'zgartgichlarning ish rejimlarini matematikaning zamonaviy metodlari asosida tahlil qilib, ulardan chiqarilgan to'g'ri xulosani amaliyotga tatbiq qilish yo'llarini o'rgatishdan iboratdir.

Elektromexanikaviy tizimlar va majmualarni analitik tadqiqotlarida vector algebra va matritsaviy tahlil metodlardan keng foydalaniladi. O'quv qo'llanmada elektr mashinalarni vector va matritsaviy modellari tadqiq qilingan. Ularni tadqiqotlarda qo'llash afzalliklari asoslab berilgan.

Analitik tadqiqotlarning asosiy yo'nalishlaridan biri matematik va uning bir tarmog'i bo'lgan raqamli modellashtirish hisoblanadi. Qo'llanmada zamonaviy kompyuterda modellashtirish dasturlari o'rganilgan va ularni qo'llash sohalari hamda ustunlik tomonlari tahlil qilingan.

Elektr mexanikasi rivojlanishining muhim sohalaridan biri bu qayta tiklanuvchan energiya manbalaridan (shamol elektr stansiyalari mini, mikro GESlar) foydalanib, ishlovchi generatorlarning samaradorligini oshirish hisoblanadi. Shuning uchun o'quv qo'llanmada ushbu masalaga alohida o'rin berilgan.

Bu o'quv adabiyoti o'zbek tilida oldin ham bo'lmaganini hamda lotin imlosida endi yaratilayotganli sababli kamchiliklardan xoli emas. Ammo, hozirgi kunda talabalarga bunday adabiyotlarga ehtiyoj katta bo'lgani uchun fan bo'yicha bilim va malakalarni o'zlashtirishda foydali adabiyot bo'ladi deb umid qilamiz. O'quv qo'llanma bo'yicha e'tirozlar va tavsiyalarni kutib qolamiz.

GLOSSARIY

Elektromagnit o'tish jarayonlari - elektr mashinalarning doimiy ravishda rotor tezligida, shuningdek bir-biriga bog'lab qo'yilgan shamlardan bo'lgan oqimlarning o'zgarishi bilan bog'liq bo'lgan vaqtinchalik jarayonlardir;

Elektromekaniq vaqtinchalik jarayonlar - elektr mashinalar sarguzashtlari davridagi vaqtinchalik jarayonlar rotor tezligidagi o'zgarish bilan davom etadigan bo'lsa, bunday vaqtinchalik jarayonlar;

Umumlashgan elektr mashinalari - bu haqiqiy mashinalarda sodir bo'lgan jarayonlarni tahlil qilishga imkon beradi, tekis havo oralig'iga ega bo'lgan, stator va rotorda hech qanday oluklar mavjud bo'lmagan matematik modeldir; Qisqa tutashuv transformatori favqulodda jarayondir.

O'tish jarayonning davomiyligi - oqimning erkin komponentining parchalanish vaqtiga to'g'ri keladi, ya'ni indiktorning nisbati va transformatorning sarg'ish faol qarshiligi;

Elektromagnit o'tish jarayoni davomiyligi - armatura sargiri yoqilsa, elektromagnit vaqt sobit belgilanadi, bu induktansa va zanjir faol qarshiligiga bog'liq;

Muqobil oqim - mashinalarning ishga tushirilishi vaqtinchalik elektromekaniq jarayon bo'lib, Park-Gorev tenglama tizimi tomonidan to'liq tavsiflanishi;

Mexanik tavsif - o'rtacha momentni va stator magnit oqimining sirpanishga bog'liqligi;

SMni boshqa rotor tezligini boshqa EM-dan ajratib turadigan asosiy kuchlanish xususiyatlaridan biri rotor tezligini u bilan bog'liq bo'lgan kuchlanish chastotasi;

Doimiy rejim - original rejimning buzilishi natijasida yangi oddiy tartib o'rnatilishi;

O'z-o'zini uyg'onishi – elektromagnit turg'un bo'lmagan nomaqbul o'suvchi stator toki olib kelishi va oqimining keskinlik o'z-o'zidan o'sishi bilan

harakterlanishi, uning Terminalda kiritilgan SM kapasitansla ish paytida paydo bo'ladi.

ГЛОССАРИЙ

Электромагнитные переходные процессы – переходные процессы, связанные с изменением токов в обмотках электрической машины при постоянной частоте вращения ротора, а также при взаимно неподвижных обмотках;

Электромеханические переходные процессы – переходные процессы в цепях обмоток электрической машины сопровождающейся с изменениями частоты вращения ротора;

Обобщенная электрическая машина – это математическая модель, позволяющая перейти к анализу процессов, протекающих в реальной машине, имеет гладкий воздушный зазор, пазы на статоре и роторе отсутствуют;

Короткое замыкание - является аварийным процессом трансформатора

Длительность переходного процесса - времени затухания свободной составляющей тока, т. е. соотношения индуктивности и активного сопротивления обмоток трансформатора;

Длительность электромагнитного переходного процесса– при включении обмотки якоря в сеть определяется электромагнитной постоянной времени, зависящей от индуктивности и активного сопротивления цепи якоря;

Пуск машин переменного тока- представляет собой переходный электромеханический процесс и полностью описывается системой уравнений Парка — Горева;

Пусковые характеристики – зависимости среднего момента и тока статора от скольжения;

Одно из основных свойств, отличающих СМ от других ЭМ— строгое соответствие частоты вращения ротора частоте напряжения сети, к которой она подключена;

Устойчивый режим - если в результате возникшего возмущения исходного режима устанавливается новый нормальный режим;

Неустойчивый режим - если же после возмущения нормальный режим невозможен;

Сползание — аperiодическое нарушение устойчивости, характеризующее собой предел статической перегружаемости определенных соотношениях параметров СМ и нагрузки;

С а м о р а с к а ч и в а н и е — самовозбуждающиеся периодические колебания частоты вращения ротора СМ. Суть этого явления заключается в том, что ротор, получив случайное бесконечно малое возмущение извне, в дальнейшем вращается с колеблющейся частотой;

Самовозбуждение — электромагнитная неустойчивость, возникающая при работе СМ с емкостным сопротивлением, включенным на ее зажимы, характеризуется самопроизвольным ростом токов и напряжений, что приводит к недопустимому возрастанию тока статора.

GLOSSARY

The Electromagnetic connecting process- connecting processes, connected with change current in winding of the electric machine under constant frequency of the rotation of the rotor, as well as under mutually still winding;

The Electromechanic connecting process - if connecting processes change the frequency of the rotation of the rotor are accompanied in circuit of the windings of the electric machine, that such connecting processes;

Generalised electric machine - a mathematical model, allowing go to analysis of the processes, running in real machine, has a smooth air clearance, slots on статоре and rotor are absent;

Short circuit - a transformer is an emergency process

Duration of the connecting process corresponds to - time of the fading free forming current, t. e. correlations to inductances and active resistance of the windings of the transformer;

Duration of the electromagnetic connecting process- when enabling windings anchor in network is defined electromagnetic constant time, hanging from индуктив-ности and active resistance anchor circuit;

Starting the machines of alternating current- presents itself connecting electromechanic process and is completely described by system of the equations Parka - Goreva;

The Activate features - a dependencies of the average moment and current статора from slide;

One of the main characteristic, distinguishing refer to from other EM-strict correspondence to of the frequency of the rotation of the rotor to frequency of the voltage to network, to which she is connected;

The Firm mode - if as a result of appeared indignations of the source mode is fixed the new normal mode;

The Unstable mode - but if after indignation normal mode impossible;

Climbing down - an aperiodic breach to stability, characterizing itself limit steady-state перегружаемости determined correlations parameter REFER TO and loads;

The Self-excitation - electromagnetic vagary, appearing when functioning(working) with capacitive resistance REFER TO, included on her(its) grips, is characterized by spontaneous growing current and voltages that brings the current статора about inadmissible increasing.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Mirziyoyev Sh.M. Milliy taraqqiyot yo'limizni qat'iyat bilan davom ettirib, yangi bosqichga ko'taramiz.-Toshkent: "O'zbekiston",1 jild, NMIU, 2017,- 592 b.
2. Аллаев К.Р. Режимы электрических систем с асинхронными турбогенераторами. –Ташкент: ТГТУ имени А.Р.Беруни, «Fan va texnologiyalar markazining bosmaxonasi», 2005.–286 с.
3. Аллаев К.Р. Электромеханические переходные процессы: Учебное пособие. –Т.: «Молия», 2007–280 с.
4. Alimxodjayev K.T., Pirmatov N.B., Ziyoxo'jayev T.I. Elektr mashinalari. Darslik. –Т.: "fan va texnologiya", 2018. - 344 b.
5. Alimxodjayev K.T., Pirmatov N.B., Ziyoxo'jayev T.I., Mustafoqulova G.N. Elektr mashinalari va transformatorlarning ekspluatatsiyasi. Darslik. –Т.: "Fan va texnologiya", 2019. - 240 b.
6. Berdiyev U.T., Pirmatov N.B. Elektromexanika. Darslik. –Т.: "Shams ASA". 2014. – 393 b.
7. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. –М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 320 с.
8. Dalaboyev U. Vektor va tenzor tahlil. –Т.: "Fan va texnologiya", 2015, - 160 b.
9. Fitzgerald A.E., Charles Kingsley, Stephan D. Umans. Electric machinery. Sixth edition. McGrawHill Higher Education, 2003, 687 p.
10. Голдберг О.Д., Хелемская С.П. Электромеханика. –М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 512 с.
11. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. –М.: Издательство МЭИ, 2004. Том 1.- 652 с.
12. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. Учебник для вузов. –М.: Высшая школа, 2001, -327 С.

13. Mary Attenborough. Mathematics for Electrical Engineering and Computing. Newnes. Copyright 2014.
14. Marius Rosu, Ping Zhou. Multiphysics simulation by design for electrical machines, power electronics, and drives. Textbook. Wiley & Sons, New Jersey, -2018. -290 p.
15. Pirmatov N.B., Zayniyeva O.E. Elektromexanika asoslari. O'quv qo'llanma. –T.: "Ma'naviyat", 2015. - 104 b.
16. Sadullaev N.N., Shoboev A.H. Transformator va elektr mashinalarni loyihalash. -T.: "Fan va texnologiya", 2017, 200 b.
17. Salimov J.S., Pirmatov N.B. Elektr mashinalari. Texnika oily o'quv yurtlari talabalari uchun darslik. T.: O'zbekiston faylasuflari milliy jamiyati nashriyoti. 2011. – 408 b.
18. Салимов Д.С., Пирматов Н.Б., Мустафакулова Г.Н. Дидактический материал для практических занятий по курсу «Аналитическая электромеханика». –Т.: «KUROPRIINT», 2013. – 136 с.
19. Stephan J. Chapman. Electric machinery fundamentals. Fours edition. McGrawHill Higher Education, 2005, 744 p.
20. Stolarski T.A., Nakasone Y., Yoshimoto S.. Engineering analysis with ANSES software. -Tokio. Elsevier, 2006, -514 p.
21. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ.–Москва, Мир, 1989. - 666 с.
22. Wynand S. Verwoerd. Matrix methods and differential equations. A practical introduction. Copyright 2012. Bookboon.com