

**ALIMXODJAYEV K.T., PIRMATOV N.B.,  
ZIYOXO'JAYEV T.I.**

# **ELEKTR MASHINALARI**



**TOSHKENT**

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

**ALIMXODJAYEV K.T., PIRMATOV N.B.,  
ZIYOXO‘JAYEV T.I.**

# **ELEKTR MASHINALARI**

*O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta‘lim vazirligi  
tomonidan oliy o‘quv yurtlari talabalari uchun  
darslik sifatida tavsiya etilgan*

**TOSHKENT – 2018**

UO'K: 621.313(075.8)

KBK 32.96-04ya7

A 50

A 50

Alimxodjayev K.T., Pirmatov N.B., Ziyoxo'jayev T.I. Elektr mashinalari.  
-T.: «Fan va texnologiya», 2018, 344 bet.

ISBN 978-9943-11-920-8

Darslikda elektr mashinalari va transformatorlarning elektr energetika tizimi stansiyalari va nim-stansiyalari, tog'-metallurgiya sanoati va xalq xo'jaligining barcha sohalari korxonalari jihozlarida qo'llaniladigan turlarning nazariy asoslari, ishlash prinsiplari, tuzilishi va ishlash rejimlarining tahlillari keltirilgan. Elektr mashinalar nazariyasi elektromexanik energiya o'zgartirishning umumiy nazariyasi asosida qurilgan. Bunda asosiy e'tibor elektr mashinalar va transformatorlarda ishchi jarayonlar, boshqarish va ishga tushirish usullarining fizik mohiyatiga qaratilgan. Ushbu jarayonlarni tavsiflovchi asosiy bog'lanishlar keltirilgan.

Darslik Oliy O'quv Yurtlarining elektromexanika va elektroenergetika yo'nalishlari talabalari uchun mo'ljallangan bo'lib, elektrotexnik mutaxassisliklarning muhandislari va ilmiy xodimlari ham foydalanishlari mumkin.

\*\*\*

В учебнике приведены принципы устройства и основные вопросы теории и конструкции электрических машин и трансформаторов, широко распространенных и применяемых в оборудовании станций и подстанций электроэнергетической система, горно-металлургической промышленности и других предприятий народного хозяйства. Теория электрических машин построена на основе общей теории электромеханического преобразования энергии. При этом основное внимание уделено физической сущности рабочих процессов, происходящих в машинах и трансформаторах, способ управления и пуском в ход двигателей, приведены основные соотношения, характеризующих эти процессы.

Учебник предназначен для студентов вузов электромеханических и электроэнергетических направлений и может быть использован инженерами и научными работниками электротехнических специальностей.

\*\*\*

The textbook describes the principles of the device and the main issues of the theory and design of electrical machines and transformers, widely used and used in the equipment of stations and substations for the electric power system, the mining and metallurgical industry and other enterprises of the national economy. The theory of electrical machines is based on the general theory of electromechanical energy conversion. In this case, the main attention is paid to the physical nature of the working processes occurring in the machines and transformers, control methods and starting-up of the engines, the main relationships are given that characterize these processes.

For students of universities electromechanical and electric power directions and can be used by engineers and scientists of electrical engineering specialties.

UO'K: 621.313(075.8)

KBK 32.96-04ya7

**Taqrizchilar:**

**Berdiyev U.T.** – texnika fanlari nomzodi, dotsent,

**Matkarimov U.R.** – «Toshlektrshit» korxonasi bosh direktori.

ISBN 978-9943-11-920-8

© «Fan va texnologiya» nashriyoti, 2018;  
© Toshkent davlat texnika universiteti, 2018.

## SO‘Z BOSHI

Ushbu darslik Olmaliq tog‘-kon kombinatining buyurtmasi asosida tog‘-metallurgiya sanoati korxonalarida ishlovchi tugallangan o‘rta ma‘lumotli yoshlar hamda soha oliy o‘quv yurtlari «Elektroenergetika», «Elektrotexnika, elektromexanika, elektrotexnologiya» yo‘nalishlarining talabalari uchun mo‘ljallangan bo‘lib, elektroenergetika yo‘nalishi talabalari, hamda ilmiy va muhandis-texnik hodimlar ham foydalanishi mumkin.

Darslikda elektr mashinalari va transformatorlarning ko‘p tarqalgan hamda tog‘-metallurgiya sanoatida maxsus qo‘llaniladigan turlarining nazariy asoslari, tuzilishi, ishlash rejimlari va ekspluatatsion xususiyatlarining tahlili, hamda har bir bob o‘quv materialini o‘zlashtirishga yordam beruvchi bir qator misollar yechish yo‘llari keltirilgan.

Transformatorlar, asinxron, sinxron mashinalar, o‘zgarmas tok mashinalari hamda sohaning ba‘zi jihozlari haqidagi ma‘lumotlarni tushuntirish ushbu fanda keng qo‘llaniladigan ketma-ketlik qabul qilingan. O‘zgaruvchan tok elektr mashinalari nazariyasi va amaliyoti umumiy masalalari alohida keltirilgan.

Materiallarni tushuntirishda asosiy urg‘u elektr mashinalari va transformatorlar ishlash jarayonlarining fizik asoslarini yoritishga qaratildi.

Ma‘lumki, fanni o‘zlashtirish jarayonida mustaqil misollar yechish nazariy materialni chuqur va samarali o‘rganishning asosiy omili hisoblanadi. Shunga asoslanib, darslikning barcha boblaridagi mavzularda mustaqil yechish uchun misollar keltirilgan. Bunda har bir misol tarkibida o‘nga yaqin har xil variantlar berilgan. Bu misollar o‘quvchilarga uy vazifasi yoki majburiy nazorat ishlari sifatida topshiriqlar qilib berilishi mumkin.

*Mualliflar*

## KIRISH

### K.1 Elektromexanik energiya o'zgartirish

Har bir davlat iqtisodiyatini elektr energiya bilan ta'minlash uning faoliyatidagi eng muhim soha hisoblanadi. Tog'-metallurgiya sanoati, mashinasozlik, qurilish, transport va boshqa soha korxonalarini rivojlantirishda elektr energetikasi asosiy poydevor, xalqning turmush farovonligini oshirishda, umuman, davlat hayotining barcha yo'nalishlarida yetakchi omil hisoblanadi. Elektr mashinalari elektr stansiyalarda elektr energiyani ishlab chiqarishda ham, sanoat korxonalarini ishga tushirishda va aholi hayotining barcha sohalari-dagi elektr energiyani iste'mol qilishda ham asosiy vosita hisoblanadi.

Elektr mashinasi – mexanik energiyani elektr energiyaga va, teskarisi, elektr energiyani mexanik energiyaga aylatiruvchi elektromexanik energiya o'zgartirichidir.

Elektr energiyasi elektr stansiyalarda elektr mashinalari – generator yordamida ishlab chiqariladi. Bizning davlatimizda elektr energiyaning asosiy qismi (95% gacha) issiqlik elektr stansiyalarida (IES) organik yoqilg'ini (gaz, ko'mir, mazut) yoqish yo'li bilan ishlab chiqariladi. Unda suv qaynatilib, yuqori bosimdagi bug'ga aylantiriladi. Bug' bosim turbinaga uzatiladi va rotorni aylantiradi (issiqlik energiyasi turbinada mexanik energiyaga aylantiriladi). Turbinaning rotoridan aylanma harakat generator (turbogenerator) valiga uzatiladi. Generatoridagi sodir bo'layotgan elektromexanik jarayonlar natijasida mexanik energiya elektr energiyaga aylanadi.

Gidravlik elektr stansiyalarda (GES) elektr energiya ishlab chiqarish jarayoni quyidagicha bo'ladi: to'g'on yordamida ma'lum sathgacha ko'tarilgan suv gidravlik turbinaning ishchi g'ildiragi (parragi)ga quyiladi; bunda turbina parragini aylantirishda hosil bo'lgan mexanik energiya elektr generatorining valiga uzatiladi va unda mexanik energiya elektr energiyasiga aylantiriladi.

Elektr energiyani iste'mol qilish natijasida u boshqa turdagi (issiqlik, mexanik, kimyoviy) energiyaga aylantiriladi. Elektr energiyasining absolyut katta qismi (dastgohlar, tegirmonlar, nasos stansiyalari, transport vositalari) sanoat uskunalari harakatga keltirishda, ya'ni mexanik energiyaga aylantirishda ishlatiladi. Bunday elektromexanik energiya o'zgartirilishi elektr mashinalari – elektr motorlari yordamida amalga oshiriladi.

Elektr motori – korxonalar ishchi mexanizmlari elektr yuritmalarining asosiy elementidir. Elektr energiya parametrlarini ishonchli boshqarish, uni muammosiz taqsimlash usullari mavjudligi, sanoatda biror ishchi jihozning alohida zvenolari mustaqil motorlar yordamida harakatga keltirish imkonini beruvchi ko'p motorli elektr yuritmalarining keng qo'llanishiga olib keldi.

Elektr stansiyalarda ishlab chiqarilayotgan elektr energiyasini iste'molchiga uzatish, birinchi galda elektr stansiyalardan birnecha yuzlab kilometr uzoqlikda joylashgan yirik sanoat markazlariga yetkazib berish zarur. So'ngra har turdagi iste'molchilar: sanoat korxonalari, transport, qurilish, turar joy va h.k.larga taqsimlash lozim. Elektr energiyani uzoq masofalarga yuqori (500 kVgacha) kuchlanishlarda, demak, past toklarda uzatiladi. Bu bilan elektr uzatish liniyalar (EUL)ida sodir bo'luvchi elektr isroflari (Joul isroflari)ni minimal darajagacha yetkaziladi. Shu sababli elektr energiyasini uzatish va taqsimlashda kuchlanishni bir necha marta kuchaytirish va pasaytirishga to'g'ri keladi. Kuchlanishning bunday o'zgartirilishi transformator deb nomlangan elektromagnit qurilmada bajariladi. Transformator elektr mashinasi emas, chunki u ishlaganda elektr energiyasi mexanik energiyaga aylantirilmaydi va, aksincha, mexanik energiya elektr energiyasiga aylantirilmaydi; transformator faqat elektr energiyasining kuchlanishi va tokining miqdorlarini o'zgartiradi, xolos. Transformator – statik elektromagnit apparat bo'lib, unda harakatlanuvchi qismlar yo'q. Biroq, transformatorlarda kechuvchi elektromagnit o'zgarishlar elektr mashinasi ishlagandagi jarayonlarga o'xshashdir. Magnit maydoni bilan tokli o'tkazgich o'zaro ta'sir etish jarayonlarining tabiati elektr mashinalari va transformatorlarda bir xil kechadi. Shu sababli, transformatorlar elektr mashinalari fanining ajralmas qismi hisoblanadi.

## K.2 Elektr mashinalari ishlash prinsipi asosida yotuvchi tabiat qonunlari, qoidalari va hodisalari

«Elektr mashinalari» fanini o'rganish «Elektrotexnika nazariy asoslari» fanida keltirilgan elektr va magnit hodisalarining fizik talqinlarini bilishga asoslangan. Shunga qaramay, «Elektr mashinalari» fanini o'rganishga kirishdan avval, elektr mashinalari ishlash prinsipi asoslangan ba'zi qonun va qoidalarni, birinchi galda, elektromagnit induksiyasi qonunini fizik talqimini yodga olamiz.

**Elektromagnit induksiyasi qonuni.** Elektr mashinasi generator rejimida ishlash jarayonida mexanik energiyaning elektr energiyaga aylanadi. Bu jarayon elektromagnit induksiyasi qonuni asosida tushuntiriladi: *agar magnit maydonida joylashgan o'tkazgichga  $F$  kuch ta'sir etib (K.1-rasm,a), uni, masalan, chapdan o'ngga magnit maydon induksiya vektori  $V$  ga perpendikulyar harakatlantirilsa, u holda o'tkazgichda EYUK induktivlanadi*

$$E = Blv, \quad (\text{K.1})$$

*bunda  $V$  – magnit maydon induksiyasi, Tl;  $l$  – o'tkazgichning aktiv uzunligi, ya'ni magnit maydonda joylashgan uzunligi, m;  $v$  – o'tkazgich harakatining tezligi, m/s.*

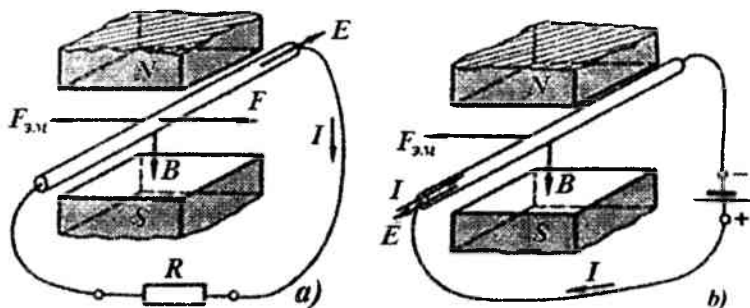
**«O'ng qo'l» va «chap qo'l» qoidalari.** Yuqoridagi o'tkazgichda induktivlangan EYUKning yo'nalishini aniqlash uchun «o'ng qo'l» qoidasidan foydalanamiz (K.2-rasm,a). Bu qoidaga ko'ra o'tkazgich EYUKning yo'nalishi biz tomondan ekaligini aniqlaymiz. Agar o'tkazgich klemmalari tashqi rezistor  $R$  (iste'molchi)ga ulanib, berk kontur hosil qilsa, u holda EYUK ta'sirida o'tkazgichda shu yo'nalishda tok oqa boshlaydi. Shunday qilib, magnit maydonidagi o'tkazgichni elementar generator deb qarash mumkin ekan.

Tok  $I$  ning magnit maydoni bilan o'zaro ta'siri natijasida o'tkazgichga ta'sir etayotgan elektromagnit kuch hosil bo'ladi

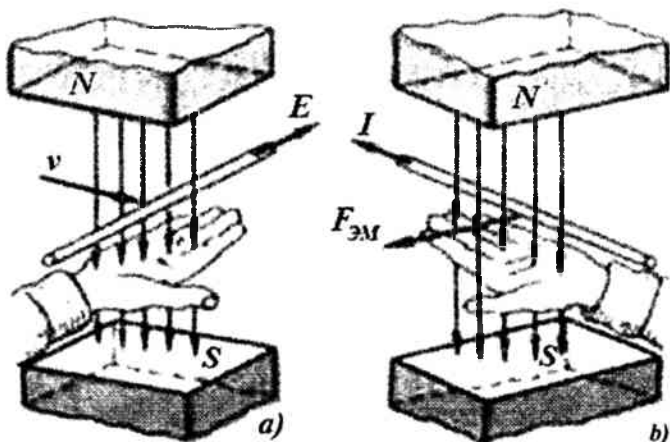
$$F_{EM} = Blv. \quad (\text{K.2})$$

Bu  $F_{EM}$  kuchning yo'nalishini «chap qo'l» qoidasi (K.2-rasm,b) yordamida aniqlash mumkin. Ko'rilayotgan holatda bu kuch chapdan

o'ngga yo'nalgandir, ya'ni o'tkazgich harakati fo'nalishiga qarama-qarshidir. Shunday qilib, ko'rilayotgan elementar generatorlarda  $F_{EM}$  kuch harakatlantiruvchi  $F$  kuchga nisbatan tormozlovchi bo'ladi.



**K.1-rasm.** Elektromagnit induksiyasi qonunini generator (a) va motor (b) rejimlarida



**K.2-rasm.** “O’ng qo’l” (a) va “chap qo’l” (b) qoidalarini tushuntirish

O'tkazgichning tekis  $v = const$  harakatida bu kuchlar muvozanatlashadi, ya'ni  $F = F_{EM}$ . Tenglikning o'ng va chap tomonlarini o'tkazgich tezligiga ko'paytirib, quyidagi ifodani hosil qilamiz.



$$F \cdot v = F_{\text{ЭМ}} \cdot v.$$

Ushbu ifodaga  $F_{\text{ЭМ}}$  ning (K.2) qiymatini qo'ysak quyidagi ifoda hosil bo'ladi

$$F \cdot v = B \cdot l \cdot v \cdot I = E \cdot I. \quad (\text{V.Z})$$

Tenglikning chap qismi o'tkazgichni magnit maydonidan olib o'tish uchun sarflanayotgan mexanik quvvatni aniqlaydi; o'ng qismi esa berk konturda  $I$  toki hosil qilayotgan elektr quvvatni anglatadi. Bu ikki quvvatlar orasidagi tenglik belgisi generatorda o'tkazgichga qo'yilgan tashqi kuch hosil qilgan mexanik quvvatning elektr energiyaga aylanishini ko'rsatadi. Agar o'tkazgichga tashqi kuch  $F$  qo'yilmasa, elektr energiyasi manбайдan unga  $U$  kuchlanish shunday qo'yilsaki, unda o'tkazgichdagi  $I$  tok K.1-rasm,  $b$  da ko'rsatilganidek, yo'nalishda bo'lsa, u holda o'tkazgichga faqat  $F_{\text{ЭМ}}$  elektromagnit kuch ta'sir etadi. Bu kuch ta'sirida o'tkazgich magnit maydonida harakatga keladi. Bunda o'tkazgichda yo'nalishi  $U$  kuchlanishga teskari yo'nalishda bo'lgan EYUK induktivlanadi. Shunday qilib, o'tkazgichga qo'yilgan  $U$  kuchlanishning bir qismi shu o'tkazgichda induktivlangan EYUK  $E$  bilan muvozanatlanadi, qolgan qismi esa o'tkazgichda kuchlanishlar pasayuvini hosil qiladi

$$U = E + Ir \quad (\text{K.4})$$

bunda  $r$  – o'tkazgichning elektr qarshiligi.

Tenglikning chap va o'ng qismlarini tok  $I$  ga ko'paytiramiz

$$U \cdot I = E \cdot I + I^2 r.$$

$E$  ning o'rniga (K.1)dan EYUKning qiymatini qo'yib, quyidagini hosil qilamiz

$$UI = Blv \cdot I + I^2 r,$$

yoki, (K.2) ga ko'ra,

$$UI = F_{\text{ЭМ}} \cdot v + I^2 r. \quad (\text{V.5})$$

Bu tenglikdan shu kelib chiqadiki, o'tkazgichga kelayotgan elektr quvvat ( $UI$ )ning bir qismi mexanik energiya ( $F_{\text{ЭМ}} \cdot v$ )ga aylanadi, va qolgan qismi o'tkazgich qizishiga sabab bo'luvchi elektr quvvat isrollari ( $I^2 r$ )ga sarflanadi. Demak, magnit maydoniga joylashtirilgan tokli o'tkazgichni elementar elektr motori deb qarash mumkin ekan.

Ko'rilgan hodisalar quyidagi xulosalarni chiqarishga imkon beradi:

a) ixtiyoriy elektr mashinasi uchun bir biriga nisbatan o'zaro harakatda bo'lishi mumkin bo'lgan tok o'tkazish muhiti (o'tkazgichlar) va magnit maydoni mavjuddir;

b) elektr mashinasi generator rejimida ishlaganda ham, elektr motori rejimida ishlaganda ham, magnit maydoni kesib o'tayotgan tokli o'tkazgichda, bir vaqtning o'zida EYUK induktivlanishi va o'tkazgichga ta'sir etuvchi kuch hosil bo'lishi kuzatiladi;

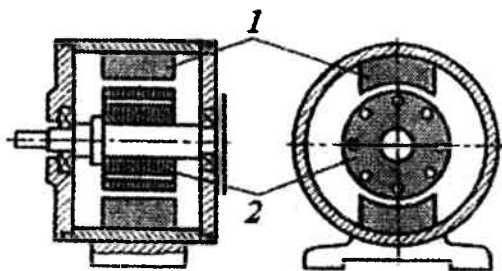
c) elektr mashinasida mexanik va elektr energiyalarining o'zaro o'zgartirilishi ixtiyoriy yo'nalishda kechishi mumkin, ya'ni bir elektr mashina elektr motor rejimida ham, generator rejimida ham ishlashi mumkin; elektr mashinalarining bunday xususiyati qaytuvchanlik deb ataladi. Elektr mashinalarining qaytuvchanlik prinsipi birinchi bo'lib E.X.Lens tomonidan aniqlandi.

O'rganilgan «soddalashtirilgan» elektr generatori va motori faqat elektr tokining asosiy qonun va hodisalaridan ularda foydalanish prinsiplarini ko'rsatadi. Ularning konstruktiv bajarilish masalalariga kelganimizda, shuni ta'kidlash zarurki, ko'pgina elektr mashinalarida harakatlanuvchi qismlar aylanma harakat prinsipiga asoslanganligini ko'ramiz.

Elektr mashinalari konstruksiyalarining ko'plab turlari mavjudligiga qaramay, ularni biror umumlashtirilgan konstruksiya bilan almashtirish mumkin. Bunday konstruksiya (K.3-rasm) ikki qismdan iborat bo'lib, biri qo'zg'almas qism 1 – stator, ikkinchisi, aylanuvchi qism 2– rotor deyiladi.

Rotor stator magnit o'zagining ichki silindrik bo'shlig'ida joylashtirilib, ular orasida havo oralig'i mavjud bo'ladi. Ushbu ikki elementlardan biri mashinada magnit maydon qo'zg'atish uchun

qo'zg'atuvchi element (masalan, elektromagnit yoki o'zgarmas magnit) bilan jihozlangan, ikkinchisida esa, shartli ravishda ishchi chulg'am deb nomlangan, chulg'am bilan joylashgan. Mashinaning qo'zg'almas qismi (stator) ham, aylanuvchi qismi (rotor) ham, magnit qarshiligi juda kichik bo'lgan magnit-yumshoq materialdan yasalgan magnit o'zaklari mavjud.



**K.3-rasm.** Elektr mashinasining konstruktiv umumlashtirilgan sxemasi

Agar elektr mashina generator rejimida ishlasa, (aylantiruvchi motor yordamida) rotor aylanganda ishchi chulg'am o'tkazgichlarida EYUK induktivlanadi va iste'molchiga ulanganda unda tok hosil bo'ladi. Bunda aylantiruvchi motorning mexanik energiyasi elektr energiyasiga o'zgartiriladi. Agar mashina elektr motori sifatida ishlash uchun mo'ljallangan bo'lsa, u holda uning ishchi chulg'ami tarmoqqa ulanadi. Bunda, chulg'am o'tkazgichlarida hosil bo'lgan tok magnit maydoni bilan o'zaro ta'sir etib, rotorning aylanishiga olib keluvchi elektromagnit kuchlarini hosil qiladi. Motorning tarmoqdan iste'mol qilayotgan elektr energiyasi, biror ishchi mexanizm (stanok, lift va h.k.)ni aylantirish uchun sarflanayotgan mexanik energiyasiga aylantiriladi.

Elektr mashinalarining shunday konstruksiyalari ham mavjudki, ularda ishchi chulg'am statorda, magnit oqimni qo'zg'atuvchi (hosil qiluvchi) elementlari rotorda joylashgan bo'ladi. Bu bilan mashina ishlash prinsipi o'zgarmay, ilgarigidek qoladi.

Elektr mashinalarining quvvat diapazonlari keng bo'lib, vattning bir necha ulushidan boshlab, yuz minglab kilovattgachadir.

### K.3 Elektr mashinalari klassifikatsiyasi

Elektr mashinalarining generator va motor rejimlarida ishlatilishi ularning asosiy qo'llanishidir, chunki elektr va mexanik energiyalarining o'zgartirilishi bilan bog'liqdir. Elektr mashinalarining turli texnika va texnologiyalarda qo'llanishidan boshqa maqsadlar ko'zlanishi ham mumkin. Masalan, elektr energiyasini iste'mol qilish aksariyat o'zgaruvchan tokni o'zgarmas tokka aylantirish yoki chastotani o'zgartirish bilan bog'liq bo'ladi. Elektr mashinalari elektr signallarining quvvatini oshirish uchun ham ishlatiladi. Bunday mashinalari "elektr mashina kuchaytirgichlari" deb nomlanadi. Elektr energiya iste'molchilarining quvvat koeffitsiyentini oshirish uchun qo'llaniladigan elektr mashinalari sinxron kompensatorlar deb ataladi. O'zgaruvchan tokning kuchlanishini rostdash uchun xizmat qiluvchi elektr mashinalari induksion regulyatorlar deyiladi.

Avtomatika va hisoblash texnikasida qo'llaniluvchi mikro-mashinalar turli xillari mavjud. Bunda elektr mashinalari na faqat motor sifatida, balki taxogenerator (aylanish tezligini o'lchash uchun, ya'ni aylanish tezligiga proporsional bo'lgan elektr signalini olish), selsinlar, aylanuvchi transformatorlar (val burillish burchagiga proporsional bo'lgan elektr signalini olish) va h.k. siqatida ishlatiladi.

Keltirilgan misollardan ko'rinadiki, elektr mashinalarining vazifalariga ko'ra ularning turlari har xil ekan.

Elektr mashinalari ishlash prinsipiga ko'ra o'zgaruvchan tok va o'zgarmas tok mashinalariga bo'linadilar. O'zgaruvchan tok mashinalari asinxron va sinxron mashinalarga bo'linadilar. Asinxron mashinalar aksariyat motor rejimida ishlatilsa, sinxron mashinalar ko'proq generator rejimida ishlatiladi. Biroq, tog'-kon sanoati, gidrotexnik qurilmalarda katta quvvatli tegirmon, maydalagichlar, nasoslar va boshqa jihozlarda sinxron motorlari o'z o'rnini topgandir. O'zgarmas tok mashinalari motor va generator rejimlarida ishlatilmoqda.

Bir xil ishlash prinsipiga ega bo'lgan elektr mashinalari bir biridan sxemalarining ulanishi yoki mashina ekspluatatsiya xossalariga ta'sir etuvchi boshqa xususiyatlari bilan ajralishi mumkin. Masalan, asinxron va sinxron mashinalari uch fazali (uz fazali tarmoqqa ulangan), kondensatorli yoki bir fazali bo'lishi mumkin. Asinxron

mashinalari rotor chulgʻamining tuzilishiga koʻra qisqa tutashgan rotorli va faza rotorli boʻlishi mumkin. Sinxron mashinalari va oʻzgarmas tok mashinalari qoʻzgʻatish magnit maydonini hosil qilish usuliga koʻra ikki turga – qoʻzgʻatish chulgʻamli va oʻzgarmas magnitli mashinalarga boʻlinadi.

Ushbu darslikda, elektr mashinalarini tushuntirishga qaratilgan boshqa barcha adabiyotlardagi kabi, elektr mashinalaridan tashqari transformatorlarni ham oʻrganishga qaratilgan maʼlumotlar keltiriladi. Transformatorlar oʻzgaruvchan tokli statik elektromagnit apparatdir. Biror aylanuvchi qismi boʻlmasligi, transformatorga elektr mashinalaridan prinsipial ravishda farqlanuvchi oʻzgacha konstruksiya bagʻishlaydi. Biroq, transformatorning ishlash prinsipi ham, elektr mashinalarining ishlash prinsipi ham elektromagnit induksiyasi hodisasiga asoslangan boʻlib, transformatorlar nazariyasining birqancha qismlari oʻzgaruvchan elektr mashinalarining nazariy asoslarini tashkil etadi.

Elektr mashinalari va transformatorlar – har qanday energetik tizimning yoki elektr qurilmasining asosiy elementlaridir. Shuning uchun elektr mashinalarini ekspluatatsiya qiluvchi personal, ayniqsa, togʻ-kon sanoati xodimlari, elektr mashinalari va transformatorlar elektromagnit, mexanik va qizish jarayonlari nazariy va fizik asoslarini bilishlari zarur.

## I QISM

### TRANSFORMATORLAR

Transformatorlar elektr energiyani uzatish va taqsimlash tizimlarida keng qo'llaniladi. Ma'lumki, elektr energiyani uzoq masofalarga etkazishda elektr uzatish liniya (EUL)larida Joule quvvat isroflarini kamaytirish maqsadida yuqori kuchlanishlar (500 kVgacha)dan foydalaniladi. Bunday yuqori kuchlanishni generator-dan olish imkoni yo'qdir, shu sababli elektr energiyasi generatorning chiqish klemmalaridan kuchaytiruvchi transformator klemmalariga ulanadi. Unda kuchlanish talab etilgan miqdorgacha kuchaytiriladi. EUL qanchalar uzun va quvvati qanchalar yuqori bo'lsa, bu kuchlanish shunchalar katta bo'lishi zarur. Masalan, quvvati 2000 MVt bo'lgan elektr energiyasini 500 km masofaga uzatilganda kuchlanish qiymatini 500 kV gacha ko'tarish zarur.

Elektr energiyaning iste'molchilari orasida taqsimlash uchun nimstansiyalarda pasaytiruvchi transformatorlar kuchlanishlari 110, 35, 10, 6,3 kV gacha va transformator punktlarida 220, 380 yoki 660 V gacha pasaytiriladi. Elektr energiyasi shunday kuchlanishlarda bevosita iste'molchilarga – korxonalarining ish joylariga va aholi turar joylariga uzatiladi.

Shunday qilib, o'zgaruvchan tokli elektr energiya ishlab chiqaruvchi elektr stansiyalaridan iste'molchigacha yetkazilishida uch, ba'zan to'rt yoki besh marta transformatsiyalanadi.

Transformatorlar asosiy qo'llanishidan tashqari, har xil elektr qurilmalarida (isitish, payvandlash va h.k.), avtomatika qurilmalarida ishlatiladi.

## 1-bob. TRANSFORMATORLAR HAQIDA UMUMIY TUSHUNCHALAR

### 1.1. Transformatorning hayotdagi o'rni va qo'llanish sohalari

*Transformator deb, ikki (yoki undan ko'p) induktiv bog'langan chulg'amlari mavjud bo'lgan, elektromagnit induksiyasi hodisasi asosida bir (birlamchi) o'zgaruvchan tok tizimini ikkinchi (ikkilamchi) o'zgaruvchan tok tizimiga o'zgartiruvchi statik elektromagnit apparatga aytiladi.*

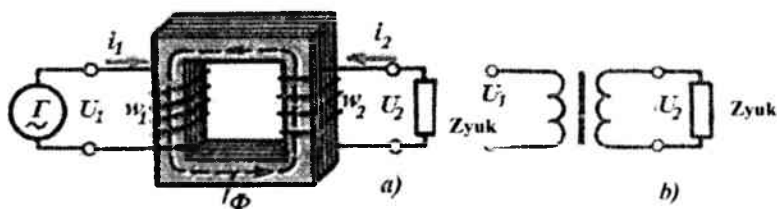
Umumiy holda, ikkilamchi o'zgaruvchan tok tizimi birlamchi tizimdan ixtiyoriy parametrlari (kuchlanish, tok qiymatlari, fazalar soni, tok va kuchlanishning vaqtga bog'liqlik egri chizig'i shakli, chastota) bilan farqlanishi mumkin. Elektrotexnik qurilmalar hamda elektr energiya uzatish va taqsimlash tizimlarida o'zgaruvchan kuchlanish va tok qiymatlari o'zgartiruvchi kuchli transformatorlar ko'plab qo'llaniladi. Bunda fazalar soni, kuchlanish (tok) egri chizig'i shakli va chastotasi o'zgarmas bo'ladi.

Vazifasiga ko'ra transformatorlar umumiy qo'llanuvchi kuchli transformatorlar va maxsus qo'llanuvchi transformatorlarga bo'linadi. Umumiy qo'llanuvchi kuchli transformatorlar EUL va elektr energiyasini taqsimlashda, hamda har turdagi elektrotexnik qurilmalarda zarur bo'lgan kuchlanishni olish uchun qo'llaniladi. Maxsus qo'llanuvchi transformatorlar ishchi xossalari va konstruktiv bajarilishi bo'yicha turli xarakterlari bilan farqlanadilar. Bunday transformatorlarga o'choq va payvandlash transformatorlari, avtomatik tizimlar transformatorlari (pik-, impuls transformatorlari, chastota kuchaytirgichlari va h.k.), sinov va o'lchov transformatorlari kiradi.

Ushbu darslikda umumiy qo'llanuvchi kuchli transformatorlar o'rganiladi.

## 1.2. Transformatorning ishlash prinsipi

Soddalashtirilgan kuchli transformator ferromagnit materialdan ishlangan (odatda tunikasimon elektrotexnik po'lat) magnit o'zak va magnit o'zakning sterjenlariga joylashgan ikki chulg'amdanda (1.1, a - rasm) iborat. Chulg'amlardan biri birlamchi chulg'am deb nomlanib, o'zgaruvchan tok manbai kuchlanishi  $U_1$  bo'lgan G ga ulanadi. Ikkilamchi deb nomlangan chulg'amga iste'molchi  $Z_H$  ulanadi; aksariyat uni transformator yuki (yuklanishi) deyiladi. Birlamchi va ikkilamchi chulg'amlar o'zaro galvanik (elektrik) bog'lanmagan bo'lib, bir chulg'amdanda ikkinchi chulg'amga elektromagnit usulda uzatiladi. Bu chulg'amlar joylashgan magnit o'zaklar (magnit o'tkazgichlar)  $\Phi$  magnit oqimni va chulg'amlar orasidagi induktiv bog'lanishni kuchaytirish uchun xizmat qiladi.



1.1-rasm. Transformatorning elektromagnit (a) va prinsipial (b) sxemalari

Transformatorning ishlashi elektromagnit induksiya hodisasiga asoslangan. Birlamchi chulg'amni o'zgaruvchan tok manbaiga ulagan-da ushbu chulg'am o'ramlarida o'zgaruvchan tok  $i_1$  oqadi, u magnit o'zakda o'zgaruvchan  $F$  magnit oqimni hosil qiladi.

Bu magnit oqim magnit o'zakda berk kontur hosil qilib, transformatorning ikkala (birlamchi va ikkilamchi) chulg'amlarini kesib o'tadi va ularda EYUK induktivlaydi. Birlamchi chulg'amda o'zinduksiya EYUK

$$e_1 = -w_1(d\Phi/dt), \quad (1.1)$$

ikkilamchi chulg'amda o'zaro induksiya EYUK



$$e_2 = -w_2(d\Phi / dt), \quad (1.2)$$

bunda  $w_1$  va  $w_2$  – transformatorning birlamchi va ikkilamchi chulg‘amlari o‘ramlari soni.

Transformator ikkilamchi chulg‘amning chiqish klemmalari  $Z_{II}$  yuklanishga ulanganda  $e_2$  EYUK ta’sirida bu chulg‘am zanjirida  $i_2$  tok oqadi va  $U_2$  kuchlanish o‘rnatiladi. Kuchaytiruvchi transformatorlarda  $U_2 > U_1$ , pasaytiruvchi transformatorlarda esa  $U_2 < U_1$ .

Ifodalar (1.1) i (1.2) dan shuni ko‘rish mumkinki, transformator chulg‘amlarida induktivlanayotgan  $e_1$  va  $e_2$  EYUKlar bir biridan faqat chulg‘amlar o‘ramlari sonlari  $w_1$  va  $w_2$  farqi bilan ajralib turadi. Shuning uchun chulg‘amlarning o‘ramlari sonining zaruriy qiymatlarini tanlash bilan, birlamchi va ikkilamchi chulg‘amlar kuchlanishlarining ixtiyoriy qiymatlarini qabul qilish mumkin.

Kuchlanishi yuqoriroq bo‘lgan tarmoqqa ulangan chulg‘am yuqori kuchlanish (YUK) chulg‘ami deyiladi; kuchlanishi quyi bo‘lgan tarmoqqa ulangan chulg‘am quyi kuchlanish (QK) chulg‘ami deyiladi.

Bir fazali transformatorning prinsipial elektr sxemasi 1.1.6-rasmda keltirilgan.

Transformatorlar qaytuvchanlik xususiyatiga ega, bir transformatorning o‘zini kuchaytiruvchi va pasaytiruvchi transformator sifatida ishlatish mumkin. Lekin, aksariyat transformator bir qo‘llanishda - yoki kuchaytiruvchi, yoki pasaytiruvchi bo‘lishi mumkin.

Transformator – o‘zgaruvchan tok apparatidir. Agar uning birlamchi chulg‘amini o‘zgarmas tok manbaiga ulansa, u holda transformator magnit o‘zagidagi magnit oqimi ham qiymati va yo‘nalishi bo‘yicha o‘zgarmas bo‘ladi ( $d\Phi/dt = 0$ ), shu sababli transformator chulg‘amlarida EYUK induktivlanmaydi, demak elektr energiya birlamchi zanjirdan ikkilamchi zanjirga uzatilmaydi.

Transformatorlar quyidagi omillariga ko‘ra bir necha turlarga ajratiladi:

a) vazifasiga ko‘ra: umumiy qo‘llanuvchi kuchli va maxsus transformatorlar;

b) sovitilish turiga ko'ra: havo (quruq) transformatorlar va moyli transformatorlar;

d) transformatsiyalanuvchi fazalar soniga ko'ra: bir fazali, uch fazali va ko'p fazali;

e) magnit o'zakning shakliga ko'ra: sterjenli, zirxli; zirx-sterjenli; torroid shaklida;

f) fazadagi chulg'amlar soniga ko'ra: ikki chulg'amli; ko'p chulg'amli.

### 1.3. Transformatorning tuzilishi

Transformator quyidagi konstruktiv elementlardan tuzilgan: magnit o'zak, chulg'amlar, kirish klemmalari, bak va boshqa izolyasiyalovchi, maxkamlash, himoyalash elementlari va b.

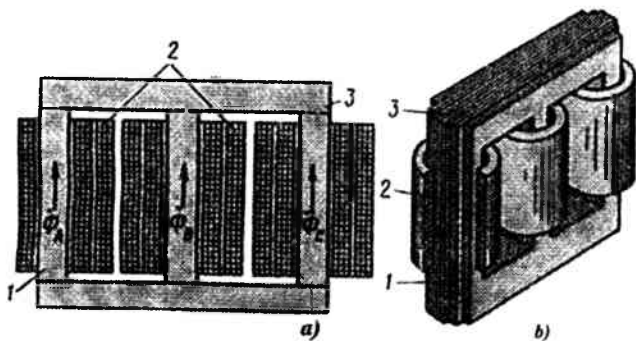
Magnit o'zak va unga o'rnatilgan chulg'amlari birgalikda transformatorning aktiv qismini tashkil etadi. Transformatorning qolgan elementlari transformatorning passiv (yordamchi) qismi deyiladi. Transformator tuzilishining asosiy qismini batafsil ko'raylik.

**Magnit o'zak. Transformator**dagi magnit o'zak ikki vazifani bajaradi: a) transformator asosiy magnit maydonining berk konturini hosil qiladi va uni kuchaytiradi; b) chulg'amlar, chulg'am ulamalari va ulagichlarini mahkamlaydigan asos.

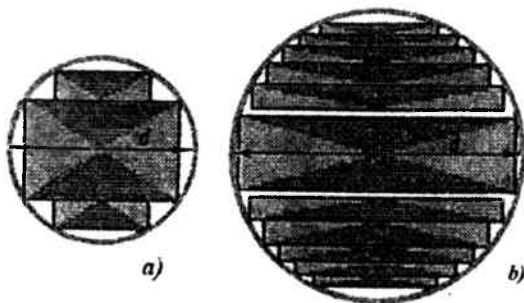
Magnit o'zak shixtovka (tunukachalar ustma-ust qo'yilib presslanadi) qilingan konstruksiyaga ega bo'lib, ikki tomoni izolyasiyalovchi plyonkali (maslan lak) yupqa (aksariyat qalinligi 0,5 mm) po'lat plastinalardan iborat. Magnit o'zakning bunday tuzilishi unda o'zgaruvchan magnit oqimi hosil qiladigan uyurma toklarini kamaytirish uchun, demak, transformatorda quvvat isroflarini kamaytirishga qaratilgan. Kuchli transformatorlar magnit o'zaklari uch turda bajariladi: sterjenli, zirxlangan, zirx-sterjenli.

Sterjen turdagi magnit o'zakda (1.2,a-rasm) vertikal sterjen 1 va ularga o'rnatilgan chulg'amlar 2 bo'lib, yuqori va quyi qismlarida yarmolar 3 bilan berk kontur hosil qiladi. Har bir sterjenda mos fazalarning chulg'amlari joylashtirilgan bo'lib shu faza magnit oqimi oqadi: chekka sterjenlarda –  $\Phi_A$  va  $\Phi_C$  faza magnit oqimlari, o'rtadagi sterjenda  $\Phi_B$  magnit oqimi oqadi. Yuqoridagi 1.2,b-rasmda magnit

*o'zakning tashqi ko'rinishi* keltirilgan. Sterjenlarning kesim yuzasi zinasimon bo'lib,  $d$  diametrli aylana ichiga kirgan (1.3-rasm).



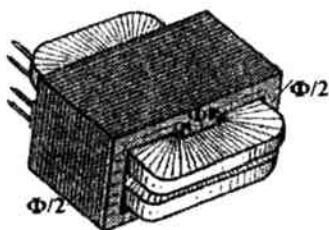
**1.2-rasm.** Sterjenli magnet o'zagi va chulg'amlari kesib ko'rsatilgan uch fazali transformator



**1.3-rasm.** Sterjenlar kesim yuzasi shakli *a)* kichik va o'rta quvvatli transformator *b)* katta quvvatli transformator

Katta quvvatli transformator magnet o'zagi sterjenlari kesim yuzasi ko'p pog'onali bo'ladi va chulg'am ichidagi aylana yuzasini foydali ishlatilishini ta'minlaydi. Issiqlikni yaxshi o'tkazishi uchun, ba'zan alohida sterjen paketlari orasida kengligi 5- 6 mm bo'lgan havo oralig'i qoldiriladi. Ular ventilyatsiya kanallari sifatida ishlatiladi.

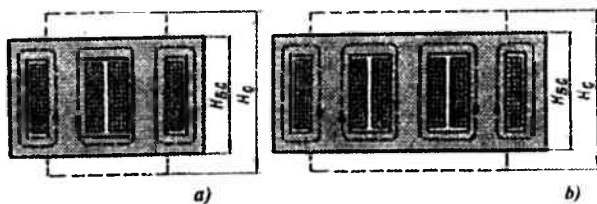
Zirhlangan turdagi magnit o'zak sterjen va yarmosi bo'lgan konstruksiyaning yoyilgan shakli bo'lib, chulg'amni qisman «qoplab» (zirhlab) berkitgan (1.4-rasm) bo'ladi.



**1.4-rasm.** Zirhlangan magnit o'zakli bir fazali transformator.  
Tashqi ko'rinish.

Zirhlangan turdagi magnit o'zak sterjenidagi magnit oqimi  $F$  yarimodagi magnit oqimlaridan ikki marta katta, ularning har birining kesim yuzasi sterjen kesim yuzasidan ikki marta kichik bo'ladi. Zirhlangan turdagi magnit o'zak ishlab chiqarish texnologiyasi murakkab bo'lganligi sababli keng qo'llanish imkoni bo'lmaydi. Ular faqat kichik quvvatli kuchli transformatorlarda ishlatiladi.

Katta quvvatli transformatorlarda magnit o'zakning zirh-sterjenli konstruksiyasi ishlatiladi (1.5-rasm). Ularda elektrotexnik po'lat sarfi biroz ko'proq bo'lsada, magnit o'zak balandligini kamaytirish ( $H_{bc} < H_c$ ), demak, transformatorning balandligi kamayishiga imkon beradi. Bu ko'rsatkich transformatorlarni temir yo'ldagi tashishda muhim ahamiyatlidir.



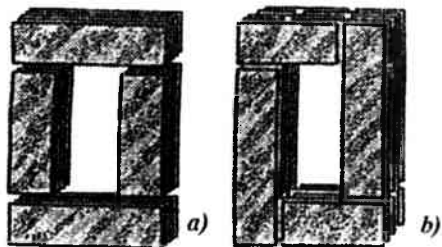
**1.5-rasm.** Zirh-sterjenli magnit o'zagi bo'lgan transformator:  
a) bir fazali; b) uch fazali

Sterjen va yarmoning ulanish uslubiga ko'ra sterjenli magnit o'zaklar tutash va shixtovkali konstruksiyalarga bo'linadi (1.6-rasm).

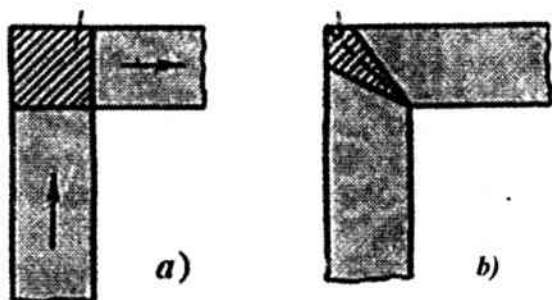
Tutash konstruksiyali (1.6,*a*-rasm) magnit o'zakning sterjen va yarmolari alohida yig'iladi, sterjenga chulg'am kiygiziladi, so'ngra yuqori va quyi yarmolar sterjenga keltiriladi. Ikki yarmo o'rnatilgandan so'ng konstruksiya presslanadi va tortuvchi vertikal shpilkalar bilan mahkamlanadi. Tutash konstruksiyali magnit o'zak yig'ish jarayonini osonlashtirsa ham, biroq kuchli transformatorlarda keng qo'llanilmaydi. Chunki tortuvchi qurilmalar qo'pol, tutash yuzalardagi magnit qarshilikni kamaytirish zarurati bilan shu yuzalarni mexanik ishlov berish kerak bo'ladi.

Kuchli transformator magnit o'zagining shixtovka qilingan konstruksiyasi 1.6,*b*-rasmda keltirilgan. Bunda sterjen va yarmo plastinalari qatlamlab galma-galdan qo'yiladi va bir qatlam tutashmasini ikkinchi qatlam berkitadi. Aksariyat, qatlamlar 2-3 plastinani tashkil etadi. Hozirgi vaqtda kuchli transformatorlar magnit o'zaklari jo'valash yo'nalishi bo'ylab magnit xususiyatlari, shu yo'nalishiga perpendikulyar bo'lgandagi magnit xususiyatlaridan ancha yuqori bo'lgan sovuq jo'valangan elektrotexnik po'latdan yasalmoqda.

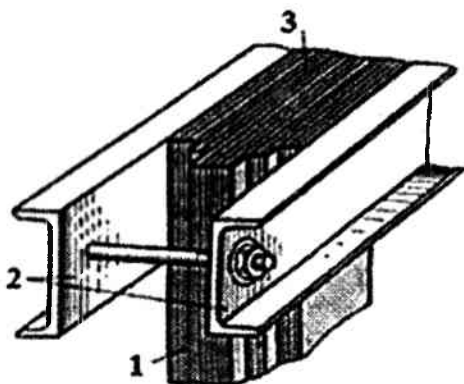
Shu sababli shixtovkalanagan konstruksiyada listlar  $90^\circ$  ga burilish joyida magnit oqimning jo'valash yo'nalishi bilan «mos bo'lmagan zonalar» paydo bo'ladi. Bu yerlarda magnit qarshilikning va magnit isroflarning ortishi kuzatiladi. Ushbu hodisani kamaytirish maqsadida shixtovka uchun plastinalarning to'g'ri tutash (1.7,*a*-rasm) o'rni egri tutash (1.7,*b*-rasm) qabul qilinadi. Bu usulda «mos bo'lmagan zona» ancha kichik bo'ladi.



1.6-rasm. Magnit o'zakning tutash (*a*) va shixtovkali (*b*) konstruksiyalari



1.7-rasm. To'g'ri (a) va egri (b) tutashli mos bo'lmagan zona



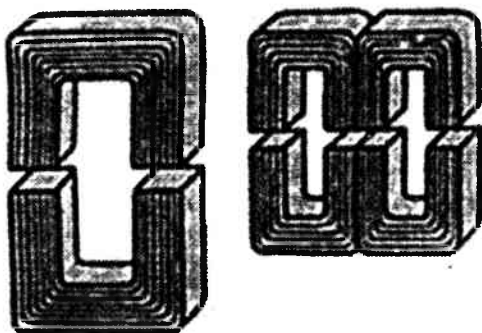
1.8-rasm. Yarmoning presslanishi

Shixtovka qilingan konstruksiyali magnet o'zak kamchiligi uning yig'ilishidagi biroz murakkablikdir. Chunki chulg'amni sterjenga kiygizishda yuqori yarmoning shixtovkasini buzishga, so'ngra yana shixtovka qilishga to'g'ri keladi.

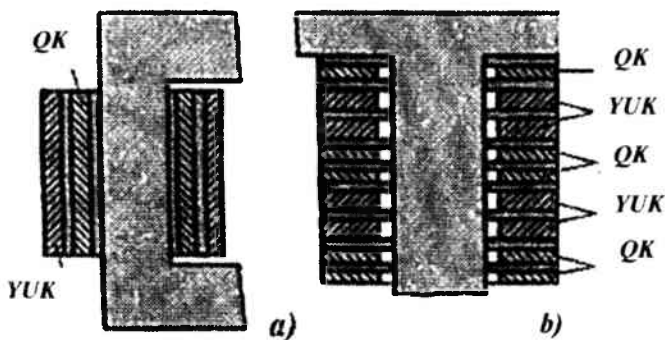
Magnet o'zak 1 ni mahkamlashda yarmon to'simlari 2 dan foydalaniladi. Chekka sterjenlardan chiqib qolgan joylarida (1.8-rasm) shpilkalar bilan tortiladi.

Transformator ishiash rejimida metal qismlari orasida potentsiallar farqi bo'lsa, shu qismlarni ajratib turgan izolyatsiyalangan oraliqlarda izolyatsiya teshilishi mumkin. Potentsiallar farqi bo'lmasligi uchun

magnit o'zak va uni mahkamlovchi detallar albatta zaminlanishi lozim. Zaminlash mis lentalar bilan bajarilib, uning bir uchi magnit o'zak po'lat plastinalari orasiga, ikkinchi uchi esa yarmo to'siniga mahkamlanadi.



1.9-rasm. Lentali qirqilgan magnit o'zak



1.10-rasm. Transformatorning konsentrik (a) va disk (b) chulg'amlari

Kichik quvvatli transformatorlar (aksariyat quvvati 1 kV·A dan oshmagan) magnit o'zaklari sovuq jo'valangan elektrotexnik po'lat lenta o'rash yo'li bilan yasaladi. Bunday magnit o'zak o'ramlari

qirqilib (1.9-rasm), unga chulg'am kiygizilgandan so'ng tutashtirib yig'iladi va maxsus qisqich (xomut) yordamida tortib mahkamlanadi.

**Chulg'amlar.** O'rta va katta quvvatli transformator chulg'amlari dumaloq yoki to'rtburchak kesim yuzasi bo'lgan izolyatsiyalangan chulg'am simlaridan o'raladi. Chulg'amning asosi sifatida ko'pgina holatlarda qog'oz-bakelit silindr xizmat qiladi va unga chulg'amning mexanik va elektrik mustahkamligini ta'minlaydigan elementlar (reykalar, burchakli shaybalar va h.k.) mahkamlanadi.

Chulg'amning sterjenda o'zaro joylashishiga qarab, ular konsentrik va almashinuvchi chulg'amlarga bo'linadi. Konsentrik chulg'amlar sterjenda konsentrik joylashgan silindrlar shaklida bajariladi: sterjenga yaqin aksariyat quyi kuchlanish (QK) chulg'ami (sterjendan kam izolyatsiyalanish talab etadi) joylashadi, tashqi tomondan yuqori kuchlanish (YUK) chulg'ami joylashtiriladi (1.10,a-rasm).

Almashinuvchi (disksimon) chulg'amlar QK va YUK alohida seksiyalar (disklar) shaklida bajariladi va sterjenda almashinish tartibida joylashtiriladi (1.10,b-rasm). Almashinuvchi chulg'amlar bu'zi maxsus transformatorlarda ishlatiladi.

Konsentrik chulg'amlar konstruktiv jihatdan birnecha turlarga bo'linadi. Ulardan bir nechtasini ko'raylik.

1. Bir qatlamli yoki ikki qatlamli silindrik chulg'amlar kesim yuzasi to'rtburchakli bo'lgan simlardan yasaladi (1.11, a-rasm) va asosan nominal toki 800 A bo'lgan QK chulg'amlarida ishlatiladi.

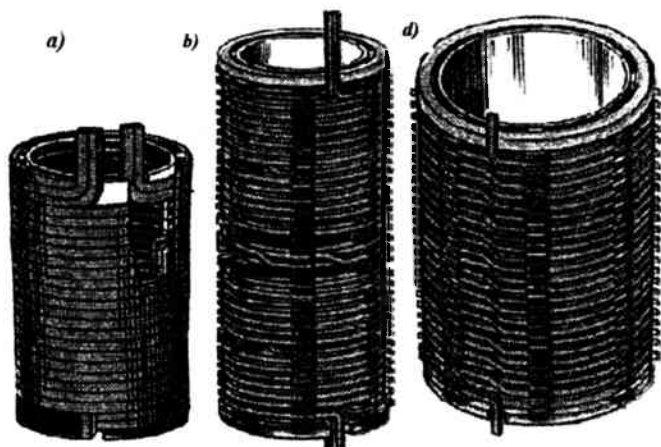
2. Bir- va ikki qatlamli vintsimon chulg'amlar kesim yuzasi to'rtburchakli bo'lgan birnecha parallel simlardan yasaladi. Bunda bu o'ramlar bir yoki ikki qadamli (1.11,b-rasm) vintsimon liniyalar bo'ylab o'raladi. Barcha parallel simlar tok bilan bir xil yuklanishini ta'minlash uchun bu simlarni transpozitsiyalab o'raladi. Transpozitsiyada bir o'ram davomiyligida har bir o'tkazgich barcha pozitsiyalarni egallagan bo'lishi ta'minlanadi.

3. Transpozitsiya guruhli bo'lishi mumkin, bunda parallel o'tkazgichlar ikki guruhga bo'linib, pozitsiya o'zgartirishlari guruhli (1.11, a-rasm) bajariladi, hamda umumiy bo'lishi mumkin, bunda barcha parallel o'tkazgichlar o'zaro joy almashinadi (1.12,b-rasm).

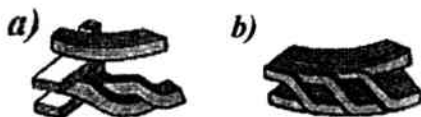
4. Uzluksiz chulg'amlar (1.11,v-rasm) alohida disk chulg'amlar (seksiyalar)dan iborat bo'lib, spiral bo'yicha o'raladi. Agar chulg'am birnecha parallel o'tkazgichlardan o'ralsa, u holda o'tkazgichlarning



transpozitsiyasi bajariladi. Uzlüksiz chulg'amlar, ularni ishlab chiqarish texnologiyasi biroz murakkab bo'lishiga qaramay, kuchli transformatorlarda YUK chulg'amlarida ham, QK chulg'amlari sifatida ham keng qo'llaniladi. Bu ularning katta mexanik mustahkamligi mavjudligi bilan tushuntiriladi.



**1.11-rasm.** Konsentrik chulg'am konstruksiyasi



**1.12-rasm.** Vintsimon chulg'am guruhli (a) va parallel (b) transpozitsiyasi

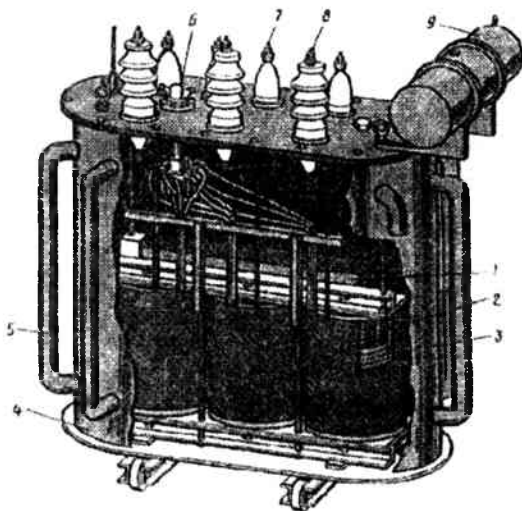
Moy bilan sovutiladigan transformatorlarda magnit o'zak chulg'ami bilan bakka solinadi va moy bilan to'ldiriladi (1.13-rasm).

Transformator moyining oqimi natijasida 2 va 3 chulg'amlar va 7 magnit o'zakni yuvib o'tadi, moy havoga nisbatan yuqori issiqlik o'tkazuvchanligiga ega bo'lganligi sababli, ulardan issiqlikni o'ziga olib, so'ngra bak 4 devorlari va 5 radiator naylari orqali tashqi muhitga uzatadi. Transformator moyining mavjudligi yuqori kuchlanishli transformator ishining ishonchligini oshiradi, chunki

moyning elektr mustahkamligi havonikidan anchaga yuqoridir. Moy bilan sovutish, havo bilan sovutishdan jadalroq, shu sababli moy transformatorlarining gabariti va og'irligi shunday quvvatga ega bo'lgan quruq transformatorlamikidan ancha kichikdir.

Quvvati 20-30 kV·A gacha bo'lgan transformatorlar baki yassi devorli bo'ladi. Quvvati kattaroq transformatorlar baki devori sovutish yuzasini oshirish uchun bak devori qovurg'ali qilinadi yoki naysimon (trubkasimon) baklar qo'llaniladi. Moy qizishi bilan yuqori ko'tariladi, soviganda esa pastga tushadi. Bunda moy naychalar ichida aylanadi (sirkulyatsiyalanadi), natijada uning tez sovishi ta'minlanadi.

Harorat o'zgariganda moy hajrining o'zgarishini kompensatsiya qilish uchun, hamda moy havo bilan kontakti natijasida moyning oksidlanishi va namlanishidan himoya qilish uchun bak ustida silindrik shaklda va bak bilan tutash bo'lgan kengayish idishi 9 ishlatiladi. Moy harorati o'zgarishida moyning sathi o'zgarishi moy to'la bakda bo'lmasdan, atmosfera bilan tutash bo'lgan kengayish idishida bo'ladi.



**1.13-rasm.** Moy bilan sovutiladigan transformator tuzilishi

Transformator ishlash jarayonida moy tarkibidan jadal ravishda gazlarning ajralib chiqish ehtimoli doimo mavjuddir. Bu esa bak ichidagi bosimning ortishiga olib keladi. Shu sababli, bak shikastlanishining oldini olish quvvati 1000 kV·A va undan katta bo'lgan transformatorlar bakning ustida chiqarib yuborish trubasi joylashtiriladi. Trubaning quyi uchi bak bilan ulanadi, yuqorigi uchi shisha disk mahkamlangan flyanets shaklida bo'ladi. Moy bosimi bak uchun xavfsiz bo'lgan bosimdan yuqori bo'lganda, shisha disk sinadi va gaz tashqi muhitga chiqariladi.

Moy transformatorining baki kengayish idishi bilan ulaydigan truba ichida gaz relesi joylashadi. Transformatorida yetairli darajada buzilish sodir bo'lib (masalan, o'ramlar orasida qisqa tutashuv) jadal gaz ajralib chiqishida, gaz rele ishga tushadi, o'chirishni boshqarish zanjiridagi kontakti ulaydi, u o'z navbatida transformatorni tarmoqdan uzadi. Transformator chulg'amlari tashqi zanjir bilan 7 va 8 kiritgichlar yordamida ulanadi. Moy transformatorlarida kiritgichlar uchun chinni izolyatorlar ishlatiladi. Bakning tubiga aravacha o'rnatilgan bo'lib, transformatorni nimstansiya hududida harakatlantirish imkoniyatini beradi. Bakning qopqog'ida kuchlanish ulagichining tutgichi 6 joylashgan.

Transformatorning xususiyatlari uning nominal parametrlari bilan aniqlanadi:

- 1) Birlamchi nominal liniya kuchlamishi ( $U_{1nom}$ , yoki kV);
- 2) Ikkilamchi nominal liniya kuchlanishi ( $U_{2nom}$ , yoki kV);
- 3) Birlamchi nominal liniya toki ( $I_{1nom}$ , A yoki kA yoki mA);
- 4) Ikkilamchi nominal liniya toki ( $I_{2nom}$ , A yoki kA yoki mA);

5) Nominal to'la quvvat  $S_{1nom}$ , kV·A (bir fazali transformatori

uchun  $S_{1nom} = U_{1nom} \cdot I_{1nom}$ , uch fazali transformator uchun

$$S_{1nom} = \sqrt{3}(U_{1nom} \cdot I_{1nom});$$

Nominal liniya toklari transformator nominal quvvati orqali hisoblanishi mumkin; uch fazali transformtor uchun

$$I_{1nom} = \frac{S_{nom} \cdot 10^3}{\sqrt{3}U_{1nom}}; I_{2nom} = \frac{S_{nom} \cdot 10^3}{\sqrt{3}U_{2nom}},$$

bunda  $Sh_{OM}$ - transformtor nominal quvvati, kV·A.

Har bir transformator Gers bilan o'lganuvchi ma'lum chastotali tarmoqqa ulanish uchun hisoblangan. Evropa va Osiyo davlatlari umum mo'ljall transformatorlari  $f = 50$  Hz chastotaga (Amerika qit'asida  $f = 60$  Hz), avtomatika va alaq uskunlari chastotasi 50, 400 yoki 1000 Hz.

**Misol 1.1.** Bir fazali transformatorning birlamchi va ikkilamchi chulg'amlari nominal kuchlanishlari qiymatlari quyidagilarga teng:

$U_{1nom} = 110$  kV,  $U_{2nom} = 6,3$  kV, birlamchi chulg'am nominal toki  $I_{1nom} = 95,5$  A. Transformatorning nominal quvvati  $S_{nom}$  va ikkilamchi chulg'am nominal toki  $I_{2nom}$  ni aniqlang.

**Yechish.** Transformatorning nominal quvvati quyidagiga teng  $S_{nom} = U_{1nom} \cdot I_{1nom} = 110 \cdot 95,5 = 10\,500$  kV·A. Ikkilamchi chulg'am nominal toki quyidagiga teng  $I_{2nom} = S_{2nom} / U_{2nom} = 10\,500 / 6,3 = 1666$  A.

#### 1.4 Transformatorning kuchlanish tenglamalari

Transformator magnit o'zagining asosiy o'zgaruvchisi F magnit oqimi, birlamchi va ikkilamchi chulg'amlar o'ramlari  $w_1$  va  $w_2$  bilan ilashib (1.1-rasm), ularda EYUKlarni induktivlaydi

$$e_1 = w_1 (d\Phi / dt) ; e_2 = w_2 (d\Phi / dt) .$$

Faraz qilaylik, magnit oqim F vaqtning sinusoidal funksiyasi, ya'ni

$$\Phi_{max} = \Phi_{max} \cdot \sin\omega t \quad (1.4)$$

bunda  $\Phi_{max}$  - magnit oqimining maksimal qiymati.

U holda (1.4) ni  $e_1$  ifodaga qo'yib, uni differensiallasak, quyidagi hosil bo'ladi

$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_{max} \cdot \cos\omega t. \quad (1.5)$$

Biroq,  $\cos\omega t = -\sin(\omega t - \pi/2)$  bo'lganligi uchun

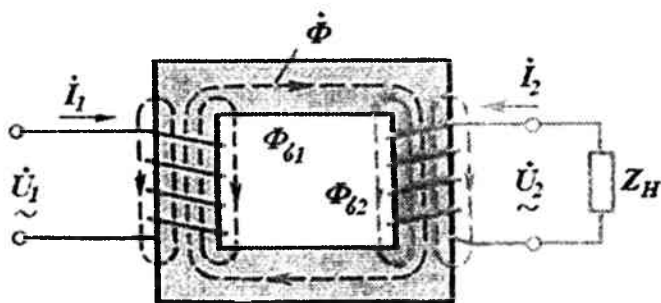
$$e_1 = -\omega w_1 \Phi_{\max} \cdot \sin(\omega t - \pi/2) = -E_{1\max} \cdot \sin(\omega t - \pi/2). \quad (1.6)$$

Shunga o'xshash

$$e_2 = -\omega w_2 \Phi_{\max} \cdot \sin(\omega t - \pi/2) = -E_{2\max} \cdot \sin(\omega t - \pi/2) \quad (1.7)$$

Ifodalar (1.6) va (1.7) dan shuni ko'rish mumkinki, EYUK  $e_1$  va  $e_2$  fazasi bo'yicha  $F$  magnit oqimdan  $\pi/2$  burchakka orqada qolmoqda. EYUKning maksimal qiymati

$$E_{1\max} = \omega w_1 \Phi_{\max}; E_{2\max} = \omega w_2 \Phi_{\max}. \quad (1.8)$$



1.14-rasm. Bir fazali transformatorlarda magnit maydonlar

Bunda  $E_{1\max}$  ni  $\sqrt{2}$  ga bo'lsak va (1.8)ga qo'ysak, birlamchi EYUKning ta'sir etuvchi (effektiv) qiymatini topamiz (V).

$$E_1 = E_{1\max} / \sqrt{2} = (2\pi / \sqrt{2}) w_1 f \Phi_{\max} = 4,44 w_1 f \Phi_{\max}, \quad (1.9)$$

shunga o'xshash, ikkilamchi chulg'am EYUKi

$$E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_{\max} \quad (1.10)$$

QK chulg'ami EYUKning YUK chulg'ami EYUKga nisbati transformatsiyalash koeffitsiyenti deyiladi.

$$k = E_1 / E_2 = w_1 / w_2 \quad (1.11)$$

Amaliy hisoblashlarda transformatsiyalash koeffitsiyenti ma'lum aniqlikda QK chulg'ami kuchlanishining YUK chulg'ami kuchlanishiga nisbati olinadi:  $k \approx U_1 / U_2$ .

Transformator chudg'amlaridagi toklar  $I_1$  va  $I_2$  asosiy magnit oqim  $F$  dan tashqari, har biri faqat o'zining chulg'amlari o'ramlari bilan ilashuvchi tarqoq magnit oqimlarini  $F_{61}$  va  $F_{62}$  (1.14-rasm) va ularda tarqoq EYUK larni hosil qiladilar. Bu EYUKlar birlamchi va ikkilamchi chulg'amlarda quyidagicha bo'ladilar:

$$e_{61} = -L_{61}(di/dt); e_{62} = -L_{62}(di/dt),$$

bunda  $L_{61}$  va  $L_{62}$  – ushbu chulg'amlarning tarqoq induktivliklari.

Tarqoq magnit oqimlar aksariyat magnit singdiruvchanligi doimiy bo'lgan nomagnit muhitlarda (havo, moy, mis) tutashganligi sababli, ular induktivliklari  $L_{61}$  i  $L_{62}$  doimiy deb hisoblash mumkin.

Tarqoq EYUKlarning ta'sir etuvchi qiymatlari mazkur chulg'amlardagi toklarga proporsional:

$$E_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 x_1; E_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 x_2, \quad (1.12)$$

bunda  $x_1$  va  $x_2$  – mos ravishda, birlamchi va ikkilamchi chulg'amlarning tarqoq induktiv qarshiliklari, Om (ushbu ifodalarda manliy belgi shu EYUKlarning tarqoq reaktivligi ekanini ko'rsatadi).

Shunday qilib, transformatorning har bir chulg'amida ikkitadan EYUK induktivlanar ekan: asosiy magnit maydon  $F$  dan EYUK va tarqoq magnit maydon ( $F_{61}$  birlamchi chulg'amda va  $F_{62}$  ikkilamchi chulg'amda) EYUKlari.

Transformatorning tarmoq kuchlanishi  $\dot{U}_1$  ga ulangan birlamchi chulg'ami uchun, birlamchi chulg'am aktiv qarshiligi  $r_1$  da hosil bo'lgan kuchlanishlar pasayuvini e'tiborga olib, Kirxgofning ikkinchi qonuni uchun kuchlanishlar tenglamasi quyidagicha yoziladi (Uning tepasidagi nuqta vektor qiymatni belgilash uchun qo'yilgan)

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{61} = \dot{I}_1 r_1$$

yoki, EYUK  $\dot{E}_1$  va  $\dot{E}_{61}$  ni tenglamaning o'ng tomoniga o'tkazib va tarqoq EYUKlarni tarqoq induktivlik orqali ifodalab  $x_1$ , transformator birlamchi zanjirining kuchlanishlar tenglamasini hosil qilamiz

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}x_1 + \dot{I}_1 r_1 . \quad (1.13)$$

Birlamchi chulg'amda asosiy magnit oqim  $F$  induktivlagan EYUK  $E_1$ , o'zinduksiya EYUK ekanligini ko'rsatadi, shu sababli birlamchi chulg'amga tarmoqdan keltirilgan kuchlanish  $\dot{U}_1$  ga nisbatan teskari fazada bo'ladi.

Aksariyat  $j\dot{I}x_{11}$  induktiv va aktiv  $\dot{I}_1 r_1$  kuchlanishlar pasayuvi boshqa qiymatlarga nisbatan juda kichik miqdorlardir, shu sababli ma'lum aniqlik bilan aytish mumkinki, transformatorga keltirilgan tashqi kuchlanish EYUK  $\dot{E}_1$  bilan muvozanatlanadi, ya'ni

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 . \quad (1.14)$$

Transformatorning yuklanish qarshiligi ulangan ikkilamchi chulg'ami uchun kuchlanishlar tenglamasi quyidagicha yoziladi

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{62} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 Z_H \quad (1.15)$$

ya'ni, ikkilamchi chulg'amda induktivlagan EYUKlar yig'indisi  $\dot{E}_2 + \dot{E}_{62}$  kuchlanishlar pasayuvi yig'indisi  $\dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 Z_H$  bilan muvozanatlanadi. Bunda  $r_2$  - ikkilamchi chulg'am aktiv qarshiligi. Yuklanishdagi kuchlanishlar pasayuvi  $\dot{I}_2 Z_H$  transformatorning ikkilamchi chulg'amidagi kuchlanishni ifodalaydi.

$$\dot{I}_2 Z_H = \dot{U}_2 \quad (1.16)$$

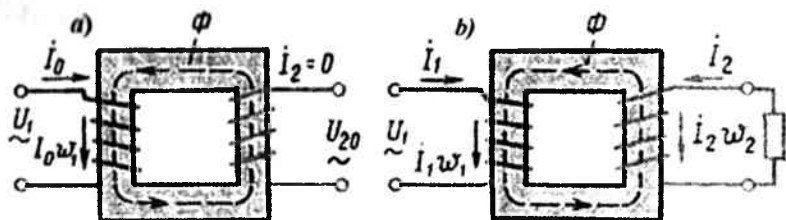
Ushbu (1.15) tenglamani birlamchi chulg'am EYUK tenglamasiga o'xshash (1.13) holatga keltiramiz. Bunda (1.12) va (1.16) ifodalarni e'tiborga olib, transformatorning ikkilamchi zanjiri kuchlanishlar tenglamasini hosil qilamiz

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j \dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2 = \dot{I}_2 Z_H \quad (1.17)$$

Bu tenglamadan shuni ko'rish mukinki, yuklanishga ulangan transformator chiqish klemmasidagi kuchlanish shu chulg'am EYUKdan ikkilamchi chulg'am qarshiliklari  $r_2 + jx_2$  dagi kuchlanishlar pasayuviga farq qilar ekan.

### 1.5. Magnit yurituvchi kuch va tok tenglamalari

Faraz qilaylik, transformator yuksiz ishlash rejimida (1.15, a-rasm) ishlayapti, ya'ni uning birlamchi chulg'ami klemmalariga  $U_1$  kuchlanish ulangan, ikkilamchi chulg'am uzilgan ( $I_2=0$ ). Ushbu rejimda birlamchi chulg'amdagi  $I_0$  toki yuksiz ishlash toki deyiladi.



1.15-rasm. Bir fazali transformator yuksiz ishlash (a) va yuklanish (b) rejimlari

Bu tok yordamida hosil qilingan magnit yurituvchi kuch (MYUK)  $I_0 \omega_1$  magnit o'zakda asosiy magnit oqimni hosil qiladi, uning maksimal qiymati quyidagiga teng



$$\Phi_{\max} = \sqrt{2}I_0 w_1 / R_u, \quad (1.18)$$

bunda  $R_M$  – magnit o‘zakning magnit qarshiligi.

Ikkilamchi chulg‘amni  $Z_N$  yuklanishga ulasak (1.15, b-rasm) unda  $I_2$  toki hosil bo‘ladi. Bunda birlamchi chulg‘amdagi tok  $I_1$  miqdorgacha ortadi.

Endi magnit oqim  $F_{\max}$   $I_1 w_1$  va  $I_2 w_2$  MYUKlarning ta'sirlari bilan hosil bo‘ladi

$$\Phi_{\max} = \left( \sqrt{2} / R_u \right) ( \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 ) \quad (1.19)$$

Bu magnit oqimni (1.19) dan aniqlash mumkin

$$\Phi_{\max} = E_1 / (4,44 w_1 f),$$

yoki,  $U_1 \approx (-E_1)$  ekanligini e‘tiborga olib, quyidagini olamiz

$$\Phi_{\max} \approx U_1 / (4,44 w_1 f). \quad (1.20)$$

Ifoda (1.20) dan ko‘rinadiki, asosiy magnit maydon  $F$  qiymati transformator yuklanishiga bog‘liq emas ekan, chunki kuchlanish  $U_1$  o‘zgarmas deb qabul qilindi. Biroq, shuni nazarda tutish zarurki, bu hisoblashlar tahminiy va yuklanishning nominal miqdordan oshmaydigan holatlariga taalluqlidir. Buning sababi shundaki,  $F$  ning o‘zgarmasligi  $\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1)$  tenglikka asoslangan va unda birlamchi zanjir kuchlanishlar pasayuvi e‘tiborga olinmagan [(1.13) bilan solishtiring].

Qabul qilingan  $\Phi = const$  ekanligi (1.18) va (1.19) ifodalarni tenglashtirish imkonini beradi

$$\left( \sqrt{2} / R_u \right) \dot{I}_0 w_1 = \left( \sqrt{2} / R_u \right) ( \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 ),$$

natijada transformator MYUK tenglamasini hosil qilamiz

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2. \quad (1.21)$$

Ifoda (1.21) ni o'zgartirib, birlamchi chulg'am  $\dot{I}_1 w_1$  MYUK tenglamasini ikki tashkil etuvchilarning yig'indisi sifatida yozish mumkin

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1 + (-\dot{I}_2 w_2)$$

MYUK tenglamasining  $\dot{I}_0 w_1$  tashkil etuvchisi transformator magnit o'zagida asosiy magnit maydoni F ni hosil qiladi,  $-\dot{I}_2 w_2$  tashkil etuvchisi esa ikkilamchi chulg'am MYUK  $\dot{I}_2 w_2$  ni muvozanatlaydi.

Transformator ikkilamchi chulg'ami MYUK  $\dot{I}_2 w_2$  ning asosiy magnit maydon F ga ta'sirini Lens qoidasi bo'yicha tushuntirish mumkin. Bu qoidaga ko'ra chulg'amda induktivlangan EYUK shu chulg'amda shunday tok hosil qiladiki, u o'zining magnit ta'siri bilan EYUK ni hosil qilgan birlamchi sababga qarshi yo'naladi. EYUK  $E_2$  ni hosil qilgan birlamchi sabab asosiy magnit maydon F dir. Shuning uchun ikkilamchi chulg'amdagi tok  $\dot{I}_2$  magnit oqim Fga qarama-qarshi yo'nalgan, ya'ni u bilan qarama-qarshi fazada bo'lgan va uni kamaytirishga yo'nalgan MYUK  $\dot{I}_2 w_2$  ni hosil qiladi. Agar ikkilamchi chulg'am  $w_2$  qisqa tutashgan yoki sof induktiv qarshilikki ulangan bo'lganda edi, u holda  $\dot{I}_2$  tok EYUK  $E_2$  fazasidan  $\Psi_2 = 90^\circ$  ga orqada qolgan va MYUK  $\dot{I}_2 w_2$  butkul magnit o'zakka nisbatan magnitsizlovchi bo'lar edi.

Real vaziyatlarda esa ikkilamchi chulg'am yuklanish qarshiligi  $Z_H = r_n \pm \pm jx_H$  ga ulangan bo'ladi, shu bilan birga, uning o'zi ham  $r_2$  aktiv qarshilikka ega. Shuning uchun  $\dot{I}_2$  toki va  $E_2$  EYUK orasidagi faza siljishi  $90^\circ$  dan farq qiladi va asosiy magnit maydon F ga  $\dot{I}_2 w_2$  MYUKning hammasi ta'sir etmay, faqat uning reaktiv tashkil etuvchisi ta'sir etadi.

Aktiv-induktiv yuklanishda yuk toki  $\dot{I}_2$  EYUK  $E_2$  dan  $\Psi_2$  burchakka orqada qoladi, MYUK  $\dot{I}_2 w_2$  o'zining reaktiv (induktiv) tashkil etuvchisi  $\dot{I}_{2p} w_2$  bilan transformator magnit o'zagiga magnitsizlovchi ta'sir etadi

$$\dot{I}_{2p} w_2 = \dot{I}_2 w_2 \sin \Psi_2,$$

bunda  $I_{2p} = I_2 \sin \Psi_2$  — yuklanish tokining reaktiv tashkil etuvchisi.

1.16,a-rasmda transformatorning aktiv-induktiv yuklanishi uchun ikkilamchi chulg'am MYUK vektor diagrammasi keltirilgan. Diagrammada ikkilamchi chulg'am  $\vec{E}_2$  EYUK vektori fazasi bo'yicha asosiy magnit oqimi  $F_{\max}$  vektoridan  $90^\circ$  ga, ikkilamchi chulg'am  $I_{2,w_2}$  MYUK fazasi bo'yicha EYUK dan  $\psi_2$  burchakka orqada qoladi. Bu diagrammalardan ko'rinadiki, ikkilamchi chulg'am MYUKning reaktiv (induktiv)  $I_{2,w_2}$  tashkil etuvchisi asosiy magnit oqim  $F_{\max}$  bilan qarama-qarshi fazada, ya'ni transformator magnit o'zagiga magnitsizlovchi ta'sir etar ekan.

Transformator ishining tahlili shuni ko'rsatadiki, transformator nominalga yaqin yuklanishida asosiy magnit oqim  $F$  qiymati sezilarsiz o'zgarar ekan va avval qabul qilingan  $F \approx \text{const}$  shart asosli ekan. Chunki reaktiv tashkil etuvchisi magnit o'zakka magnitsizlovchi ta'sir etadigan ikkilamchi chulg'am MYUKning  $I_{2,w_2}$  birlamchi chulg'am MYUK bilan kompensatsiyalanadi

$$(-I_{2,w_2}) = I_{1,w_1} - I_0 w_1. \quad (1.22)$$

Transformator yuk toki  $i_2$  o'zgarishida ikkilamchi chulg'am MYUK  $I_{2,w_2}$  o'zgaradi, bu esa  $-I_{2,w_2}$  tashkil etuvchi hisobiga birlamchi chulg'am MYUK  $I_{1,w_1}$  ning o'zgarishiga olib keladi. Yuksiz ishlash MYUK  $I_0 w_1$  tashkil etuvchisi qiymati esa o'zgarishsiz qoladi, lekin transformator asosiy magnit maydonini  $F \approx \text{const}$  hosil qilish uchun etarli bo'ladi.

Transformator aktiv-sig'im yuklanishli bo'lganda yuklanish  $i_2$  toki EYUK  $\vec{E}_2$  dan fazasi bo'yicha  $\Psi_2$  burchakka ilgarilab ketganda, MYUK  $I_{2,w_2}$  reaktiv (sig'im) tashkil etuvchisi asosiy magnit maydon  $F_{\max}$  fazasi bo'yicha mos keladi va transformator magnit o'zagini magnitlaydi (1.16-rasm). Bunday holda aktiv-induktiv yuklanishdagidek [(1.22)ga qarang], birlamchi MYUK  $(-I_{2,w_2})$  tashkil etuvchisi ikkilamchi MYUK  $I_{2,w_2}$  ta'sirini kompensatsiyalaydi.

MYUK tenglamasi (1.21) ni o'ramlar soni  $w_1$  ga bo'lsak

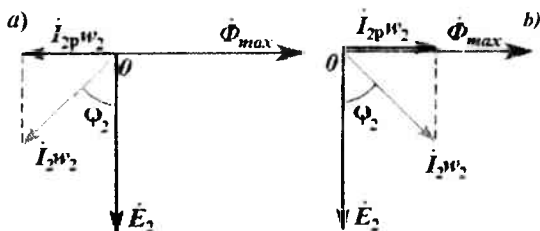
$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 w_2 / w_1 \quad \text{yoki} \quad \dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 \quad (1.23)$$

bunda  $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 w_2 / w_1$ , — birlamchi chulg'am o'ramlar soniga keltirilgan ikkilamchi chulg'amning yuk toki.

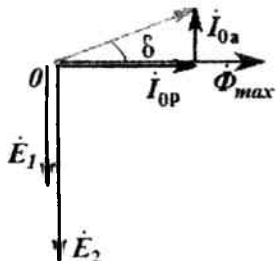
Ifoda (1.23)ni o'zgartirib, transformator toklar tenglamasini hosil qilamiz

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \quad (1.24)$$

Bu tenglamadan birlamchi tok  $\dot{I}_1$ ni ikki tashkil etuvchilarning yig'indisi deb qarash mumkin: magnit o'zakda asosiy magnit oqimini hosil qilish uchun yetarli bo'lgan va MYUK  $\dot{I}_0 w_1$  ni hosil qiladigan  $\dot{I}_0$  toki, hamda ikkilamchi MYUK  $\dot{I}'_2 w_1$  ni hosil qilgan tok  $\dot{I}'_2$ .



1.16-rasm. Aktiv-induktiv (a) va aktiv-sig'im (b) yuklanishli transformator vektor diagrammasi



1.17-rasm. Yuksiz ishlash tokini tashkil etuvchilarga ajratish

Birlamchi tok tashkil etuvchilarining bunday ta'sir etishi shunga olib keladiki, yuk toki  $I_2$  ning har qanday o'zgarishi unga nisbatan teskari fazada bo'lgan birlamchi tok  $I_1$  ning o'zgarishiga olib keladi.

Asosiy magnit oqimi  $F$  o'zgaruvchan bo'lgani uchun, transformator magnit o'zagi doimiy qayta magnitlanishda bo'ladi. Shu sababli magnit o'zakda gisterezis va uyurma toklardan magnit isroflari bo'ladi. Magnit isroflarning quvvati yuksiz ishlash tokining aktiv tashkil etuvchisiga proporsional bo'ladi. Shunday qilib, yuksiz ishlash toki ikki tashkil etuvchiga ega: magnitlovchi tok  $I_{OR}$  ni aglatuvchi reaktiv tashkil etuvchi va magnit isroqlari tufayli sodir bo'luvchi aktiv  $I_{OA}$  tashkil etuvchiga

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}. \quad (1.25)$$

Aksariyat yuksiz ishlash toki  $I_0$  ning aktiv tashkil etuvchisi  $I_{OA}$  deyarli katta emas  $I_{OA} = 0,1 \cdot I_0$  va u yuksiz ishlash tokiga sezilarli ta'sir etkaza olmaydi.

1.17-rasmda transformator yuksiz ishlash rejimidagi vektor diagramma keltirilgan. Unda yuksiz ishlash  $i_0$  toki va uning tashkil etuvchilari  $i_{0a}$  va  $i_{0p}$  ko'rsatilgan. Asosiy magnit oqim  $\phi_{max}$  fazasi bo'yicha yuksiz ishlash  $i_0$  tokidan  $\delta$  burchakka orqada qoladi va uni magnit isroflari burchagi deyiladi. Aktiv tashkil etuvchi  $i_{0a}$  ortsa bu burchak ham ortadi. Katta va o'rta quvvatli transformatorlarda yuksiz ishlash toki nominal tokning 2-10% tashkil etadi. Shuning uchun nominal yuklanishga yaqin yuk rejimlarda tok  $I_0$  ni e'tiborga olmasdan (1.22) ni quyidagicha yozish mumkin

$$I_1 / I_2 = w_2 / w_1, \quad (1.26)$$

yani, transformator chulg'amlaridagi toklar shu chulg'amlar o'ramlari srmiga teskari proporsionaldir. Shu sababli QK chulg'amlari o'ramlar soni kichik va kesim yuzasi katta bo'lgan o'tkazgichiardan yasaladi, YUK chulg'amlari o'ramlari soni katta bo'ladi.

## 1.6. Ikkilamchi chulg'am parametrlarini keltirish va transformator almashtirish sxemasi

Umumiy xolda transformator birlamchi chulg'amlari perametrlari ikkilamchi chulg'am parametrlaridan farq qiladi. Bu farq transformatsiyalash koeffitsiyenti katta bo'lganda yaqqol ko'rinadi. Bu holat hisoblash va vektor digrammalarni qurish ishlarini og'irlashtiradi, chunki bunda elektr mashinasining birlamchi chulg'am o'zgaruvchilarining vektorlari ikkilamchi chulg'amning bir nomli o'zgaruvchilari vektorlaridan keskin farq qiladi. Bu kamchiliklarni bartaraf etish uchun transformatorning barcha parametrlarini bir xil o'ramlar soniga, aksariyat birlamchi chulg'am o'ramlari soni  $w_1$  ga keltiriladi. Shu maqsadda, transformator ikkilamchi chulg'amini tasvirlovchi barcha qiymatlar (EYUK, kuchlanish, tok va qarshiliklar)ni birlamchi chulg'am o'ramlar soniga nisbatan qayti hisoblaymiz (qisqasi, hayolan  $w_1 = w_2$  deb hisoblanadi).

Shunday qilib, transformatsiyalash koeffitsiyenti  $k = w_1 / w_2$  bo'lgan real transformator o'rniga, transformatsiyalash koeffitsiyenti  $k = w_1 / w'_2 = w_1 / w_1 = 1$  bo'lgan hayoliy transformator olinadi. Bunday transformator – keltirilgan transformator deyiladi. Biroq, transformator ikkilamchi parametrlarini keltirish uning energetik ko'rsatkichlariga ta'sir etmasligi va keltirilgan transformator ikkilamchi chulg'amidagi fazalar siljishi real transformatordagidan farq qilmasligi zarur. Masalan, real transformator ikkilamchi chulg'ami elektromagnit quvvati  $E_2 I_2$  keltirilgan transformator ikkilamchi chulg'ami elektromagnit quvvatiga teng bo'lishi zarur

$$E_2 I_2 = E'_2 I'_2 \quad (1.27)$$

Ikkilamchi chulg'am keltirilgan toki  $I'_2 = I_2 (w_2 / w_1)$  qiymatini (1.27)ga qo'ysak, ikkilamchi keltirilgan EYUK ifodasini olamiz

$$E'_2 = \frac{I'_2}{I_2} E_2 = \frac{I_2}{I_2} \frac{w_1}{w_2} E_2 = E_2 \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.28)$$

$U_2 I_2 \approx U'_2 I'_2$  bo'lganligi uchun ikkilachi chulg'am keltirilgan kuchlanishi quyidagicha bo'ladi:

$$U'_2 \approx U_2 (w_1 / w_2). \quad (1.29)$$

Ikkilachi chulg'am aktiv qarshiligidagi quvvat isroflari tengligi  $I_2^2 r_2 = I_2'^2 r_2'$  dan keltirilgan aktiv qarshilikni aniqlaymiz.

$$r_2' = r_2 (I_2 / I_2')^2 = r_2 (w_1 / w_2)^2. \quad (1.30)$$

Ikkilamchi chulg'am keltirilgan induktiv qarshiligini reaktiv quvvatlar  $I_2^2 x_2 = I_2'^2 x_2'$  dan topamiz.

$$x_2' = x_2 (w_1 / w_2)^2. \quad (1.31)$$

Ikkilamchi chulg'am keltirilgan to'liq qarshiligi quyidagicha bo'ladi:

$$Z_2' = r_2' + jx_2' = (r_2 + jx_2)(w_1 / w_2)^2 = Z_2 (w_1 / w_2)^2. \quad (1.32)$$

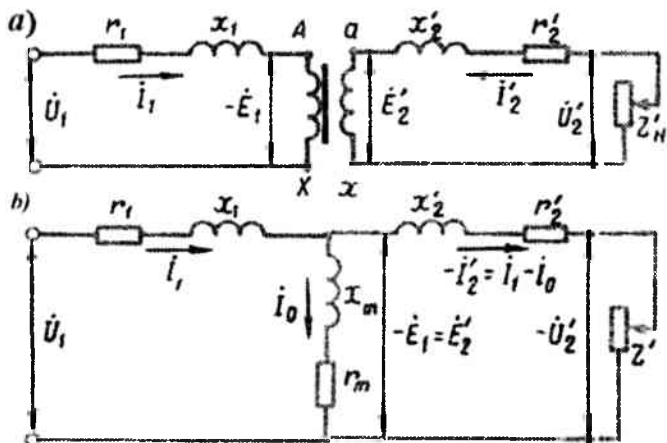
Ikkilamchi chulg'am klemmalariga ulangan yuklanishning keltirilgan to'liq qarshiligini (1.32) ga o'xshash aniqlaymiz.

$$Z_n' = Z_n (w_1 / w_2)^2. \quad (1.33)$$

Keltirilgan transformator uchun kuchlanish va toklar tenglamalari quyidagicha bo'ladi:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 Z_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1; \\ \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2' = \dot{E}_2' - j\dot{I}_2' x_2' - \dot{I}_2' r_2'; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2'). \end{aligned} \quad (1.34)$$

Ushbu tenglamalar transformator yuksiz ishlash rejimidan to nominal yuklanishigacha bo'lgan diapazonda transformator parametrlari orasidagi bog'lanishlarni ifodalaydi.



1.18-rasm. Keltirilgan transformatorning ekvivalent (a) va almashtirish sxemalari (b)

Transformator elektromagnit jarayonlarining tadqiqoti va uni hisoblashni egillashtiradigan yana bir vosita, keltirilgan transformator almashtirish sxemasini qo'llashdir. 1.18-rasmida keltirilgan transformator ekvivalent sxemasi ko'rsatilgan. Unda  $r$  va  $x$  shartli ravishda chulg'amlardan tashqariga olib chiqilgan va ularga ketma-ket ulangan. Ilgari aniqlanganidek, keltirilgan transformatorida  $k = 1$ , shu sababli  $-\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$ . Natijada sxemadagi  $A$  va  $a$ , hamda  $X$  va  $x$  nuqtalar, mos ravishda bir xil potensialga ega. Bu keltirilgan ikki juft nuqtalarni elektrik ulash natijasida transformatorning T-simon almashtirish sxemasini hosil qilish mumkin (1.18,b-rasm). Transformatorning elektrik almashtirish sxemasida birlamchi va ikkilamchi zanjirlar orasidagi magnit bog'lanish elektrik bog'lanish bilan almashtirildi.

Keltirilgan transformatorning almashtirish sxemasi (1.34)da ko'rsatilgan keltirilgan transformatorning barcha EYUK va toklar tenglamalarini qoniqtiradi va uch shaxobchalar majmuasini ifodalaydi: birlamchi chulg'am qarshiligi  $Z_1 = r_1 + jx_1$  va  $\dot{I}_1$  toki; magnitlovchi qarshilik  $Z_m = r_m + jx_m$  va tok  $\dot{I}_0$ ; ikkilamchi chulg'am qarshiligi  $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$  va yuklanish qarshiligi  $Z'_{yuk} = r'_{yuk} + jx'_{yuk}$ .

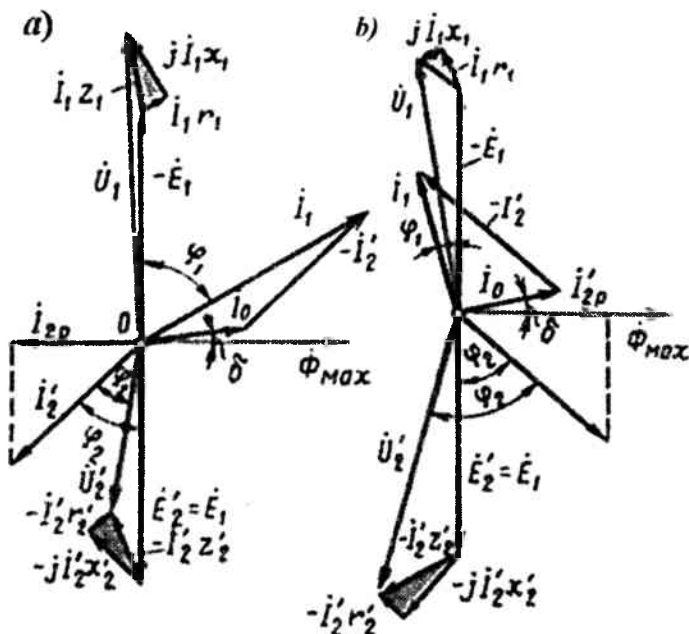


Transformator yuklanish qarshiligi  $Z'_{yuk}$  ni o'zgartirib sxemada transformatorning barcha ishlash rejimlarini izohlash mumkin.

Sxemaning magnetlovchi shaxobchasi  $Z_m = r_m + jx_m$  yuksiz ishlash tokini ifodalaydi. Ushbu shaxobchada aktiv qarshilik  $r_m$  ning mavjudligini transformatoridagi magnet isroflari bilan izohlash mumkin.

### 1.7. Transformatorning vektor diagrammasi

Keltirilgan transformator almashtirish sxemasi, kuchlanish va toklarning asosiy (1.34) tenglamalaridan foydalanib, transformatorning o'zgaruvchilari orasidagi bog'lanishlar hamda tok, EYUK, kuchlanish va ular orasidagi faza siljishlarni yaqqol qo'ratuvchi vektor diagrammasini quramiz.



1.19-rasm. Aktiv-induktiv (a) va aktiv-sig'im (b) yuklanishli transformatorning vektor diagrammalari

Diagramma qurishni (1.19,a-rasm) asosiy magnit maydonning maksimal  $\Phi_{\max} = E_1 / (4,44 f w_1)$  qiymati vektorini ixtiyoriy yo'nalishda joylashtirishdan boshlaymiz.

Tok vektori  $I_0$  magnit oqim  $\Phi_{\max}$  vektoridan  $\delta$  burchagiga oldinda bo'ladi, EYUK  $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$  vektorlari magnit oqim vektoridan  $90^\circ$  ga orqada qoladilar [(1.6) va (1.7)ga qarang]. So'ngra  $I_2'$  vektorni quramiz.  $E_2'$  va  $I_2'$  vektorlar orasidagi fazalar siljishini aniqlash uchun yuklanish xarakterini bilish zarur. Faraz qilaylik, transformator yuklanish xarakteri aktiv-induktiv deb. U holda  $I_2'$  vektori  $E_2'$  vektoridan tashqi yuklanish xarakteri va ikkilamchi chulg'amning xususiy qarshiliklarini ifodalovchi quyidagi burchakka orqada qoladi

$$\psi_2 = \arctg \frac{x_2' + x_n'}{r_2' + r_n'} \quad (1.35)$$

Ikkilamchi kuchlanish vektori  $U_2'$ ni qurish uchun EYUK  $E_2'$  vektoridan kuchlanishlar pasayuvi  $jI_2'x_2'$  va  $I_2'r_2'$  vektorlarini ayirish zarur. Shu maqsadda  $E_2'$  vektorining uchidan  $I_2'$  vektori yo'nalishida perpendikulyar to'g'ri chiziq o'tkazamiz va unga  $-jI_2'x_2'$  vektorni qo'yamiz. So'ngra unga  $I_2'$  tokiga parallel chiziq o'tkazib  $-I_2'r_2'$  vektorni qo'yamiz. Oxirgi ikki tashkil etuvchilar yig'indisini qurib, ikkilamchi chulg'amdagi  $-I_2'Z_2'$  vektorni va ikkilamchi zanjirdagi ichki kuchlanishlar pasayuvi uchburchagini hosil qilamiz. So'ngra 0 nuqtadan  $\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - I_2'Z_2'$  vektorini o'tkazamiz. U fazasi bo'yicha  $I_2'$  tokidan  $\varphi_2 = \arctg(X_H' / r_H')$  burchakka oldinlab ketadi.

Birlamchi tok vektorini ikki vektor yig'indisi  $I_1 = I_0 + (-I_2')$  kabi aniqlaymiz. Tok  $-I_2'$  vektorini  $I_0$  tok vektori boshiga  $I_2'$ ning yo'nalishiga teskari yo'nalishda qo'yamiz. Vektor  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jI_1x_1 + I_1r_1$  ni quramiz. Buning uchun fazasi bo'yicha  $\Phi_{\max}$  magnit oqimdan  $90^\circ$  ga oldinlab ketgan EYUK  $-\dot{E}_1$  vektoriga birlamchi chulg'am ichki kuchlanishlar pasayuvi vektorlarini qo'shamiz:  $I_1$  tokiga parallel bo'lgan  $I_1r_1$  va  $I_1$  tokni  $90^\circ$  ga oldinlab ketgan  $jI_1x_1$  vektorlarni qo'shamiz. Koordinata boshl 0 nuqtam  $I_1Z_1$  vektor boshi bilan birlashtirib, fazasi bo'yicha tok  $I_1$  vektoridan  $\varphi_1$  burchakka oldinlab ketgan birlamchi kuchlanish  $\dot{U}_1$  vektorini aniqlaymiz.

Baʼzan transformator vektor diagrammasi chulgʻamlar EYUKlarini aniqlash uchun quriladi. Bunday hollarda ikkilamchi chulgʻam oʻzgaruvchilari  $I_2$ ,  $U_2$  va  $\cos\varphi_2$  berilgan boʻladi. Transformatsiyalash koeffitsienti  $w_1/w_2$  maʼlum boʻlsa,  $U'_2$  va  $I'_2$  lar aniqlanadi, soʻngra bu qiymatlarning vektorlari bir biriga nisbatan  $\varphi_2$  faza burchagi ostida quriladi. EYUK  $\vec{E}'_2 = \vec{E}_1$  vektorlarini kuchlanish vektori  $U'_2$  ga quyidagi kuchlanishlar pasayuvini qoʻshib aniqlanadi

$$\vec{E}'_2 = \vec{U}'_2 + j\vec{I}'_2 x'_2 + \vec{I}'_2 r'_2.$$

Aktiv-sigʻim yuklanishi boʻlganda transformator vektor diagrammasi 1.19,b-rasmdagi koʻrinishda boʻladi. Diagramma qurish ketma-ketligi ilgariidek boʻladi, biroq bunda tok  $I'_2$  vektori EYUK  $\vec{E}'_2$  vektoridan fazasi boʻyicha

$$\psi_2 = \arctg \frac{x'_2 - x'_n}{r'_2 + r'_n} \quad (1.36)$$

burchakka oldinlab ketadi.

Yuklanishning sigʻim tashkil etuvchisi katta boʻlganda yuklanish qarshiligidagi kuchlanishlar pasayuvining sigʻim tashkil etuvchisi ikkilamchi chulgʻamdagi kuchlanishlar pasayuvining induktiv tashkil etuvchisini qisman kompensatsiyalaydi. Natijada  $U'_2$  vektori  $\vec{E}'_2$  vektorga nisbatan kattaroq boʻlishi mumkin. Bundan tashqari ikkilamchi tokning reaktiv (oldinlab ketuvchi) tashkil etuvchisi  $I'_{2p} = I'_2 \sin\psi_2$  fazasi boʻyicha yuksiz ishlash tokining reaktiv tashkil etuvchisi  $I'_{0p}$  bilan mos keladi, yaʼni u transformator magnit oʻzagiga nisbatan magnitlovchi taʼsir etadi. Bu, aktiv-induktiv yuklanishdagi  $I'_2$  tokning  $I'_{2p}$  tashkil etuvchisi transformator tizimini magnitsizlovchi taʼsiriga nisbatan birlamchi tok  $I_1$  ning koʻpayishiga olib keladi (1.19,a-rasm).

## 1.8. Uch fazali transformator va uch fazali chulgʻanilarni ulash sxemalari

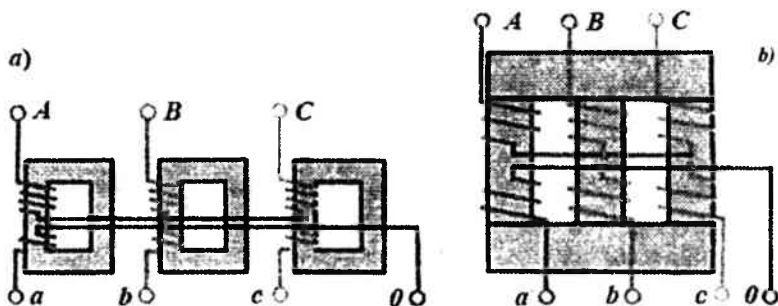
Uch fazali kuchlanishlar tizimini transformatsiyalash uchun uchta bir fazali transformatorlarni guruhga ulash yoʻli bilan bajarish mumkin (1.20,a-rasm). Biroq, nisbatan qoʻpolligi, katta ogʻirligi va narxining balandligi – transformatorlar guruhining kamchiligidir. Shu sababli ularni tashish va montaj qilish katta ahamiyatli hisoblangan, ogʻirligi va birlik jihozning gabaritini kamaytirish maqsadida faqat katta quvvatli qurilmalarda qoʻllaniladi.

Quvvati 60000 kV·A gacha boʻlgan qurilmalarda uch fazali (1.20,b-rasm) transformatorlar qoʻllaniladi. Ularda chulgʻamlar umumiy magnit oʻzakki birlashtirilgan uchta sterjenda (1.2-rasm) joylashgan. Biroq, bunday hosil qilingan magnit oʻzak simmetrik emas - oʻrtadagi sterjen  $\Phi_B$  faza magnit oqimiga nisbatan magnit qarshilik, chekkadagi sterjenlar  $\Phi_A$  va  $\Phi_C$  faza magnit qarshiliklaridan kichik (1.21,a-rasm).

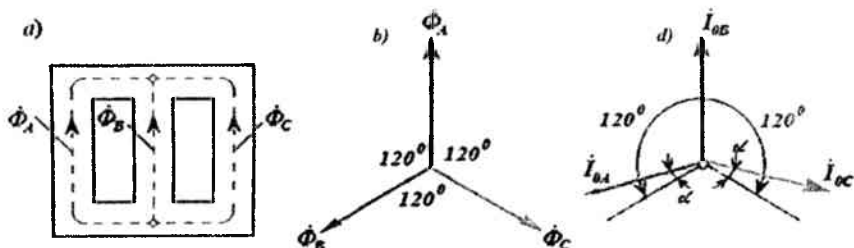
Uch fazali transformatorning birlamchi chulgʻamlariga simmetrik kuchlanishlar  $\dot{U}_A$ ,  $\dot{U}_B$  va  $\dot{U}_C$  tizimi ulanganligi sababli, transformator magnit oʻzaklari (sterjenlari)da  $\dot{\Phi}_A$ ,  $\dot{\Phi}_B$  va  $\dot{\Phi}_C$  simmetrik magnit tizimi hosil boʻladi (1.21,b-rasm). Biroq, magnit tizimning nosimmetrik ekanligi sababli alohida fazalar chulgʻamlarining magnitlovchi toklari teng emas: chekka sterjenlar fazalari magnitlovchi toklari  $\dot{I}_{0A}$  va  $\dot{I}_{0C}$  oʻrta faza magnitlovchi toki  $\dot{I}_{0B}$  dan kattaroq. Undan tashqari  $\dot{I}_{0A}$  va  $\dot{I}_{0C}$  toklar faza boʻyicha oʻz magnit oqimlari  $\dot{\Phi}_A$  va  $\dot{\Phi}_C$  dan  $\alpha$  burchakka siljigan boʻladi. Shunday qilib, uch fazali simmetrik kuchlanish tizimiga ulangan uch fazali transformatorning yuksiz ishlash toklari nosimmetrik tizimni hosil qiladi (1.21,d-rasm).

Uch sterjenli magnit oʻzak nosimmetriyasini kamaytirish uchun, yaʼni chekka sterjenlardagi magnit qarshilikni kamaytirish uchun yarmoning kesim yuzasini sterjenning kesim yuzasiga nisbatan 10-15% ga kattaroq qilinadi, yaʼni ularning magnit qarshiligi kamaytiriladi. Uch sterjenli transformator yuksiz ishlash tokining nosimmetriyasi transformator ishiga taʼsir etmaydi, chunki juda

kichik yuklanishda ham  $I_A$ ,  $I_B$  va  $I_C$  toklar orasidagi farq sezilmay qoladi.



1.20-rasm. Uch fazali transformatorlar guruhi (a) sterjenli (b) transformator



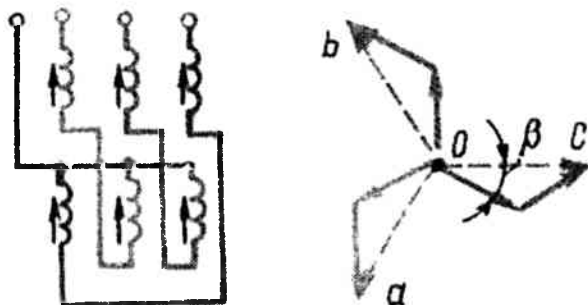
1.21-rasm. Uch sterjenli magnet o'zak va vektor diagrammalari

Shunday qilib, uch sterjenli transformatorning tarmoq kuchlanishi simmetrik va transformator uchchala fazalari ravon yuklanishi bo'lganda, ular bir xil sharoitda ishlaydilar. Shu sababli, yuqorida ko'rilgan kuchlanish, MYUK va toklar tenglamalari, hamda almashtirish sxemalari va vektor diagrammalari transformatorning tadqiqotida har bir fazalari uchun qo'llanishi mumkin.

Uch fazali transformator chulg'amlarini quyidagi sxemalarda ulash mumkin: yulduzcha; nol o'tkazgichli yulduzcha; uchburchak; nol o'tkazgichli zigzak.

Transformator chulg'amlari ulanish sxemalarini belgilashda orasiga qiya chiziq chizilgan Y (yulduzcha),  $\Delta$  (uchburchak) belgilaridan foydalaniladi. Masalan, Y/ $\Delta$  belgi transformatorning YUK chulg'ami yulduzcha, QK chulg'ami uchburchak ulanganini anglatadi.

Zigzak ulanish sxemasi faqat maxsus belgilangan transformatorlarda, masalan, to'g'rilagichlar uchun mo'ljallangan transformatorlarda qo'llaniladi. Ulanishlarni bajarish uchun QK chulg'ami har bir fazasini ikki qismga ajratib, ularni har xil fazalarga joylashtiriladi. Ushbu chulg'am qismlar shunday ulanadiki, faza chulg'ami bir qismining keti shu chulg'amning boshqa sterjenda joylashgan ikkinchi qismi ketiga ulanadi (1.22,a-rasm). Agar har xil sterjenlarda joylashgan chulg'am qismlari bir hil bo'lsa, zigzak teng yekali deyiladi, agar bu qismlar bir xil bo'lmasa, teng yekali bo'lmagan zigzak ulanishi deyiladi.



1.22-rasm. Chulg'amlarni zigzak ulash

Transformator chulg'amlari klemmalari (boshi va keti) quyidagicha belgilanadi: YUK chulg'amlari – chulg'am boshi A, V, S, mos ravishda, chulg'am keti X, Y, Z; QK chulg'amlari a, b, c, mos ravishda, chulg'am ketlari x,y,z.

Chulg'amlarni yulduzcha ulaganda liniya kuchlanishi ( $U_l$ ), ya'ni ikki faza orasidagi kuchlanish, faza kuchlanishi ( $U_\phi$ ), ya'ni bir faza va nol orasidagi kuchlanishdan  $\sqrt{3}$  marta katta bo'ladi ( $U_l = \sqrt{3}U_\phi$ ).

Uch fazali transformator liniya kuchlanishlari nisbati quyidagicha aniqlanadi:

chulg'amlar ulanish sxemalari	Y/Y	$\Delta/Y$	$\Delta/\Delta$	Y/ $\Delta$
liniya kuchlanishlari nisbati	$w_1/w_2$	$w_1/(\sqrt{3}w_2)$	$w_1/w_2$	$\sqrt{3}w_1/w_2$

Shunday qilib, uch fazali transformator liniya kuchlanishlari nisbati, na faqat faza chulg'amlari o'ramlari soni bilan aniqlanadi, balki ular ulanish sxemalariga ham bog'liq ekan.

**Misol 1.3.** Nominal quvvati  $S_{nom} = 100$  kV-A bo'lgan uch fazali transformator Y/ $\Delta$  sxemasi bilan ulangan. Bunda transformator kirish va chiqish klemmalaridagi nominal kuchlanishlar  $U_{1nom} = 3,0$  kV,  $U_{2nom} = 0,4$  kV. Transformator o'ramlari soni nisbati (transformatsiyalash koeffitsiyenti) va faza chulg'amlarning nominal birlamchi  $I_{1f}$  va ikkilamchi  $I_{2f}$  toklarini hisoblang.

**Yechish.** Birlamchi va ikkilamchi chulg'amlar faza kuchlanishlari

$$U_{1\phi} = U_{1nom} / \sqrt{3} = 3,0 / \sqrt{3} = 1,73 \text{ kV}, U_{2\phi} = U_{2nom} = 0,4 \text{ kV}.$$

Transformatorning talab qilinayotgan o'ramlari nisbati (transformatsiyalash koeffitsiyenti)

$$w_1/w_2 = U_{1\phi} / U_{2\phi} = 1,73 / 0,4 = 4,32.$$

Birlamchi chulg'am nominal faza tok (yulduzcha ulangan)

$$I_{1\phi} = I_{1nom} = S_{nom} / (\sqrt{3} U_{1nom} = 100 / (\sqrt{3} \cdot 3,0) = 19,3 \text{ A}.$$

Ikkilamchi chulg'am nominal faza tok (uchburchak)

$$I_{2\phi} = I_{2nom} / \sqrt{3} = S_{nom} / (\sqrt{3} U_{2nom} = 100 / (3 \cdot 0,4) = 83,3 \text{ A}.$$

Shunday qilib, faza toklari nisbati

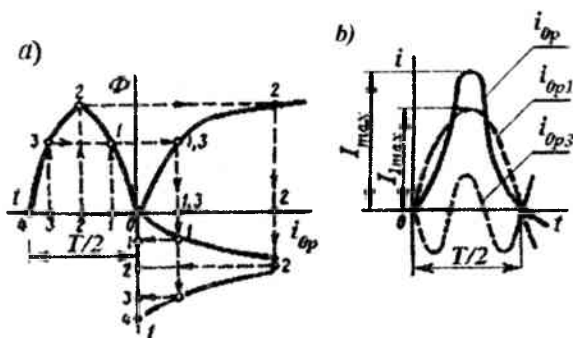
$$I_{2f} / I_{1f} = 83,3 / 19,3 = 4,32$$

Transformator chulg'amlari o'ramlarining nisbatiga teng.

## 1.9. Transformator magnet o'zagini magnetlanishdagi hodisalar

Faraz qilaylik, transformatorning birlamchi chulg'ami sinusoidal kuchlanishga ulangan bo'lsin. Bunda magnet o'zakdagi magnet oqimi ham sinusoidal bo'ladi  $\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t$ . Biroq, transformator magnet o'zagini to'yinganligi sababli,  $F$  magnet oqim  $i_{op}$  magnetlovchi kuchga proporsional bo'lmaydi. Shu sababli, sinusoidal magnet oqim bo'lganda ham magnetlovchi  $i_{op} = f(t)$  tok nosinusoidal bo'ladi. Bu tokning vaqtga bog'lik egri chizig'ini aniqlash uchun magnet o'zak magnetlanish egri chizig'i  $\Phi = f(i_0)$  bilan magnet maydon  $\Phi = f(t)$  o'zgarishi grafiklaridan foydalanamiz.

1.23.a-rasmda magnetlovchi tokning  $i_{op} = f(t)$  grafigini qurish tartibi keltirilgan. Grafikning 2-kvadrantida (yuqori qismi chap tomoni)  $\Phi = f(t)$  sinusoidal funksiya, 1-kvadrantida (yuqori qismining o'ng tomoni) esa magnet o'zak materialining magnetlanish  $\Phi = f(i_{op})$  egri chizig'i berilgan. 1-kvadrantda (pastki qismining o'ng tomoni) joylashgan magnetlovchi tok  $i_{op} = f(t)$  grafigini qurish uchun quyidagilar bajariladi.  $\Phi = f(t)$  grafigi absissa o'qida bir necha (1,2,3,...) nuqtalar olinadi. Ularga mos bo'lgan ordinata o'qidagi  $F$  qiymatlarini va 1-kvadrantda ularga mos kelgan  $i_{op}$  tokining qiymatlarini, so'ngra 4-kvadrantdagi  $i_{op} = f(t)$  funksiyani chizamiz.



1.23-rasm. Magnetlovchi tok grafigini (a) chizish va uni tashkil etuvchilarga (b) ajratish



Qurilgan  $i_{0p} = f(t)$  funksiyadan shu ma'lum bo'ladiki, magnit oqim  $\Phi = f(t)$  sinusoidal shaklda bo'lganda magnitlovchi tok  $i_{0p} = f(t)$  cho'qqisimon bo'lar ekan.

Grafik qurilishi jarayonni yengillashtirish maqsadida materialning magnitlanish  $\Phi = f(i_{0p})$  egri chizig'ida gisterezis quvvat isroflarini e'tiborga olinmadl.

Nosinusoidal bog'lanish  $i_{0p} = f(t)$  ni garmonik qatorga (sinusoidal tashkil etuvchilarga) yoyilgandan (1.23,b-rasm) so'ng shuni ko'ramizki, tok asosiy (birinchi) garmonikasi  $i_{01p}$  dan tashqari, uchinchi garmonik tashkil etuvchisi  $i_{03p}$  yaqqol ko'rinadi.

Masalan, yuqori legirlangan po'latdan yasalgan magnit o'zakli transformatorida induksiya  $V = 1,4$  Tl. bo'lsa, magnitlovchi tok uchinchi garmonikasining amplitudasi asosiy garmonika amplitudasining 30% tashkil etadi. Aytilganlar faqat yuksiz ishlash tokining reaktiv  $i_{0p}$  tashkil etuvchisiga taalluqlidir, chunki aktiv tashkil  $i_{0A}$  etuvchisi sinusoidaldir. Aksariyat,  $i_{0A}$  yuksiz ishlash toki  $I_0$  ning 10% dan oshmaydi, shuning uchun ma'lum aniqlik bilan yuksiz ishlash toki  $i_0 = f(t)$  o'zining reaktiv  $i_{0p} = f(t)$  tashkil etuvchisidan farq qilmaydi, deb olish mumkin.

### 1.10. Uch fazali transformator yuksiz ishlashiga chulg'amlar ulanishining ta'siri

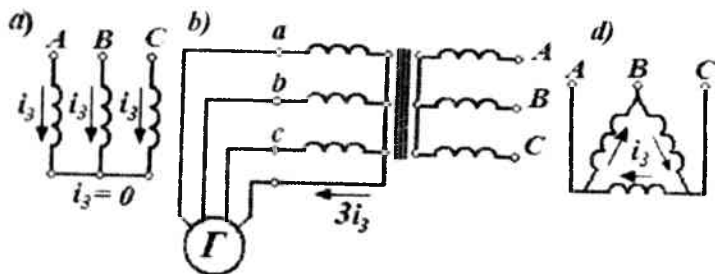
Uch fazali tizimda uchinchi garmonika toklarining tenglamasidan

$$\left. \begin{aligned} i_{A3} &= I_{3\max} \sin 3\omega t; \\ i_{B3} &= I_{3\max} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{3\max} \sin 3\omega t; \\ i_{C3} &= I_{3\max} \sin 3(\omega t + 120^\circ) = I_{3\max} \sin 3\omega t; \end{aligned} \right\} \quad (1.37)$$

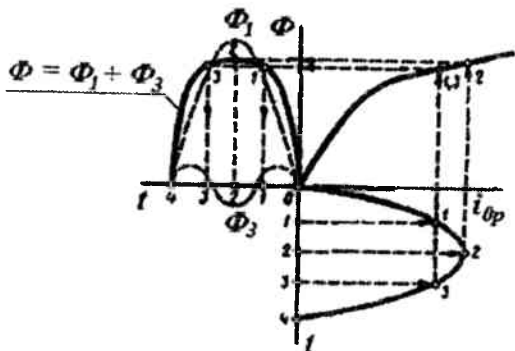
shuni ko'rish mumkinki, bu toklar ixtiyoriy vaqt onida fazalari bo'yicha mos keladi, ya'ni bir xil yo'nalishga ega. Ushbu xulosa

barcha uchinchi garmomikaga karrali bo'lgan garmonikalari – 3, 9, 15 va h.k.ga ham xosdir. Ushbu xulosa uch fazali toklarni transformatsiyalash jarayonlari uchun katta ahamiyatlidir.

Uch fazali transformatorlarning ba'zi sxemalari uchun yuksiz ishlash rejimi xususiyatlarini o'rganamiz.



1.24-rasm. Har xil ulangan chulg'amlar uchun uchinchi garmonika toklarining yo'nalishlari

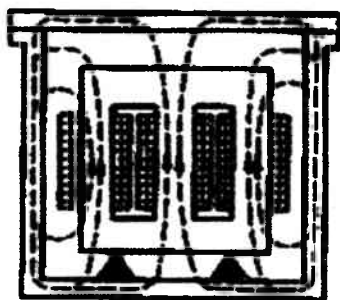


1.25-rasm. Magnitlovchi toki sinusoidal shaklda bo'lgan magnit oqim grafigini qurish

*Yulduzcha ulash.* Agar manba kuchlanishi transformatorning nol o'tkazgichsiz yulduzcha ulangan chulg'amlari tomoniga ulangan (1.24,a-rasm) bo'lsa, u holda uchinchi (va uchga karra) garmonika toklarining faza siljish burchaklari barcha faza chulg'amlarida mos

kelib, ular yig'indisi nolga teng bo'ladi. Bu nol o'tkazgichning mavjud bo'lmaganligi bilan tushintiriladi va demak, nol nuqtasidan chiqishning bo'lmaganligidir. Natijada uchinchi va unga karra bo'lgan garmonikalar o'zaro kompensatsiyalanadi va transformatorning magnitlovchi toki sinusoidal bo'ladi. Biroq, magnit o'zakdagi magnit oqimi nosinusoidal bo'ladi va yaqqol ko'rinadigan uchinchi garmonikasi bo'ladi (1.25-rasm).

Uchinchi garmonika magnit oqimlari uch sterjenli magnit o'zakda berk kontur hosil qila olmaydi.

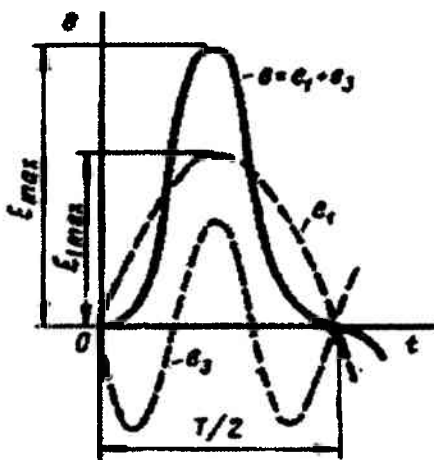


**1.26-rasm.** Uch sterjenli magnit o'zakda uchinchi garmonika magnit oqimi o'tish yo'li

Ular fazalari mos keladi va ular o'zaro qarama-qarshi yo'nalgan. Bu magnit oqimlar havo (moy) va bak metal devorlari orqali (1.26-rasm) berk kontur hosil qiladilar. Ushbu muhit  $F_3$  oqimga katta magnit qarshilik ko'rsatadi va uni susaytiradi. Shuning uchun faza chulg'amlarining  $F_3$  oqimi induktivlagan uchinchi garmonika EYUKlari kichik va aksariyat, ularning amplitudalari asosiy garmonika amplitudasining 5-7% tashkil etadi. Amalda uchinchi  $F_3$  garmonika magnit oqimi faqat yurma toklardan hosil bo'lgan quvvat isroflarini aniqlash uchungina hisoblanadi.

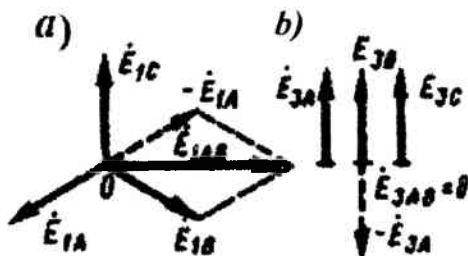
Masalan, magnit induksiyasi 1,4 Tl atrofida bo'lsa, bakdagi yurma toklardan quvvat isrofi, magnit o'zakdagi quvvat isroflarining 10% tashkil etadi, induksiya 1,6 Tl bo'lganda bakdagi isroflar 50-65% gacha ortadi.

Uchta bir fazali transformatorlardan tuzilgan uch fazali transformatorlar guruhi bo'lganda (1.20,a-rasm), alohida fazalar magnit o'zamlari magnit bog'lanmaganligi uchun barcha fazalar magnit o'qimi uchinchi garmonikasi o'z magnit o'zamlarida o'qadilar.



1.27-rasm. Chulg'amlari Y/ ulangan transformator guruhi faza EYKI

Bunda  $F_3$  ning qiymati  $F_1$  ning 15-20% gacha ortadi. Tarkibida asosiy garmonika  $F_1$  dan tashqari uchinchi garmonikasi ham bo'lgan nosinusoidal magnit o'qim faza chulg'amlarida nosinusoidal EYUK hosil qiladi.



1.28-rasm. Uch fazali transformator EYK asosiy (a) va uchinchi garmonika (b) vektor diagrammalari

$$\Phi = \Phi_1 \sin \omega t + \Phi_3 \sin 3\omega t \quad (1.38)$$

$$e = -w d\Phi / dt = \omega w \Phi_1 \sin(\omega t - \pi/2) + 3\omega w \Phi_3 \sin(3\omega t - \pi/2) = e_1 + e_3. \quad (1.39)$$

Katta chastotali  $3\omega$  magnit oqimi  $F_3$  chulg'amlarda keskin katta EYUK  $e_3$  hosil bo'lishiga sabab bo'ladi, u esa chulg'amlarda effektiv qiymati o'zgarmasa (1.27-rasm) ham, katta amplitudali EYUK hosil qiladi. Natijada chulg'amlar izolyatsiyasi uchun nojo'ya sharoitlar paydo qiladi.

Transformator guruhida uchinchi garmonika EYUK amplitudasi asosiy garmonika amplitudasiga nisbatan 45-65% gacha bo'ladi. Biroq shuni ta'kidlash kerakki, liniya EYUK (kuchlanishi) sinusoidal shaklda bo'lib qolaveradi va tarkibida uchinchi garmonika bo'lmaydi, chunki chulg'amni yulduzcha ulagandan so'ng faza EYUK  $e_{3A}$   $e_{3B}$  va  $e_{3S}$  lari fazalari mos bo'lib, liniya EYUKni hosil qilmaydilar.

Bu jarayonning sababi shundaki, chulg'amlar yulduzcha ulaganda liniya EYUK (kuchlanishlari) faza EYUKlarning farqi bilan aniqlanadi. Masalan, liniya EYUKning asosiy garmonikasi (1.28,a-rasm)

$$\dot{E}_{1AB} = -\dot{E}_{1A} + \dot{E}_{1B} = \sqrt{3}\dot{E}_{1A}.$$

Liniya EYUKlirining uchinchi va unga karrali bo'lgan garmonikalariga qolganda, ular fazalari mos bo'lgani sababli (1.28,b-rasm), quyidagi ifodadagidek bo'ladi

$$\dot{E}_{3AB} = \dot{E}_{3B} - \dot{E}_{3A} = 0.$$

Agar transformator birlamchi chulg'ami QK bo'lsa va uning nol klemmasi generator nol klemmasiga ulangan bo'lsa (1.24,b-rasm), u holda faza magnitlovchi toklari tarkibida uchinchi garmonika mavjud bo'ladi. Bu toklar fazalari mos bo'lib [(1.37)ga qarang], ular hammasi yoki transformatoridan generatorga, yoki teskari yo'nalgan bo'ladi. nol o'tkazgichda  $3i_3$  ga teng bo'lgan tok oqadi. Bunda transformator magnit oqimi va, demak fazalardagi EYUK ham sinusoidal bo'ladi.

Transformator biror tomoni (QK yoki YUK) chulgʻamlari uchburchak ulangan. Bunday ulanish xohishimizga eng mosdir, chunki yuqorida koʻrilgan kamchiliklardan holidir.

Faraz qilaylik, transformatorning birlamchi chulgʻamlari uchburchak ulangan boʻlsin. U holda uchinchi garmonika toki hech qanday toʻsiqsiz uchburchak ulangan faza chulgʻamlari berk konturida (1.24,v-rasm) oqadi. Agar magnitlovchi tok uchinchi garmonikasi mavjud boʻlsa, sterjenlardagi magnit oqimlar va, demak, faza EYUKlari sinusoidal boʻladi.

Agar transformator ikkilamchi chulgʻamlari uchburchak ulangan, birlamchi chulgʻam – yulduzcha ulangan boʻlsa, u holda ikkilamchi chulgʻamda induktivlangan EYUKning uchinchi garmonikasi, uchburchakning berk konturida tokning uchinchi garmonikasini hosil qiladi. Bu tok, magnit oʻzakda magnit oqimining uchinchi  $F_{23}$  garmonikasini hosil qiladi, uning yoʻnalishi  $i_{13}$  magnitlovchi tokdan hosil boʻlgan (Lens qoidsiga koʻra) oqim yoʻnalishiga teskari boʻladi. Natijada natijaviy uchinchi garmonika magnit oqimi  $\Phi_{p,13} = \Phi_{13} - \Phi_{23}$  sezilarli susayadi va transformator ish rejimiga amaliy taʼsir etmaydi.

### 1.11. Transformator almashtirish sxemasining parametrlarini tajriba usulida aniqlash

Yuqorida aniqlangan almashtirilgan elektr sxema (1.18,b-rasm) transformatorning barcha rejimlarida zarur boʻlgan aniqlikda tadqiqot qilish imkonini beradi. Quvvati 50 kV·A va undan yuqori boʻlgan transformator tavsiflarini uning yordamida aniqlash katta ahamiyatga ega, chunki bunday transformatorlarni bevosita eksperimental usulida aniqlash baʼzi texnik qiyinchiliklar bilan bogʻliq: elektr energiyani besamara sarf qilish, qimmatbaho va katta hajmli yuklantirish uskunalari zaruratligi.

Almashtirish sxema parametrlari  $Z_1 = r_1 - jx_1, Z_m = r_m - jx_m, Z_2 = r_2' - jx_2'$  ni hisoblash (transformatorni loyihalash jarayonida) yoki tajriba usullari yordamida aniqlash mumkin.

Quyida almashtirish sxema parametrlarini tajriba usuli bilan aniqlash tartibi keltirilgan. Uning uchun yuksiz ishlash (yu.i.) va qisqa tutashuv (k.t.) tajribalarini oʻtkazish zarur boʻladi.

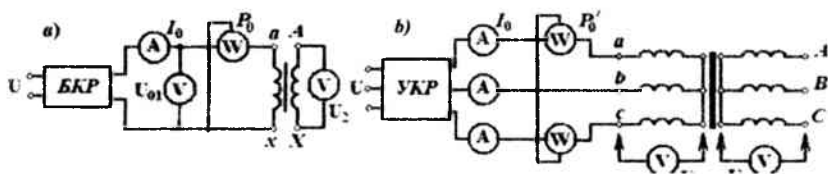
*Yuksiz ishlash tajribasi.* Yuksiz ishlash deb transformatorning shunday ishlash rejimi nazarda tutiladiki, unda birlamchi chulg'amga turli qiymatlarda kuchlanish ulab, ikkilamchi chulg'am uzilgan, ya'ni yuklanishga ulanmagan ( $Z_H = r_H - jx_H, I_2 = 0$ ) bo'ladi. Bunday holat uchun kuchlanishlar va toklar tenglamalari quyidagi shaklga keladi

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_0 x_1 + \dot{I}_0 r_1; \\ \dot{U}'_{20} &= \dot{E}'_2; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0. \end{aligned} \right\} \quad (1.40)$$

Transformator yuksiz ishlaganda foydali quvvat nolga teng bo'lgani uchun, transformatorning kirishidagi YU.i.quvvati  $P_0$  magnit o'zakdagi magnit quvvat isrofi (gisterezis va uyurma toklar isroflari)ga, hamda faqat birlamchi chulg'amdagi Joule (misdagi) isroflari  $I_0^2 r_1$  (chulg'amdagi tok oqishi sababli uning qizishi)ga sarf bo'ladi.

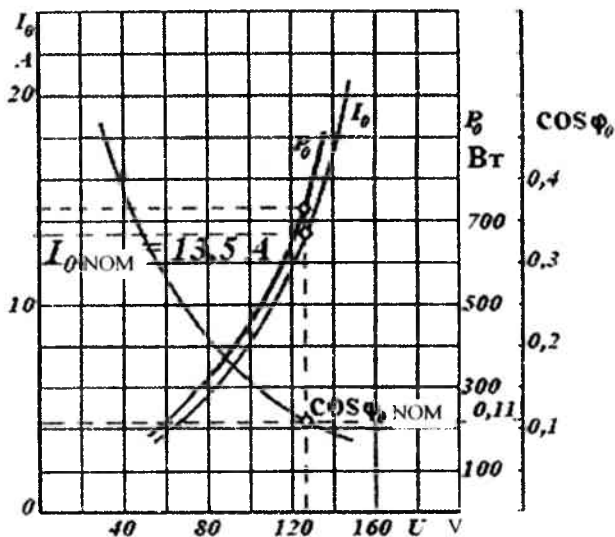
Biroq,  $I_0$  tokning kichik ekanligini e'tiborga olib (uning qiymati nominal tok  $I_{1nom}$  ning 2-10% dan katta emas), elektr  $I_0^2 r_1$  isroflarni e'tiborga olmaslik va transformatorning barcha YU.i.quvvati magnit o'zakdagi magnit quvvatlardan iborat, deb hisoblash mumkin. Shu sababli magnit isroflarni transformatorlarda YU.i.isroflari, deb qabul qilingan.

Transformator yuksiz ishlash tajribasi 1.29,a-rasmda keltirilgan sxemadan foydalamb bajariladi. Sxemaga ulangan elektr o'lchov asboblari bevosita birlamchi chulg'amga keltirilgan kuchlanish  $U_1$ , ikkilamchi chulg'amdagi kuchlanish  $U_2$ , YU.i.quvvati  $P_0$  va YU.i.toki  $I_0$ ni o'lchash imkoniyatini beradi.



**1.29-rasm.** Bir (a) va uch fazali (b) transformatorlar yuksiz ishlash tajribasi sxemalari

Bir fazali transformator birlamchi chulg'amiga, aksariyat, kuchlanishni 0 dan  $1,15 \cdot U_{1nom}$  gacha ravon oshirishi imkonini beruvchi bir fazali kuchlanish rostlagichi (BKR) dan beriladi. Bunda, taxminan bir hil oraliqda YU.i.toki oshirilib, barcha o'lovchov asboblari ko'rsatkichlari yozib olinadi. Shundan so'ng YU.i.tavsiflari: YU.i.toki  $I_0$ , YU.i.quvvati va YU.i.quvvat koeffitsiyenti  $\cos\phi_0$  ning kuchlanishga bog'liqligi (1.30-rasm) quriladi.



1.30-rasm. Transformator YU.i.tavsiflari

Bu tavsiflarning egri chiziqli ekanligi magnit o'zakning to'yingan holatiga bog'liq bo'lib, kuchlanish  $U_1$  ning ma'lum qiymatidagina yaqqol tus oladi.

Uch fazali transformatorning YU.i.tajribasi bajarilishida birlamchi chulg'am  $U_1$  kuchlanishi biror uch fazali kuchlanish rostlagichi UFKR (1.29,b-rasm) yordamida boshqariladi. Yuksiz ishlash tavsiflari uchchala faza tok va kuchlanishlarining o'rtacha qiymatlari uchun quriladi.

$$I_0 = (I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}) / 3; \quad (1.41)$$



$$U_1 = (U_{1A} + U_{1B} + U_{1C})/3. \quad (1.42)$$

Bir fazali transformator uchun quvvat koeffitsiyenti quyidagicha aniqlanadi.

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0'}{U_1 I_0}; \quad (1.43)$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0' + P_0''}{3U_1 I_0} = \frac{P_0}{3U_1 I_0}, \quad (1.44)$$

bunda  $P_0'$  va  $P_0''$  – bir fazali vattmetrlarning ko'rsatkichlari;  $U_0$  va  $I_0$  – kuchlanish va toklarning faza qiymatlari.

Yuksiz ishlash tajribasi natijasi bo'yicha quyidagilar aniqlanadi:

- transformatsiyalash koeffitsiyenti

$$k = U_1/U_{20} = w_1/w_2;$$

- kuchlanish nominal  $U_{Inom}$  bo'lgandagi YU.i.toki (nominalga nisbatan protsentda)

$$i_0 = (I_{0\ nom}/I_{1\ nom})100\%. \quad (1.45)$$

- YU.i.quvvat isrofi  $R_0$ .

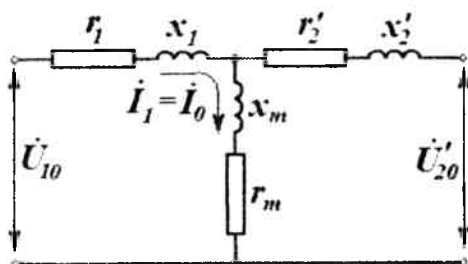
Uch fazali transformatorlarning YU.i.rejimida fazalardagi toklar teng emas va nosimmetrik tizimni tashkil qiladilar (§ 1.8ga qarang), shu sababli quvvat  $R_0$  ni ikki vattmetr usuli (1.29,b-rasmda keltirilganidek) yoki uch vattmetr usuli yordamida o'lchash zarur. Yu.I. rejimida 1.31-rasmdagi ahmashtirish sxemasining birlamchi shaxobchasi kuchlanishlar pasayuvi  $I_0(r_1 + jx_1)$  juda kichik miqdor bo'lganligi sababli, sezilarli xatoga yo'l qo'ymasdan, magnitlovchi shaxobcha parametrlarini hisoblashda quyidagi ifodalarni qo'llash mumkin:

$$z_m = U_1 / I_0; \quad (1.46)$$

$$r_m = z_m \cos \varphi_0; \quad (1.47)$$

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2} \quad (1.48)$$

Aksariyat, umum mo'ljal katta va o'rta quvvatli transformatorlarda nominal birlamchi kuchlanish bo'lganda YU.i.tokining miqdori  $i_0=10 \div 0,6\%$  dan oshmaydi. Agar nominal kuchlanish  $U_{1nom}$  ga mos bo'lgan amaldagi yu.i.toki  $I_{0nom}$  va YU.i.quvvati  $P_{0nom}$  katalogdagi shu transformator ko'rsatkichlaridan katta bo'lsa, bu shu transformatorning nosozligidan darak beradi: chulg'amlarda qisqa tutashgan o'ramlar mavjudligi yoki magnet o'zak plastinalarida tutashliklar borligidan darak beradi.



**1.31-rasm.** Transformatorning yuksiz ishlash almashtirish sxemasi

**Misol 1.4.** Yuqorida 1.30-rasmda uch fazali transformatorning YU.i.tavsiflari keltirilgan bo'lib, pasport qiymatlari quyidagicha:  $S_{nom}=100kV \cdot A$ ;  $U_{1nom}/U_{2nom}=6,3/0,22$  kV; chulg'amlar ulanish Y/Y. Transformator almashtirish sxemasi magnetlovchi shaxobchasining parametrlari  $z_m$ ,  $r_m$  va  $x_m$  hamda QK chulg'ami faza kuchlanishi  $U_{2f} = 127$  V nominal bo'lganda YU.i.toki aniqlansin.

**Yechish.** Magnetlovchi shaxobcha to'la qarshiligi (1.46) dan

$$z_m = U_{2f} / I_0 = 127 / 13,5 = 9,410 \Omega$$

Magnetlovchi shaxobcha aktiv qarshiligi (1.47) dan ,

$$r_m = z_m \cos \varphi_{0nom} = 9,41 \cdot 0,11 = 1,03 \text{ OM};$$

Magnitlovchi shaxobcha induktiv qarshiligi (1.48) dan

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2} = \sqrt{9,41^2 - 1,03^2} = 9,18 \text{ OM}.$$

Yuksiz ishlash toki (1.45) dan

$$i_0 = (I_0 / I_{2nom}) 100 = (13,5 / 264) 100 = 5,11\%,$$

bunda tokning QK chulg'amidagi nominal tok

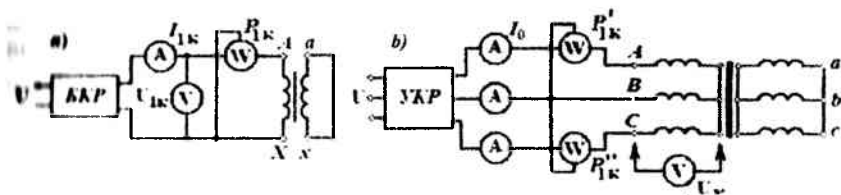
$$I_{2nom} = S_{nom} 10^3 / (\sqrt{3} U_{2nom}) = 10010^3 / (\sqrt{3} \cdot 220) = 264 \text{ A}.$$

bunda  $U_{2nom}$  — ikkilamchi kuchlanishning liniya qiymati.

*Qisqa tutashuv tajribasi.* Transformatorning qisqa tutashuvi (q.t.) shunday rejimki, unda ikkilamchi chulg'am klemmalari qisqa tutashgan bo'lib ( $z_n = 0$ ), bu chulg'amdagi kuchlanish nolga teng bo'ladi ( $U_2 = 0$ ). Ekspluatatsiya sharoitida, transformatorga to'la kuchlanish  $U_{1nom}$  ulanganda, qisqa tutashuv avariya rejimi hisoblanadi va transformator uchun katta xavf tug'diradi.

Q.t. tajribasi o'tkazishda bir fazali transformatorning QK chulg'ami qisqa tutashtiriladi (1.32,a-rasm), YuK chulg'amiga esa pasaytirilgan kuchlanish beriladi, kuchlanish rostlagichi bilan  $U_{K.nom}$  gacha asta oshirib, birlamchi ( $I_{1k} = I_{1nom}$ ) va ikkilamchi ( $I_{2k} = I_{2nom}$ ) chulg'amlardagi toklar nominal qiymatlarigacha yetkaziladi. Shu tariqa o'lchov asboblari ko'rsatkichiari yozib olinadi va q.t. tavsiflari: q.t. toki  $I_{1k}$ , q.t. quvvati  $R_k$ , va quvvat koeffitsiyentining kuchlanishga bo'lgan bog'liqligi quriladi (1.33-rasm).

Uch fazali transformator bo'lganda tajriba 1.32,b-rasmda keltirilgan sxema bo'yicha bajariladi, q.t. kuchlanishi va q.t. toki uchchala faza ko'rsatkichlarining o'rtacha arifmetik qiymatlaridan olinadi



1.32-rasm. Bir (a) va uch fazali (b) transformator qisqa tutashuv tajribasi sxemasi

$$U_k = (U_{kA} + U_{kB} + U_{kC})/3; \quad (1.49)$$

$$I_{1k} = (I_{kA} + I_{kB} + I_{kC})/3. \quad (1.50)$$

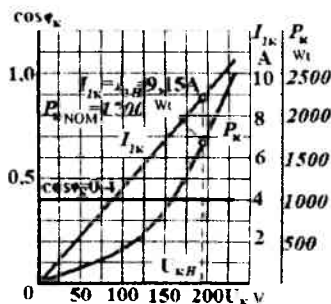
Q.t. dagi quvvat koeffitsiyenti quyidagicha aniqlanadi:

$$\cos\phi_k = R_k / (3 U_k I_{1k}), \quad (1.51)$$

bunda uch fazali transformator aktiv quvvati ikki vattmetr usuli bilan o'lanadi. Unda q.t. quvvati quyidagicha bo'ladi

$$P_k = P'_k + P''_k. \quad (1.52)$$

Ushbu (1.52) tenglikda  $P'_k$  i  $R_k''$  — bir fazali vattmetrlarning ko'rsatkichlari, Vt.



1.33-rasm. Transformator q.t. tavsifi

Qisqa tutashuv tajribasida transformator chulg'amlaridagi nominal tokni ta'minlaydigan kuchlanish qisqa tutashuv nominal kuchlanishi deyiladi va, aksariyat, nominal kuchlanishga nisbatan foizda hisoblanadi va transformator pasportida keltiriladi.

$$u_k = \frac{U_k}{U_{IH}} 100\% \quad (1.53)$$

Kuchli transformatorlar uchun  $u_k = (5-10) \cdot U_{IHOM}, \%$ .

Yuqorida keltirilgan (1.20) ga ko'ra, magnit o'zakdagi magnit oqim birlamchi kuchlanish  $U_I$ ga proporsionaldir. Ammo bu kuchlanish q.t. vaqtida  $10 \cdot U_{IHOM} \%$ dan oshmasligi sababli magnit oqim ham juda kichik bo'ladi. Bunday kichik magnit oqimni hosil qilish uchun shunchalar kichik magnitlovchi tok kerak bo'ladiki,  $I_{IH}$  tokiga nisbatan uni e'tiborga olmasa ham bo'ladi. Shuning uchun qisqa tutashgan transformatorning toklar tenglamasida quyidagicha bo'ladi almashtirish sxemasida esa magnitlovchi shaxobcha bo'lmaydi (1.34,a-rasm).

Bunday almashtirish sxemasi uchun kuchlanishlar tenglamasini quyidagicha yozish mumkin:

$$\dot{U}_k = \dot{I}_{I_k}(r_1 + r'_2) + j\dot{I}_{I_k}(x_1 + x'_2), \quad (1.55)$$

yoki

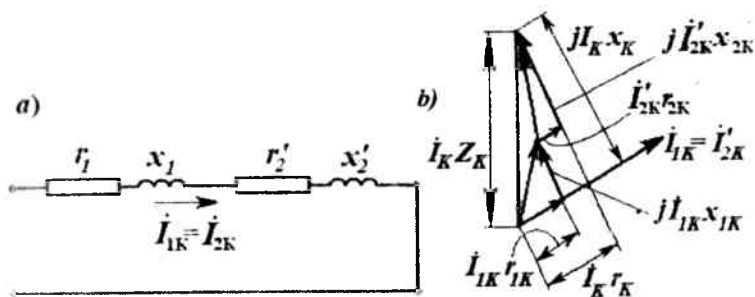
$$\dot{U}_k = \dot{I}_{I_k}r_k + j\dot{I}_{I_k}x_k = \dot{I}_{I_k}Z_k. \quad (1.56)$$

Qisqa tutashuvda transformatorning to'liq qarshiligi

$$Z_k = r_k + jx_k, \quad (1.57)$$

bunda  $r_k$  va  $x_k$  — qisqa tutashuv qarshiligi  $Z_k$ ning aktiv va reaktiv tashkil etuvchilari.

Transformatorning qisqa tutashuv toklar (1.54) va kuchlanishlar (1.55) tenglamalaridan foydalanib, q.t. tajribasi uchun vektor diagrammasini quramiz (1.34,b-rasm).



1.34-rasm. Transformatorning qisqa tutashuv almashtirish sxemasi (a) va vektor diagrammasi (b)

$$i_{1k} = -i'_{2k}, \quad (1.54)$$

Diagramma qurishni kuchlanish  $\dot{U}_k = \dot{I}_{1k} Z_k$  vektoridan boshlaymiz. So'ngra  $\dot{U}_k$  kuchlanishga nisbatan  $\varphi_k$  burchagi ostida tok vektori  $I_{1K} = -I_{2K}$  ni o'tkazamiz. Birlamchi, so'ngra ikkilamchi chulg'amlardagi kuchlanishlar pasayuvi  $\dot{I}_{1k} r_{1k}$ ,  $j\dot{I}_{1k} x_{1k}$  va  $\dot{I}_{2k} r_{2k}$ ,  $j\dot{I}_{2k} x_{2k}$  vektorlarini qo'yib, AOV to'g'ri burchakli uchburchakni hosil qilamiz. Bu uchburchak qisqa tutashuv uchburchagi deyiladi. Uchburchakning tomonlari quyidagilarga teng bo'ladi.

$$\begin{aligned} \overline{OB} &= \dot{I}_{1k} r_1 + \dot{I}'_{2k} r'_2 = \dot{I}_{1k} r_k = \dot{U}_{ka}; \\ \overline{BA} &= \dot{I}_{1k} jx_1 + j\dot{I}'_{2k} x'_2 = \dot{I}_{1k} x_k = \dot{U}_{kp}; \\ \overline{OA} &= \dot{I}_{1k} Z_k = \dot{U}_k. \end{aligned}$$

bunda

$$U_k = \sqrt{U_{ka}^2 + U_{kp}^2}, \quad (1.58)$$

bu yerda  $U_{ka}$   $U_{kp}$  — qisqa tutashuv kuchlanishining aktiv va reaktiv tashkil etuvchilari, V.

Qisqa tutashuvdagi almashtirish sxemasining to'liq, aktiv va induktiv qarshiliklari quyidagicha bo'ladi:

$$z_k = U_k / I_{1k}; \quad (1.59)$$

$$r_k = z_k \cos \varphi_k; \quad (1.60)$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \quad (1.61)$$

Aniqlangan qarshiliklar  $r_k$  va  $z_k$ , quvvat  $P_k$ , quvvat isrofi  $\cos \varphi_k$  miqdorlari ishchi harorat  $+75^{\circ}\text{S}$  ga keltirish kerak

$$r_{k75} = r_k \left[ 1 + \alpha (75 - \Theta_1) \right] \quad (1.62)$$

$$z_{k75} = \sqrt{r_{k75}^2 + x_k^2}; \quad (1.63)$$

$$\cos \varphi_{k75} = r_{k75} / z_{k75}; \quad (1.64)$$

$$u_{k75} = (I_{k75} z_{k75} / U_{1nom}) 100. \quad (1.65)$$

bu yerda  $r_k$  – chulg'am harorati  $\theta_1$  bo'lgan qisqa tutashuv aktiv qarshiligi;

$\alpha=0,004$  – mis va alyuminiy uchun qizishdan kengayish koeffitsiyenti.

Qisqa tutashuv tajribasida asosiy magnit  $F_{\max}$  maydoni birlamchi chulg'amda nominal kuchlanish bo'lgandagi magnit oqimning birnecha foizini tashkil etganligi sababli, q.t. dagi magnit isroflarini e'tiborga olmasa ham bo'ladi. Demak, transformatorning q.t. dagi olayotgan  $P_k$  quvvati to'laligicha chulg'amlardagi elektr isroflarga sarflanar ekan

$$P_k = I_{1k}^2 r_1 + I_{1k}^2 r_2 = I_{1k}^2 r_k.$$

Bundan so'ng, q.t. quvvati  $P_k$  ishchi harorat  $+75^{\circ}\text{S}$  ga keltiriladi

$$P_{k75} = 3I_{1k}^2 r_{k75}. \quad (1.66)$$

**Misol 1.5.** Quvvati 100 kV·A, liniya kuchlanishlari 6,3/0,22 V, chulgʻamlar ulanishi Y/Y (kuchlanish QK chulgʻamlarigi ulangan) uch fazali transformator q.t. tajribasi oʻlchov asboblari natijalari 1.1-jadvalda keltirilgan. Q.T. tavsiflarini quring:

- q.t. toki  $I_{lk}$  ning kuchlanish  $U_{lk}$  ga bogʻliqligi;
- q.t. quvvati  $P_k$  ning kuchlanish  $U_{lk}$  ga bogʻliqligi;
- q.t. quvvati koeffitsiyenti  $\cos \varphi_k$  ning kuchlanish  $U_{lk}$  ga bogʻliqligi.

**Yechish.** Quyida 1.1-jadvalda q.t. tajribasi natijasida olingan parametrlarning  $I_k = I_{1nom} = S_{nom} / (\sqrt{3}U_{1nom}) = 100 / (\sqrt{3} \cdot 6,3) = 9,15 A$  boʻlgandagi faza nominal q.t. kuchlanishi  $U_{1nom} = 190 B$  ga mos keluvchi qiymatlari keltirilgan.

1.1-jadval

No	$U_{kA}, B$	$U_{kB}, B$	$U_{kC}, B$	$I_{kA}, A$	$I_{kB}, A$	$I_{kC}, A$	$P_k, Bt$
1	64	63	62	2,9	3,0	3,1	190
2	105	105	103	5,1	5,0	5,0	513
3	147	146	145	7,2	7,0	7,2	1040
4	191	189	190	9,2	9,2	9,1	1780

Uch faza uchun q.t.dagi faza kuchlanishlarining oʻrtacha qiymatlari (1.49)dan

$$U_{knom} = (191 + 189 + 190) / 3 = 190 V.$$

Uch faza uchun q.t. tokining oʻrtacha qiymati (1.50)dan

$$I_{lk} = (9,2 + 9,2 + 9,1) / 3 = 9,15 A.$$

Q.t. tajribasidan transformator almashtirish sxemasi parametrlari:  
- (1.59) dan q.t. toʻla qarshiligi

$$z_k = U_{knom} / I_{1nom} = 190 / 9,15 = 20,8 \Omega;$$



- Q.t. quvvati ifodasidan  $P_k = I_{1k}^2 r_k$  q.t. aktiv qarshiligini aniqlaymiz

$$r_k = P_k / (3 I_1^2_{nom}) = 1780 / (3 \cdot 9,15^2) = 7,1 \text{ Om};$$

- Q.t. induktiv qarshiligi (1.61) dan

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{288^2 - 7,1^2} = 19,6 \text{ Om}$$

Tajribalar o'tkazilayotganda transformator chulg'amlarining harorati  $\theta_1 = 20^\circ\text{S}$ , deb hisoblab, hosil qilingan qiymatlarni chulg'amlar qizishi natijasida hosil bo'lgan harorat  $+75^\circ\text{C}$  ga keltiramiz: q.t. aktiv qarshiligi (1.62) ifodadan aniqlanadi

$$r_{k75} = 7,1 [1 + 0,004(75 - 20)] = 8,6 \text{ Om};$$

q.t. to'la qarshiligi

$$z_{k75} = \sqrt{8,6^2 + 19,6^2} = 21,5 \text{ Om}$$

q.t. quvvati (1.64) ifodadan aniqlanadi

$$R_{k75} = 3 I_{1k}^2 r_{k75} = 3 \cdot 9,15^2 \cdot 8,6 = 2160 \text{ Vt};$$

Quvvat koeffitsienti

$$\cos \varphi_{k75} = r_{k75} / z_{k75} = 8,6 / 21,5 = 0,40;$$

q.t. kuchlanishi (1.65) dan

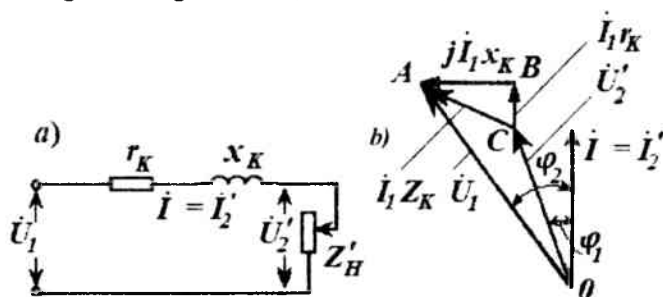
$$u_{k75} = (I_{1k} z_{k75} / U_{1mm}) 100 = (9,15 \cdot 21,5 \cdot \sqrt{3} / 6300) 100 = 5,4\%.$$

Shunday tartibda q.t. tokining boshqa qiymatlari uchun q.t. parametrlarini hisoblaymiz. Hisoblashlar natijalarini 1.2-jadvalga kiritamiz, so'ngra qisqa tutashuv tavsiflarini quramiz (1.33-rasm).

No	$U_k, V$	$I_{1k}, A$	$R_{k75}, VT$	$\cos\phi_{k75}$
1	65	3	230	0,40
2	108	5	620	0,40
3	152	7	1260	0,40
4	190	9,15	2160	0,40

### 1.12. Transformator soddalashtirilgan vektor diagrammasi

Yuklangan (ikkilamchi chulg'amiga yuk ulangan) transformator vektor diagrammasi (1.19-rasm) transformator parametrlarining nisbatini yaqqol ko'rsatadi. O'zining murakkabligi bilan bu diagrammalar amaliy hisoblashlarda qo'llanishi cheklangan. Diagrammani soddalashtirish va unga amalda ahamiyatli bo'lishi uchun, nominal qiymatlariga yaqin yuklanishlarda ishlaydigan kuchli transformatorlarda YU.i.tokini e'tiborga olinmaydi va  $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2$  deb hisoblanadi. Bunday hisoblashda xato bo'lishi joizdir, biroq  $\dot{I}_1$  va  $\dot{I}_2$  toklariga nisbatan  $\dot{I}_0$  toki juda kichik. Qabul qilingan farazlar natijasida, magnitlovchi shaxobcha qisqaradi, transformatorning almashtirish sxemasi faqat  $r_k = r_1 + r_2$  va  $x_k = x_1 + x_2$  soddalashgan holatga keladi (1.35,a-rasm).



1.35-rasm. Transformatorning soddalashtirilgan almashtirish sxemasi (a) va vektor diagrammasi (b)

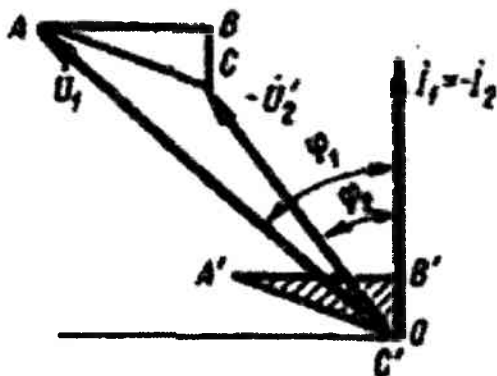
Soddalashtirilgan almashtirish sxemasiga mos ravishda soddalashtirilgan vektor diagrammasi (1.35,b-rasm) quriladi. Unda uchburchak AVS qisqa tutashgan uchburchak deyiladi va uning tomonlari quyidagilarga teng bo‘ladi:

$$BC = I_1 \cdot r_k;$$

$$CA = I_1 \cdot Z_k;$$

$$AB = I_1 \cdot x_k.$$

Transformatorning soddalashtirilgan almashtirish sxemasini (1.36-rasm) qurish uchun nominal kuchlanish  $U_{HOM}$ , tok  $I_{HOM}$ , quvvat koefitsiyenti  $\cos \varphi$  va q.t. parametrlari  $U_k$ ,  $U_{kA}$  va  $U_{kV}$  zarur bo‘ladi.



1.36-rasm. Soddalashtirilgan vektor diagrammani qurish

Soddalashtirilgan almashtirish sxemasini qurish tartibi quyidagicha bo‘ladi (1.36-rasm). Ordinata o‘qida  $I_1 = -I_2$  toklar vektori quriladi, so‘ngra unga  $\varphi_2$  burchak ostida kuchlanish vektori  $-U'_2$  quriladi. Q.t. uchburchagi AVS shunday quriladiki, unda  $c'$  nuqtasi koordinata boshi bilan, katet  $c'B'$ - ordinata o‘qi bilan mos bo‘lsin. So‘ngra uchburchak shunday suriladiki, unda  $c'$  nuqta  $-U'_2$  vektor uchi bilan, tomonlarini esa koordinata o‘qlariga parallel qoldiriladi. Ushbu qurilishlardan so‘ng koordinata o‘qlari boshidan (0 nuqtasi)

birlamchi (faza) kuchlanishi vektori  $\dot{U}_1$  o'tkaziladi, hamda kuchlanishi  $\dot{U}_1$  vektori bilan tok  $\dot{I}_1$  vektori orasidagi burchak  $\varphi_1$  aniqlanadi.

### 1.13. Transformatorning tashqi tavsifi

Transformator yuklanishining tebranishida uning ikkilamchi  $U_2$  kuchlanishi o'zgaradi. Bunga iqror bo'lish uchun transformatorning soddalashtirilgan sxemasidan foydalanish mumkin (1.37-rasm), unga ko'ra  $\dot{U}'_2 = \dot{U}_{1nom} - \dot{I}_1 Z_k$ .

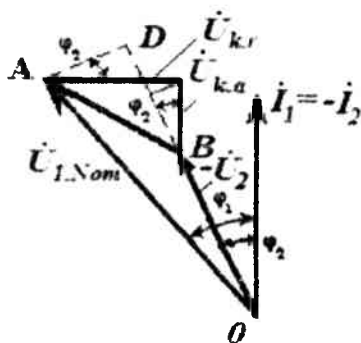
Yuklanish miqdori YU.i.rejimidan to nominal tokkacha ortganda kuchlanishning o'zgarishi transformatorning muhim tavsiflaridan biridir va quyidagi ifoda bilan aniqlanadi

$$\Delta U_{nom} = \frac{U_{1nom} - U'_2}{U_{1nom}} \cdot 100. \quad (1.67)$$

Kuchlanish o'zgarishi  $\Delta U_{nom}$  ni aniqlash uchun transformatorning soddalashtirilgan vektor diagrammasidan foydalanamiz, uning uchun quyidagi qo'shimcha chiziqlar o'tkazamiz (1.37-rasm). A nuqtadan  $-\dot{U}'_2$  vektor yo'nalishiga perpendikulyar o'tkazamiz va D nuqtani hosil qilamiz. Ma'lum farazlar qilib, ya'ni  $\overline{BD}$  kesma o'rniga

$\dot{U}_{1nom} - \dot{U}'_2 = \overline{BD} = \overline{BF} + \overline{FD}$  deb qabul qilamiz,

bunda  $\overline{BF} = U_{k.a} \cos \varphi_2$ ;  $\overline{FD} = U_{k.p} \sin \varphi_2$ , unda



1.37-rasm.  $\Delta U_{nom}$  ifodasini aniqlash uchun diagramma

$$U_{1nom} - U_2' = U_{k.a} \cos \varphi_2 + U_{k.p} \sin \varphi_2. \quad (1.68.)$$

Ikkilamchi kuchlanish (1.67) ni (1.68) e'tiborga olib o'zgartirsak quyidagi shaklga keladi

$$\Delta U_{nom} = (U_{k.a} \cos \varphi_2 + U_{k.p} \sin \varphi_2) 100 / U_{1nom}. \quad (1.69)$$

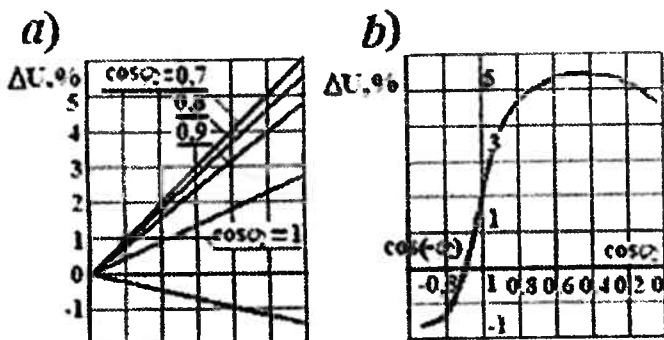
Quyidagi almashtirishlar qilamiz  $(U_{k.a}/U_{1nom})100=U_{k.a}$ ;  $(U_{k.p}/U_{1nom})100=U_{k.p}$ , u holda yuklanish ortganida transformator ikkilamchi kuchlanishining o'zgarish ifodasi bunday yoziladi

$$\Delta U_{nom} = u_{k.a} \cos \varphi_2 + u_{k.p} \sin \varphi_2. \quad (1.70)$$

Ifoda (1.70) transformator ikkilamchi chulg'aming faqat nominal yuklanishdagi kuchlanishlar pasayuvini aniqlash imkonini beradi.

Ikkilamchi chulg'am kuchlanish pasayuvining ixtiyoriy yuklanishdagi qiymatini hisoblash uchun (1.70) ifodaga yuklanish koefitsiyenti  $\beta = I_2 / I_{2nom}$  ni kiritish zarur bo'ladi

$$\Delta U = \beta(u_{k.a} \cos \varphi_2 + u_{k.p} \sin \varphi_2). \quad (1.71)$$

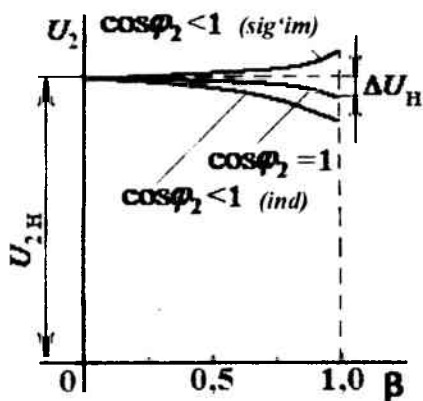


1.38-rasm.  $\Delta U_{nom}$  ning yuklanish miqdori (a) va yuk quvvati koefitsiyentiga bog'liqligi (b)

Hodu (1.71) dan shu ma'lum bo'ladiki, ikkilamchi kuchlanish  $\Delta U$  na faqat transformator yuklanishi ( $\beta$ ) qiymatiga, balki yuklanish xarakteriga ham bog'liq ekan.

1.38,a-rasmda  $\cos\varphi_2 = \text{const}$  bo'lgandagi  $\Delta U = f(\varphi_2)$  grafigi va 1.38,b-rasmda esa  $\beta = \text{const}$  bo'lgandagi  $\Delta U = f(\cos\varphi_2)$  funksiyaning grafigi keltirilgan. Bu grafikda  $\Delta U$  ning manfiy qiymatlari transformatorning YU.i.rejimidan sig'imli yuklanishlariga o'tgandagi kuchlanishning kuchayishiga mos keladi. Quyidagi bog'lanishlarni  $u_{k,u} = u_k \cos\varphi_k$  va  $u_{k,p} = u_k \sin\varphi_k$  nazarda tutib, yuklanishning ixtiyoriy o'zgarishidagi ikkilamchi chulg'am kuchlanishini hisoblashning yana bir usulini hosil qilamiz.

$$\Delta U = \beta u_k (\cos\varphi_k \cos\varphi_2 + \sin\varphi_k \sin\varphi_2) = \beta u_k \cos(\varphi_k - \varphi_2). \quad (1.72)$$



1.39-rasm. Transformatorni tashqi tavsifi

Ushbu ifoda (1.72) dan shu ma'lum bo'ladiki, kuchlanish o'zgarishining eng katta  $\Delta U = u_k$  qiymati faza burchaklarining  $\varphi_2 = \varphi_k$  teng bo'lganda erishiladi, unda  $\cos(\varphi_k - \varphi_2) = 1$ .

Transformator ikkilamchi kuchlanishi  $U_2$  ning yuklanish toki  $I_2$  ga bog'liqligi tashqi tavsif deyiladi. Shuni eslatish zarurki, kuchli transformatorlar ikkilamchi chulg'ami klemmlarida nominal kuchlanish deb YU.i.rejimida birlamchi chulg'am kuchlanishi

bo'lgandagi qiymatiga aytiladi. Tashqi tavsifning ko'rinishi (1.39-rasm) transformator yuklanish xarakteri ( $\cos\varphi_2$ )ga bog'liq. Transformatorning tashqi tavsifini  $\beta$  va  $\cos\varphi_2$  ning har xil qiymatlari uchun (1.72)dan aniqlash mumkin.

**Misol 1.6.** Berilgan qiymatlari yuqoridagi (§1.11) misollarda keltirilgan transformator nominal yuklanishi ( $\beta=1$ ) va quvvat koeffitsiyenti  $\cos\varphi_2=0,8$  ikki xil aktiv-induktiv va aktiv-sig'im yuklanish xarakteri uchun ikkilamchi kuchlanish pasayuvini hisoblang.

**Yechish.** Misol 1.5 ni yechishdan ma'lumki,  $u_{k75}=5,4\%$ ;  $\cos\varphi_{k75}=0,4$ ;  $\sin\varphi_{k75}=0,92$ . Ifoda (1.72) dan  $\cos\varphi_2=0,8$  va  $\sin\varphi_2=0,6$  bo'lganda quyidagini hosil qilamiz:

- aktiv-induktiv yuklanish uchun

$$\Delta U=5,4(0,4\cdot 0,8+0,92\cdot 0,6)=4,65\%;$$

- aktiv-sig'im yuklanish uchun

$$\Delta U=5,4[0,4\cdot 0,8+0,92\cdot (-0,6)]=-1,2\%.$$

Hisoblasblarning  $\beta=0\div 1,2$  dagi tahlil natijasida yuklanish xarakteri 0,7; 0,8; 0,9 va 1,0 uchun zarur qiymatlarni hosil qilamiz va 1.38,a-rasmdagi grafikni chizamiz.

Kuchlanish eng ko'p o'zgarishi aktiv-induktiv  $\cos\varphi_2 = \cos\varphi_{k75} = 0,4$  xarakterli va yuklanish koeffitsiyenti  $\beta = 1$  ga mos kelayapti  $\Delta U_{\max} = u_{k75} = 5,4\%$  (1.38,6-rasmga qarang).

## 1.14. Transformator quvvat isroflari va FIK

Elektr energiyasi transformatsiyalanishi jarayonida energiyaning bir qismi transformatoridagi energiya isrofini qoplashga yo'qoladi. Transformatoridagi quvvat isrofl elektr va magnit isroflardan iborat.

**Elektr isroflari.** Transformator chulg'amlaridan tok oqib o'tishi natijasida chulg'amlarning qizishi uchun sarf bo'ladi. Elektr isroflari  $R_E$  quvvati tokning kvadratiga proporsional bo'lib, birlamchi  $R_{E1}$  va ikkilamchi  $R_{E2}$  chulg'amlardagi elektr isroflari yig'indisidan aniqlanadi.

$$P_3 = P_{\gamma 1} + P_{\gamma 2} = mI_1^2 r_1 + mI_2^2 r_2 \quad (1.73)$$

bunda  $t$  — transformator fazalari soni (bir fazali transformator uchun  $t=1$ , uch fazalikk uchun  $t=3$ ).

Transformatorni loyihalashda elektr isroflar qiymatini (1.73) ifoda yordamida hisoblanadi, transformatorni yasash jarayonida esa bu isroflar chulg'am nominal toki bo'lganda q.t. quvvati  $P_{K.HOM}$  i (§1.11 ga qarang) o'lchangan tajriba natijalaridan olinadi

$$P_3 = \beta^2 P_{K.HOM} \quad (1.74)$$

bunda  $\beta$  — yuklanish koeffitsiyenti.

Elektr isroflari o'zgaruvchan isroflar deb nomlangan, chunki ular qiymatlari transformator yuklanishiga bog'liq.

**Magnit isroflari.** Magnit isroflari asosan magnit o'zakda sodir bo'ladi. Bu isroflarning sababi - magnit o'zakning davriy ravishda o'zgaruvchan magnit oqimi bilan qayta magnitlanishidir. Bu qayta magnitlanish magnit o'zakda ikki xil magnit isroflar keltirib chiqaradi:

- magnit o'zak ferromagnit materialida qoldiq magnetizmni yo'qotish uchun sarflangan energiya bilan bog'liq bo'lgan, gisterezis  $R_G$  isroflari;

- magnit o'zak plastinkalarida o'zgaruvchan magnit oqim tomonidan induktivlangan uyurma tok hosil qilgan uyurma toklar quvvat isroflari  $R_{UT}$

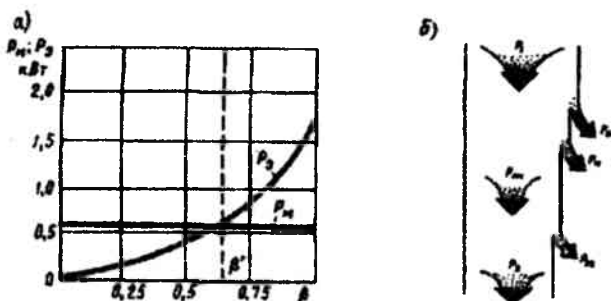
$$P_M = P_I + P_{YT}$$

Magnit isroflarni kamaytirish maqsadida transformator magnit o'zagi magnit-yumshoq ferromagnit materialdan – yupqa tunika-simon elektrotexnik po'latlardan yasaladi. Bunda magnit o'zak alohida bir biridan yupqa lak plenkasi bilan izolyatsiyalargan ingichka plastinalardan iborat shixtovkalangan paketlardan tuziladi.

Gisterezis magnit isroflari magnit o'zak qayta magnitlanishi chastotasiga ( $P_I \equiv f$ ), ya'ni o'zgaruvchan tok chastotasiga to'g'ri proporsional, uyurma toklardan magnit isroflari shu chastotaning



kvadratiga proporsionaldir  $P_{VT} \equiv f^2$ . Umumiy magnit isroflari chastotaning 1,3 darajasi miqdoriga proporsional  $P_M = f^{1,3}$  ekan.



1.40-rasm. Transformator isroflarining yuklanishga bog‘liqligi (a) va energetik diagrammasi (b)

Magnit isroflari sterjen va yarmolardagi magnit induksiyasiga ham bog‘liq bo‘lib, induksiya kvadratiga proporsionaldir ( $P_M \equiv B^2$ ). Birlamchi kuchlanish o‘zgarmas bo‘lsa ( $U_1 = \text{const}$ ), magnit isroflari o‘zgarmas bo‘ladi, ya‘ni transformator yuklanish darajasiga bog‘liq bo‘lmaydi (1.40,a-rasm).

Transformatorni loyihalashda magnit isroflar qiymatini solishtirma isroflardan - 1 kg yupqa listli elektrotexnik po‘latda, induksiyasi 1,0; 1,5 yoki 1,7 Teslo (Tl) va qayta magniflanish chastotasi 50 Gers (Hz) bo‘lgandagi solishtirma magnit isroflaridan olinadi

$$P_{\text{cor.M}} = P_{\text{yo}} (B/B_s)^2 (f/50)^{1,3} G, \quad (1.75)$$

bunda  $V$  - transformator sterjeni yoki yarmosidagi real magnit induksiyasi, Tl;  $V_x$  - qabul qilingan solishtirma magnit isroflariga mos bo‘lgan magnit induksiyasi, masalan,  $V_x = 1,0$  yoki 1,5 Tl.

Solishtirma magnit isroflari qiymatlari yupqa listli elektrotexnik po‘lat uchun GOST (davlat standarti)da keltiriladi. Masalan, qalinligi 0,5 mm, induksiyasi  $V = 1,5$  Tl, chastotasi  $f = 50$  Hz bo‘lgan 3411 markali po‘lat uchun solishtirma magnit isroflari  $P_{1,5/50} = 2,45$  Vt/kg ga teng.

Ishlab chiqarilgan transformator uchun magnit isroflar tajriba natijalaridan olinadi. Bunda birlamchi nominal kuchlanishdagi YU.i.quvvati o'lanadi  $P_{0, nom}$ .

Shunday qilib, tarmoqdan transformator birlamchi chulg'amiga kelayotgan  $R_1$  aktiv quvvat, qisman shu chulg'amlardagi elektr quvvat isroflariga  $R_{E1}$  aylanadi. Chulg'amlardagi o'zgaruvchan toklar hosil qilgan magnit o'zakdagi o'zgaruvchan magnit oqim magnit isroflar  $P_M$  ni hosil qiladi. Bundan qolgan quvvat  $P_{EM} = P_1 - P_{E1} - P_M$  elektromagnit quvvat deyiladi va ikkilamchi chulg'amga uzatiladi va qisman shu chulg'amdagi elektr isroflari  $P_{E2}$  ga sarflanadi. Aktiv quvvat  $R_2$  transformator yuklanishiga uzatilib, uning miqdori transformatorga kelayotgan birlamchi aktiv quvvat  $R_1$  dan quvvat isroflari yig'indisini ayirilganiga teng:  $R_2 = R_1 - \sum R$ . Bunda  $\sum R$  - transformatoridagi quvvat isroflari yig'indisi va ularning barchasi 1.40, b-rasm keltirilgan.

Transformatorning foydali ish koeffitsiyenti deb, ikkilamchi chulg'amning chiqish qismidagi aktiv quvvat  $R_2$  (foydali quvvat) ni birlamchi chulg'am kirishidagi aktiv quvvat  $R_1$  ga nisbatiga aytiladi:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{(P_1 - \sum p)}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_1} \quad (1.76)$$

Isroflar yig'indisi  $\sum P = P_{0, nom} + \beta^2 P_{k, nom}$ .

Transformator ikkilamchi chulg'ami klemmlaridagi aktiv qarshilik, (Wt)

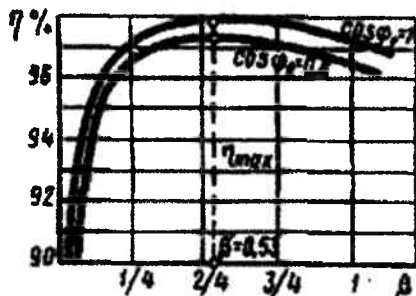
$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_{nom} \cos \varphi_2, \quad (1.78)$$

bunda  $S_{nom} = \sqrt{3} U_{nom} I_{nom}$  - transformatorning nominal quvvati, V.A;  $I_2$  i  $U_2$  — ikkilamchi liniya tok, A va kuchlanishlari, V.

$P_1 = P_2 + \sum p$  ekanligini e'tiborga olib, transformatorning foydali ish koeffitsiyenti (f.i.k.) uchun analitik ifodani aniqlaymiz.

$$\eta = \frac{\beta S_{nom} \cos \varphi_2}{\beta S_{nom} \cos \varphi_2 + P_{0, nom} + \beta^2 P_{k, nom}} \quad (1.79)$$

F.I.K. ifodasining tahlili shuni ko'rsatadiki, uning kattaligi transformator yuklanishining qiymatiga ham ( $\beta$ ), yuklanish xarakteri ( $\cos\varphi_2$ )ga ham bog'liq ekan. Bu bog'lanish 1.41-rasmdagi grafik bilan keltirilgan. F.I.K.ning maksimal qiymati yuklanishning shunday miqdoriga mos keladiki, unda magnit isroflari elektr isroflariga teng



1.41-rasm. Transformator F.I.K.ning yuklanishga bog'liqligi

$$R_{0nom} = \beta'^2 / R_{K\text{ NOM}},$$

bo'ladi. Bundan, F.I.K.ning maksimal qiymatiga mos keluvchi yuklanish koeffitsiyenti quyidagicha bo'ladi.

$$\beta' = \sqrt{P_{0nom} / P_{k\text{ nom}}}. \quad (1.80)$$

Aksariyat, transformator F.I.K.maksimal qiymatiga  $\beta'$  ning 0,45 ÷ 0,65 miqdorlarida erishadi. Ifoda (1.79)dagi R o'rniga  $\beta'$  ning qiymatini qo'ysak, transformator maksimal F.I.K.ni aniqlaymiz.

$$\eta = \frac{\beta S_{nom} \cos \varphi_2}{\beta S_{nom} \cos \varphi_2 + 2P_{0nom}} \quad (1.81)$$

Transformatorning quvvat bo'yicha F.I.K.dan tashqari, energiya bo'yicha F.I.K.dan ham foydalaniladi. Energiya bo'yicha F.I.K.yil davomida transformatoridan iste'molchiga uzatilgan energiya

miqdorini  $W_2$  (kVt·s), shu muddat ichida transformatorga tarmoqdan kelgan elektr energiya miqdori  $W_1$ ga nisbatiga aytiladi  $\eta = w_2 / w_1$ .

Transformatorning energiya bo'yicha F.I.K.transformator ekspluatatsiyasining samaradorli ekanligini ko'rsatadi.

**Misol 1.7.** Quvvati 100 kV·A, kuchlanishi 6,3/0,22 kW bo'lgan uch fazali transformatorning YU.i. (1.4-misolni ko'ring) va q.t. (1.5-misolga qarang) tajribalaridan foydalanib ( $R_{0,NOM}=605$  Wt,  $R_{k,NOM}=2160$  Wt) transformator F.I.K.va  $\eta = f(\beta)$  bog'lanish grafigini chizing. Hisoblashlarni quvvat koeffitsiyentining ikki qiymati 0,8 va 1,0 uchun bajaring.

**Yechish.** Ifoda  $\eta = f(\beta)$  ning grafigini qurish maqsadida F.I.K.ning birnecha qiymatlarini aniqlash uchun (yuklanish koeffitsiyenti  $\beta = 0,25; 0,5; 0,75$  va 1,0 uchun)  $\eta$  ning qiymatlarini hisoblaymiz. Hisoblash natijalarini 1.3-jadvalga kiritamiz.

1.3- jadval

$\beta$	$\beta^2 R_{knom}, \text{Wt}$	$\sum P, \text{Wt}$	F.I.K., %, $\cos\varphi_2$	
			$\cos\varphi_2=0,8$	$\cos\varphi_2=1$
0,25	134	739	96,5	97,0
0,50	540	1145	97,3	97,8
0,75	1210	1815	97,1	97,6
1,0	2150	2755	96,6	97,3

*Eslatma.* 1)  $\beta^2 = \sqrt{605/2160} = 0,53$  [ (1.80) ga qarang];

2)  $R_{0nom} = 605$  Wt.

F.I.K. ning maksimal qiymati (1.81) dan:

$\cos\varphi_2=0,8$  bo'lganda

$$\eta_{\max} = \frac{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 2 \cdot 605} = 0,972, \text{ yoki } 97,2\%;$$

$\cos\varphi_2=1,0$  bo'lganda

$$\eta_{\max} = \frac{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1,0}{0,53 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1,0 + 2 \cdot 605} = 0,978, \text{ yoki } 97,8\%.$$

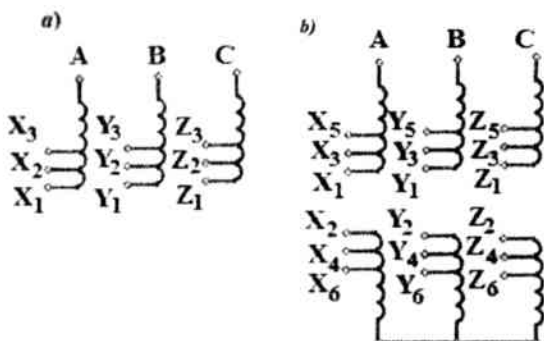
Shunday qilib, F.I.K.grafigi aktiv yuklanishda yuqoriroqda bo'lar ekan.

### 1.15. Transformator kuchlanishini rostdash

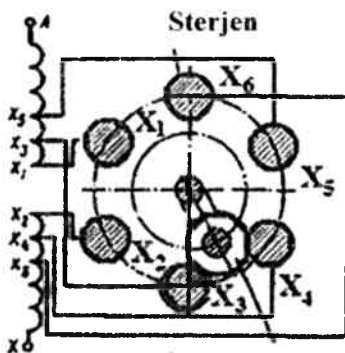
Pasaytiruvchi transformatorlar QK chulg'amlari rostlovchi ulanishlar (qo'shimcha o'ramlar) bilan jihozlanadi. Ular yordamida birlamchi chulg'am nominal kuchlanishi bo'lgandagi nominal ikkilamchi chulg'am kuchlanishiga mos kelgan transformatsiyalash koeffitsiyentidan farqli bo'lgan, boshqa qiymatlardagi transformatsiyalash koeffitsiyentlarini olish mumkin bo'ladi. Bunga ehtiyoj shundaki, pasaytiruvchi transformator ulanishi mumkin bo'lgan elektr uzatish liniyalari (EUL)ning har xil nuqtalarida, kuchlanish har xil bo'ladi. Bundan tashqari, yuklanishning tebranishi natijasida EUL ixtiyoriy nuqtasida kuchlanishlar o'zgarishi mumkin. Biroq, transformator ikkilamchi chulg'ami klemmalarida kuchlanishi doimo nominal bo'lishi shart ekanligi yoki nominaldan biroz farqli bo'lishi mumkin ekanligi sababli, transformatsiyalash koeffitsiyentini o'zgartirish zarurati tug'iladi.

Rostlovchi ulanishlar har bir faza chulg'amlarida yoki nol nuqtasi yaqiniga, yoki chulg'amning o'rtasiga qo'yiladi. Birinchi holatda har bir fazada uchadan ulanishlar qo'yiladi (1.42,*a*-rasm). Bunda, o'rtadagi ulanish transformator nominal transformatsiyalash koeffitsiyentiga mos keladi, qolgan ikki ulanish esa, nominal transformatsiyalash koeffitsiyentidan  $\pm 5\%$  ga farqli bo'ladi. Ikkinchi holatda chulg'am ikki qismga ajratiladi va oltita ulanishlar qilinadi (1.42,*b*-rasm). Bu shunday imkoniyat yaratadiki, nominal transformatsiyalash koeffitsiyentidan tashqari, yana to'rtta qo'shimcha qiymatlar – nominaldan  $\pm 2,5\%$  va  $\pm 5\%$  ga farqlanuvchi transformatsiyalash koeffitsiyentini beradi.

Chulg'amlardagi ulanishlarni rostdash, faqat transformatorni tarmoqdan uzilganda amalga oshirib (qo'zg'atishsiz rostlab ulash – QSRU) yoki yuklanishni uzmasdan rostlab - kuchlanishni boshqarish (YUUR) mumkin. QSRUda ulanishlarni ulash 1.43-rasmda keltirilgan. Har bir fazaga bittadan qayta ulagich o'rnatiladi, bunda barcha fazalarda bir vaqtda kontakt halqalarni aylanuvchi val, shtanga orqali transformator baki qopqog'idagi dastak (1.13,*b*-rasm) bilan ulangan.



1.42-rasm. Uch fazali transformator chulg'ami rostlovchi ulanishlarining sxemalari



1.43-rasm. QSRU kontaktlarini ulash

YUUR ishlash prinsipi chulg'am o'ramlari sonini chulg'amdagi qo'shimcha o'ramlardagi ulanishlar yordamida boshqarishga asoslangan. Biroq, bir qo'shimcha o'ramdan ikkinchi qo'shimcha o'ramga ulash tokning zanjirini uzmasdan bajariladi. Shu maqsadda chulg'amning har bir fazasini maxsus qayta ulovchi moslama bilan ta'minlanadi. Moslama reaktor R, ikki klemma K1 va K2, hamda ikki harakatlanuvchi P1 va P2 kontaktlardan iborat (1.44,a-rasm).

YUUR apparatlari transformator umumiy bakida joylashtiriladi, uning qayta ulanishi esa (boshqarish shchitidan) avtomatlashtiriladi.

YUUR li transformatorlar kuchlanishni, aksariyat, 6-10% ga rostlashga mo'ljallangan bo'ladi.

Transformator quvvati yanada oshganda YUUR apparatlari yanada qo'polroq va yanada kattalashgan bo'ladi.

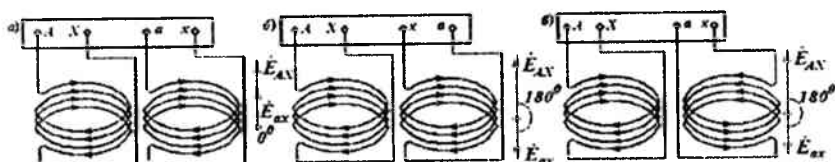
### Nazorat savollari

1. Transformatorning ishlash prinsipi qanday?
2. Nima uchun transformatorlar o'zgarmas tok tarmog'idan ta'minlanmaydi?
3. Transformatorning aktiv qismi nimalardan iborat? Ularning ishiatilishi va tuzilishi qanday?
4. Transformator nima vazifani bajaradi?
5. Transformator nominal tok va kuchlanishini qanday aniqlayadi?
6. Nima uchun yuklanish toki ortganda transformatorning birlamchi chulg'am toklari ham ortadi?
7. Keltirilgan transformator nima?
8. Vektor diagramma qurishning tartibini tushuntiring.
9. Keltirilgan transformator qanday sharoitlardi va nima uchun ikkilamchi chulg'am kuchlanishi EYUKdan katta bo'ladi?
10. Uch fazali transformator qanday YU.i.toklarining nosimmetrik ekaligini sababi nimada?
11. Uch fazali transformator chulg'amlarini  $\Delta/Y$  dan  $Y/\Delta$  ga qayta ulanganda liniya kuchlanishlari qanday va nima sababli o'zgaradi?

## 2-bob. TRANSFORMATOR CHULG'AMLAR ULANISH GURUHLARI VA TRANSFORMATORLARNING PARALLEL ISHLASHI

### 2.1. Transformatorning ulanish guruhlari

Shu vaqtgacha transformator vektor diagrammalarini qurishda YUK chulg'ami E.YU.K.  $\dot{E}_{AX}$  va QK chulg'ami E.YU.K.  $\dot{E}_m$  fazalari mos keladi, deb faraz qilib keldik. Bu faraz faqat transformatorning barcha chulg'amlari bir xil yo'nalishda o'ralgan va barcha chulg'amlar boshi va keti bir xil tartibda belgilangandagina haqiqiy bo'ladi (2.1,*a*-rasm).



**2.1-rasm.** Bir fazali transformator ulanish guruhlari:  
*a)*- 0 yoki 12-guruh; *b)*- 6-guruh; *d)*- 6-guruh. A-boshi; X-keti

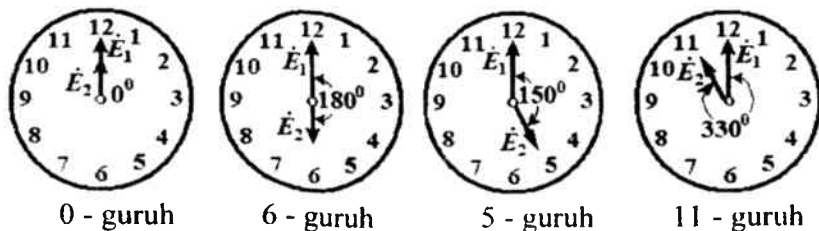
Agar transformator QK chulg'amining o'ralish yo'nalishi yoki *a* va *x* klemmlar o'rni almashtirilsa, (2.1,*b* va *v*-rasmlar), u holda E.YU.K.  $\dot{E}_{AX}$  va  $\dot{E}_{ax}$  vektorlari orasidagi burchak  $180^\circ$  ga o'zgaradi. YUK chulg'ami E.YU.K.  $\dot{E}_{AX}$  va QK chulg'ami E.YU.K.  $\dot{E}_m$  fazalari orsidagi burchakni ulanish guruhi deyiladi. Ushbu burchak  $0^\circ$  dan  $360^\circ$  gacha o'zgarganda, ulanish guruhlari orasidagi faza  $30^\circ$  ni tashkil etadi. Shu sababli, ulanish guruhlari 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 yoki 0-guruhlarini tashkil etadi.

QK chulg'ami liniya EYUK vektorining YUK chulg'ami liniya EYUK vektoriga nisbatan siljish burchagini aniqlash uchun transformator ulanish guruhini belgilovchi raqamni  $30^\circ$  ga ko'paytiriladi. Siljish burchagi YUK chulg'ami EYUK vektoriga nisbatan soat mili



yo'nalishi bo'yicha QK chulg'ami EYUK vektorigacha bo'lgan burchak bilan o'lchanadi. Masalan, 5 ulanish guruhi ko'rsatadiki, QK EYUK vektori fazasi bo'yicha YUK EYUK vektoridan  $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$  ga kechikar ekan.

Ulanish guruhining qabul qilingan belgilanishini yaxshi tushunish uchun soat mili bilan taqqoslash usulidan foydalanamiz. Bunda YUK chulg'ami EYUK vektorini soat milining 12 raqamiga qo'yilgan minut mili (strelkasi) deb, QK chulg'ami EYUK vektorini esa soat mili deb qabul qilamiz (2.2-rasm).



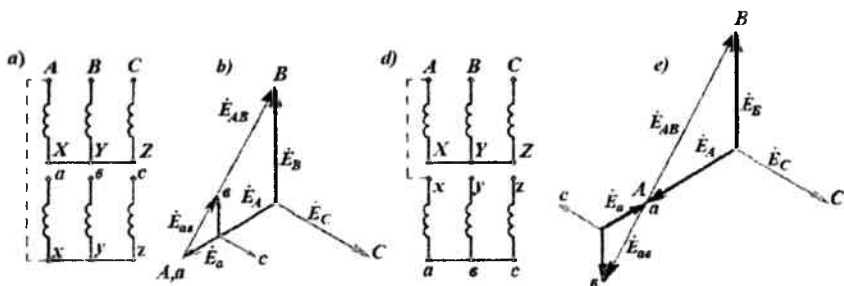
**2.2-rasm.** Ulanish guruhi belgisining soat mili bilan taqqoslash

Shuni ham e'tiborga olish zarurki,  $\dot{E}_1$  va  $\dot{E}_2$  vektorlarning fazalari mos bo'lishi, soat milining 12 bo'lganini ko'rsatishi, 12-guruh ekanligini emas, balki 0-guruh ekanligini anglatadi. Bundan tashqari, shuni unitmaslik zarurki, EYUK aylanuvchi vektorlarning musbat aylanish yo'nalishi deb, soat miliga teskari aylanishi qabul qilingan.

Shunday qilib, bir fazali transformatorlarda faqat ikki ulanish guruhi mavjud ekan:  $\dot{E}_1$  va  $\dot{E}_2$  vektorlarning fazalari mos bo'lgan 0-guruh bilan  $\dot{E}_1$  va  $\dot{E}_2$  vektorlari fazalari  $180^\circ$  ga siljigan 6-guruh. Bu guruhlardan Davlat Standarti tomonidan qabul qilgan ulanish guruhi faqat 6-guruhdir.

Uch fazali transformatorlar chulg'amlarini har xil ulash bilan 12 hil ulanish guruhlarini hosil qilish mumkin. Ulanish guruhlarini aniqlash uchun birlamchi va ikkilamchi chulg'amlarning bir xil belgilangan liniya EYUKlari orasidagi siljish burchagi orqali aniqlash qabul qilingan. Ulanish guruhlari haqida aniq tasavvurga ega bo'lish maqsadida "yulduz-yulduz" ulanish usulini ko'raylik (2.3, a-rasm). Faraz qilamiz, ikkala chulg'amlar fazalari bir hil yo'nalishda

o'ralgan va bir hil nomlangan faza chulg'amlari bir hil magnit sterjenlarida joylashgan, deb. Unda YUK va QK chulg'amlari faza EYUKning vektorlari 2.3,b-rasmdagidek fazasi bo'yicha mos bo'ladilar.  $\vec{E}_{AB}$  va  $\vec{E}_{ab}$  liniya EYUK vektorlari orasidagi burchak  $0^0$  ga teng. Unda  $\vec{E}_{AB}$  vektorni soat milining 12 raqamiga,  $\vec{E}_{ab}$  vektorni esa  $0^0$  burchak ostida qo'ysak, u 0 (12) raqamni ko'rsatadi, demak, keltirilgan ulanish 0-guruhni anglatar ekan, uning belgilanishi Y/Y-0 bo'ladi.



2.3-rasm. Uch fazali transformator 0-ulanish guruh sxemasi

Agar QK chulg'amida  $a, b, c$  klemmlarini  $x, u, z$  klemmlari bilan mos ravishda (ya'ni  $a$  ni  $x$  bilan,  $b$  ni  $u$  bilan va  $z$  ni  $c$  bilan) almashtirilsa, u holda bir hil nomlangan klemmlar, YUKlari  $180^0$  ga siljiydi.  $AV$  va  $av$  klemmlar orasidagi liniya EYUKlari  $\vec{E}_{AB}$  va  $\vec{E}_{ab}$  ham  $180^0$  ga siljigan bo'ladi va 6 - ulanish guruhi paydo bo'ladi. Sxemaning belgilanishi Y/Y-6 bo'ladi (2.3,d va e-rasmlar). Chulg'amlar "yulduz-uchburchak" ulanganda 11-guruh hosil bo'ladi. Agar QK chulg'amining boshi va keti o'zgartirilsa, EYUK vektorlari  $180^0$  ga siljiydi va 5-ulanish guruhi hosil bo'ladi.

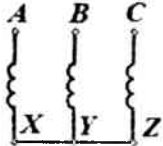
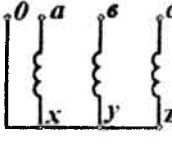
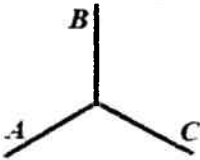
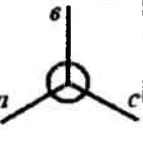
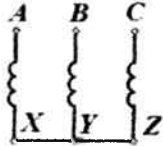
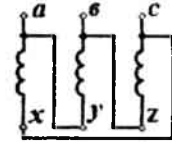
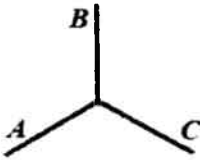
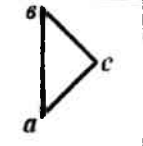
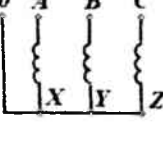
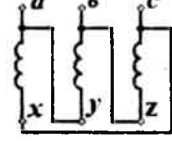
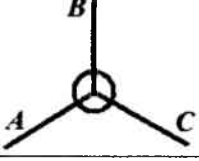
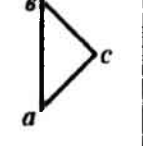
YUK va QK chulg'amlari bir hil Y/Y va  $\Delta/\Delta$  ulansa, yana to'rtta juft guruhlar, bir hil bo'lmagan ulanishlarda, masalan, Y/ $\Delta$  yoki  $\Delta/Y$ , yana to'rtta toq guruhlar hosil bo'ladi.

Keltirilgan va keltirilmagan ulanish guruhlarining hammasi amaliyotda ishlatilmaydi. Davlat standarti qo'llash uchun ruxsat etgan ulanish guruhleri quyidagi jadvalda keltirilgan.

Transformatorlar ishlab chiqarilishida yoki ekspluatatsiyasi jarayonida ulanish guruhlarini tajriba usulida tekshirish ehtiyoji paydo bo'ladi. Bunday tekshiruvlarning birnecha usullari mavjud, ammo eng ko'p qo'llaniladigan usul fazometr va voltmetr usulidir.

### Davlat standarti qo'llash uchun ruxsat etgan ulanish guruhlari

2.1-jadval

Chulg'amlar ulanish sxemasi		EYUK vektor diagrammasi		Shartli belgisi
YUK	QK	YUK	QK	
				Y / Y <sub>0</sub> - 0
				Y / Δ - 11
				Y <sub>0</sub> / Δ - 11

**Fazometr usuli.** Transformator YUK va QK chulg'amlarining liniya kuchlanishlari (EYUK) orasidagi faza siljish burchagini 2.4, a-rasmda keltirilganidek *bevosita* fazometr yordamida o'lchashga asoslangan. Fazometr U-U parallel chulg'amini YUK tomoniga, I-I ketma-ket chulg'amini esa QK tomoni liniya kuchlanishiga ulanadi. Ketma-ket chulg'amda tok miqdorini cheklash maqsadida, unga ketma-ket qo'shimcha  $p_{qo'sh}$  reostat ulanadi. So'ngra transformator tarmoqqa ulanadi. O'lchash amallarini qulaylashtirish uchun, fazometr to'liq ( $360^{\circ}$ ) shkalaga ega bo'lsin.

**Voltmetr usuli.** Ushbu usul liniya kuchlanishlari (EYUK) fazalari

siljishi burchagini o'lchash imkoniyatini bermaydi. Bu usul *bilvosita* usuli bo'lib, voltmeter yordamida YUK va QK chulg'amlarining bir hil nomlangan klemmalari orasidagi kuchlanish (EYUK)larni o'lchashga asoslangan.

Agar Y/Y-0 guruhi tekshirilayotgan bo'lsa (2.4.b-rasm), u holda A va a nuqtalar ulanib, V va b klemmlar orasidagi  $U_{b-B}$  hamda s va S klemmlar orasidagi  $U_{c-C}$  kuchlanishi o'lchanadi. Agar tahmin qilinayotgan ulanish guruhi Y/Y-0 asl ulanish guruhiga mos bo'lsa, u holda kuchlanish Voltda quyidagicha bo'ladi.

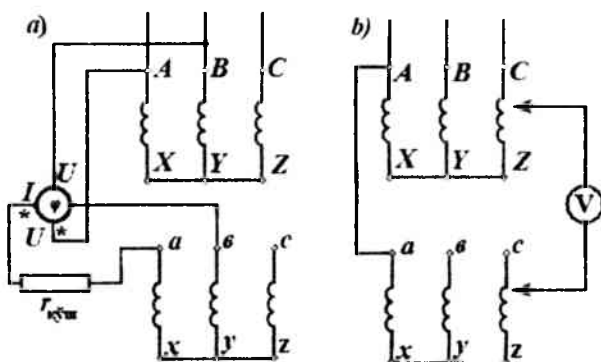
$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{ab}(k_T - 1), \quad (2.1)$$

bunda  $k_T = U_{AB} / U_{ab}$  - YUK va QK chulg'amlari kuchlanishlari (EYUK) nisbati, ya'ni liniya kuchlanishlari (EYUK) transformatsiyalash koeffitsiyenti.

Agar 6, 11 yoki 5 guruhlar tekshirilayotgan bo'lsa, o'lchiangan kuchlanishlar qiymatlarini tekshirish uchun quyidagi ifodalardan foydalaniladi.

Y/Y-6 ulanish guruhi

$$U_{b-B} = U_{c-C} = U_{xy}(k_T + 1); \quad (2.2)$$



2.4-rasm. Fazometr (a) va voltmeter (b) usullari yordamida ulanish Y/Y-0 guruhini tekshirish

Y/Δ-11 ulanish guruhi

$$U_{b-B} = U_{c-c'} = U_{ab} \left( 1 - \sqrt{3}k_1 + k_1^2 \right) \quad (2.3)$$

Y/Δ-5 ulanish guruhi

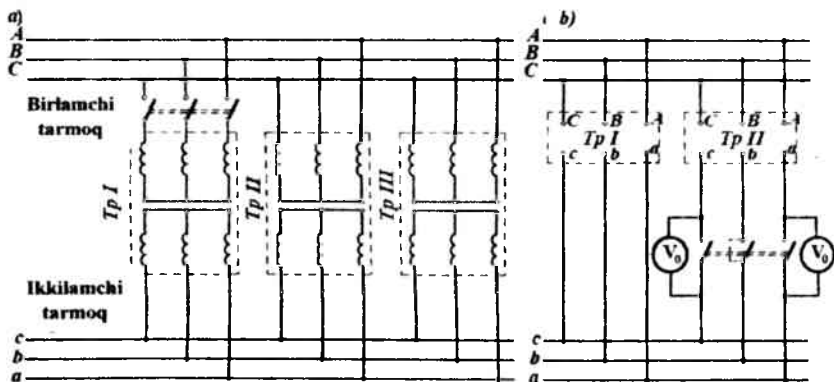
$$U_{b-B} = U_{c-c'} = U_{ab} \left( 1 + \sqrt{3}k_1 + k_1^2 \right) \quad (2.4)$$

bunda  $U_a$  va  $U_{xy}$  — YUK va QK chulg'amlari klemmlaridagi liniya kuchlanishlari, V.

Agar keltirilgan ifodalarda kuchlanishlar tengligi mos kelmasa, demak, transformator klemmlaridagi belgilashlarda xatolikka yo'l qo'yilgan bo'ladi.

## 2.2. Transformatorlarni parallel ishlashi

Ikki yoki birnecha transformatorlarning parallel ishlashi deb, birlamchi chulg'amlari ham, ikkilamchi chulg'amlari ham parallel ulangan holatdagi ishlash rejimlariga aytiladi. Transformatorlar parallel ulanganda transformatorlarning bir nomli klemmlari tarmoqning bir o'tkazgichiga ulanadi (2.5,a-rasm).



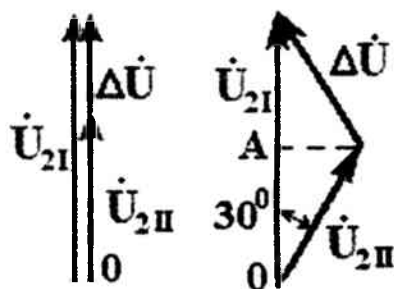
2.5-rasm. Transformatorlarni parallel ishlashga ulash

Bir transformator o'rniga umumiy quvvati teng bo'lgan birnecha transformatorlarni parallel ulab ishlatish, transformatorlardan birining avariya holatida, yoki uni ta'mirlash uchun o'chirilganda iste'molchini uzluksiz energiya bilan ta'minlash uchun zaruriy choradir. Iste'molchining yuklanish grafigi sutkaning har xil soatlarida o'zgaruvchan bo'lganida ham bu chorani qo'llash maqsadga muvofiq bo'ladi. Bunday holatlarda yuklanish quvvati kamayganda bir yoki birnecha transformatorlar o'chiriladi, qolganlari esa nominalga yaqin yuklanish bilan ishlaydi. Natijada transformator ishining ekspluatatsion ko'rsatkichlari (FIK,  $\cos\varphi_2$ ) birnecha qadar yuqori bo'ladi.

Parallel ishlayotgan ikki chulg'amli transformatorlar nominal quvvatlariga proporsional yuklanishda ishlashlarini ta'minlash uchun, quyidagi shartlarni bajarish shart bo'ladi:

### 2.2.1 Birlamchi chulg'amlar kuchlanishlari teng bo'lganda ikkilamchi kuchlanishlar ham teng bo'lishi shart

Boshqacha qilib aytganda, transformatorlar bir xil transformatsiyalash koeffitsiyentiga ega bo'lishi shart:  $k_I = k_{II} = k_{III} = \dots$ . Bu shartga amal qilmaslik natijasida, YU.i.rejimida ham, parallel ishlayotgan transformatorlar orasidagi ikkilamchi kuchlanishlar farqi  $\Delta\dot{U}$  (2.6,a-rasm) natijasida muvozanatlovchi tok hosil bo'ladi:



2.6-rasm. Parallel ulash shartlari bajarilmagandagi  $\Delta\dot{U}$  kuchlanish hosil bo'lishi

$$i_{\text{muvoza}} = \frac{\Delta U}{Z_{kl} + Z_{kll}} \quad (2.5)$$

bunda  $Z_{kl}$  va  $Z_{kll}$  — transformatorlar ichki qarshiliklari.

Transformatorlar yuklanganishida ular yuk toklari muvozanatlovchi toklar bilan qo‘shiladi. Natijada YU.i.ikkilamchi kuchlanishi yuqori bo‘lgan (transformatsiyalash koeffitsiyenti kichik) transformator o‘ta yuklangan bo‘lib, teng quvvatli, ammo transformatsiyalash koeffitsiyenti katta bo‘lgan transformator – kam yuklangan bo‘ladi. Transformatorning o‘ta yuklanishi joiz emasligi sababli, umumiy yuklanishni pasaytirish zarur bo‘ladi. Transformatsiyalash koeffitsiyentlari farqi ortgan sari, transformatorlar me’yorda ishlash imkoni mutloq bo‘lmaydi. Shunga qaramay, agar transformatsiyalash koeffitsiyentlarining farqi ular o‘rtacha qiymatlariga nisbatan  $\pm 0,5\%$ dan ortmasa, Davlat standarti transformatorlarning parallel ishlashiga ruxsat etadi:

$$\Delta k = [(k_I - k_{II})/k] 100\% \leq 0,5\% , \quad (2.6)$$

bunda  $k = \sqrt{k_I k_{II}}$  – transformatsiyalash koeffitsiyentlarining o‘rtacha geometrik qiymati.

## 2.2.2. Transformatorlar bir xil ulanish guruhiga ega bo‘lishi shart

Bu shart bajarilmaganda transformatorlar ikkilamchi liniya kuchlamishlari bir-biriga nisbatan fazalari siljib, transformatorlar zanjirilarida kuchlanishlar farqi  $\Delta U$  (2.6.b-rasm) paydo bo‘ladi. Uning ta’sirida juda katta muvozanatlovchi tok hosil bo‘ladi.

Masalan, agar ikki bir hil transformatsiyalovchi koeffitsiyenti bo‘lgan, ammo birining ulanish guruhi nolinci Y/Y-0, ikkinchisi - Y/ $\Delta$ -11 o‘n birinchi bo‘lsa, birinchi transformator liniya kuchlanishi  $U_{2I}$ , ikkinchisi  $U_{2II}$  dan  $\sqrt{3}$  marta katta bo‘ladi; bundan tashqari, shu kuchlanishlar vektorlari o‘zaro  $30^\circ$  ga siljigan bo‘ladi (2.6,b-rasm). Bunday vaziyatda transformator ikkilamchi zanjirida kuchlanishlar farqi  $\Delta U$  hosil bo‘ladi.

Kuchlanishlar  $\Delta U$  farqini aniqlashni o'quvchiga havola etamiz. U shunday katta muvozanatlovchi tok hosil qiladiki, uning qiymati nominal kuchlanish ta'siridagi qisqa tutashuv tokiga, ya'ni nominal tokdan 15-20 marta katta bo'ladi.

### 2.2.3. Transformatorlar bir xil q.t. kuchlanishiga ega bo'lishi zarur

Q.t. kuchlanishi tengligi  $u_{kl} = u_{kII} = u_{kIII} = \dots$  shartining bajarilishi, iste'molchi yuklanishining umumiy quvvati, barcha transformatorlarga ularning nominal quvvatlariga proporsional ravishda taqsimlanishini ta'minlash uchun zarur. YU.i. tokini juda kichik degan faraz bilan, parallel ulangan transformatorlar sxemalarini q.t. parametr  $z_{kl}$  va  $z_{kII}$  laridan iborat almashtirish sxemasi bilan ifodalaymiz. Ma'lumki, parallel shaxobchalardagi toklar qarshiliklarga teskari proporsional taqsimlanadilar:

$$\frac{I_{I}}{I_{II}} = \frac{Z_{kII}}{Z_{kl}}. \quad (2.7)$$

Tenglik (2.7)ning ikkala qismlarini  $(I_{II} U_{II}) / (I_{I} U_{I})$  ga ko'paytirib, chap tomonini  $U_{nom} / U_{nom}$  ga va o'ng tomonini 100/100 ga ko'paytirib, quyidagini hosil qilamiz:

$$\frac{I_{I} I_{II} U_{nom} U_{nom}}{I_{II} I_{I} U_{nom} U_{nom}} = \frac{Z_{kII} I_{II} U_{nom} 100}{Z_{kl} I_{I} U_{nom} 100}.$$

Hosil bo'lgan tenglikni o'zgartirib,  $I_{I} U_{nom} = S_{I}$ , va  $I_{II} U_{nom} = S_{II}$  [V·A] - birinchi ikkinchi transformatorlar yuklanishi ekanligini;  $I_{I} U_{nom} = S_{I}$  va  $I_{II} U_{nom} = S_{II}$  - shu transformatorlarning nominal quvvatlari, V·A;  $(I_{I} Z_{kl} / U_{nom}) 100 = u_{Ik}$  va  $(I_{II} Z_{kII} / U_{nom}) 100 = u_{IIk}$  — transformatorlar q.t. kuchlanishlari ekanligini e'tiborga olib, quyidagini hosil qilamiz

$$(S_{I} / S_{INOM}) (S_{II} / S_{IINOM}) \quad (2.8)$$



yoki

$$S'_{II}/S'_{II}=u_{kII}/u_{kI}, \quad (2.9)$$

bunda  $S'_{II}=S_{II}/S_{II\text{NOM}}$ ,  $S'_{II}=S_{II}/S_{II\text{NOM}}$  — mos ravishda birinchi va ikkinchi transformatorlarning nisbiy quvvatlari (yuklanishlari).

Ifoda (2.9) shu ma'lum bo'ladiki, parallel ishlayotgan transformatorlarning nisbiy quvvatlari ularning q.t. kuchlanishlariga teskari proporsional bo'lar ekan. Boshqacha qilib aytganda, parallel ishlayotgan transformatorlarning q.t. kuchlanishlari teng bo'lmasa, kichik q.t. kuchlanishi ( $u_k$ ) bo'lgan transformator ko'proq yuklanish olar ekan, katta  $u_k$  ga ega bo'lgani esa kamroq yuklanar ekan. Natijada, bu bir transformatorning o'ta yuklanishiga, ikkinchisi esa kam yuklanish olishiga sabab bo'laar ekan. Transformator o'ta yuklanishining oldini olish uchun umumiy yuklanishni pasaytirish kerak ekan. Shunday qilib, q.t. kuchlanishlarning teng bo'lmasligi parallel ishlayotgan transformatorlarning to'liq quvvat bilan ishlashiga yo'l qo'ymas ekan.

Umuman, parallel ishlaydigan transformatorlarning bir hil q.t. kuchlanishi bo'lishini ta'minlash imkoni doimo ham bo'lavermas ekanligini nazarda tutib, Davlat standarti q.t. kuchlanishlarining o'rtacha arifmetik miqdoridan 10% ga ko'p bo'lmagan farq bilan har hil q.t. kuchlanishli transformatorlarning ishlashiga ruxsat etadi. Transformator q.t. kuchlanishlari qanchalar katta bo'lsa, transformatorlar quvvati farqi shunchalar katta bo'lishi kerak. Shu sababli, Davlat standarti parallel ishlaydigan transformatorlarning quvvatlari 3:1 dan katta bo'lmasligini tavsiya etadi.

Ushbu uch shartlardan tashqari, transformatorlarni parallel ishga tushirishdan avval fazalar ketma-ketligi mos ekanligini tekshirish zarur. Fazalar ketma-ketligi barcha transformatorlarda bir hil bo'lishi shart.

Ushbu shartlarni bajarish transformator fazirovkasini tekshirish bilan bog'liq — uning mohiyati shundaki, ulagich (rubilnik)da qarama-qarshi (ya'ni rubilnik yoqilganda ulanadigan klemmalar) joylashgan klemmalarda (2.5,b-rasmdagidek) o'tkazgich (punktir chiziq) va nol voltmetrlari bilan ulanmagan klemmalar juftliklari orasidagi kuchlanishlar o'lchanadi. Agar transformatorlar ikkilamchi kuchlanishlari teng bo'lsa, ulanish guruhleri bir xil va faza ketma-ketliklari bir xil

bo'lsa, u holda voltmترلar  $V_0$  ko'rsatkichlari nolga teng bo'ladi. Bunda transformator rubilnigini ulash mumkin. Agar voltmetr  $V_0$  biror miqdorni ko'rsatsa, u holda qanday shart bajarilmayotganligini aniqlash zarur. Bu shart buzilishini bartaraf etib, qaytadan fazirovkani tekshirish zarur. Shuni e'tiborda tutish zarurki, fazalar ketma-ketligi buzilgan bo'lsa, voltmetr ko'rsatkichlari liniya kuchlanishiaridan ikki marta katta ko'rsatadi. Buni voltmerni tanlashda e'tiborga olib, voltmetr shkalasi liniya kuchlanishidan ikki marta katta bo'lishini ta'minlash kerak.

Parallel ishlayotgan transformatorlar yuklamalarining umumiy quvvati  $S$  shu transformatorlar nominal quvvatlari yig'indisidan kichik bo'lishi shart .

Parallel ishlayotgan transformatorlar orasida yuklanishlar taqsimlanishi quyidagicha aniqlanadi:

$$S_x = S \cdot S_{nom,x} / ([u_{kx} \sum (S_{nom,i} / u_{kx})]), \quad (2.10)$$

bunda  $S_x$  – parallel ishlayotgan transformatorlardan birining yuklanishi,  $kV \cdot A$ ;  $S$  – parallel ishlayotgan guruhning umumiy yuklanish quvvati,  $kV \cdot A$ ;  $u_{kx}$  – ushbu transformatorning q.t. kuchlanishi, %;  $S_{nom,x}$  – ushbu transformatorning nominal quvvati,  $kV \cdot A$ .

Ifoda (2.10) dagi yig'indi quyidagicha hisoblanadi.

$$\sum (S_{nom,x} / u_{kx}) = (S_{nom1} / u_{k1}) + (S_{nom2} / u_{k2}) + \dots \quad (2.11)$$

**Misol 2.1.** Uchta bir xil ulanish guruhlariga ega bo'lgan uch fazali transformatorlar parallel ulanib, quvvati  $5000 \text{ kV} \cdot A$  bo'lgan umumiy yuklanishga (2.5, a-rasm) ulangan. Transformatorlar quyidagi parametrlarga ega:  $S_{nomI} = 1000 \text{ kV} \cdot A$ ,  $i_{kI} = 6,5\%$ ,  $S_{nomII} = 1800 \text{ kV} \cdot A$ ,  $i_{kII} = 6,65\%$ ,  $S_{nomIII} = 2200 \text{ kV} \cdot A$ ,  $i_{kIII} = 6,3\%$ . Har bir transformator yuklanishini hisoblang.

**Yechish.** (2.11) dan quyidagini aniqlaymiz:

$$\sum (S_{nom,x} / i_{kx}) = 1000 / 6,5 + 1800 / 6,65 + 2200 / 6,3 = 775.$$

(2.10) dan har bir transformatorning yuklanishini aniqlaymiz.

$$S_I = 5000 \cdot 1000 / (6,5 \cdot 775) = 995 \text{ kV} \cdot A;$$

$$S_{II} = 5000 \cdot 1800 / (6,65 \cdot 775) = 1755 \text{ kV} \cdot A;$$

$$S_{III} = 5000 \cdot 2200 / (6,3 \cdot 775) = 2250 \text{ kV} \cdot \text{A},$$

ya'ni, uchunchi transformator  $[(2250 - 2200)/2200]100 = 2,3\%$  ga o'ta yuklangan.

Ushbu o'ta yuklanganlikni bartaraf etish uchun tashqi yuklanishni 2,3% ga, ya'ni  $S' = S - 2,3S/100 = 5000 - 2,3 \cdot 5000/100 = 4885 \text{ kV} \cdot \text{A}$  qisqartirish kerak ekan.

Bu holatda transformatorlar umumiy quvvati faqat 97,7% ga foydalanilgan bo'lar edi.

### Nazorat savollari

1. Ulanish guruhi nima va u qanday belgilanadi?
2. Davlat standarti tomonidan qanday ulanish guruhlari tayinlangan?
3. Asosiy ulanish guruhidan qanday qilib uning hosilalarini olish mumkin?
4. Agar 0-ulanish guruhi o'rniga 11-guruh hosil qilinsa, liniya kuchlanishlari nisbati qanday o'zgaradi?
5. Transformatorni parallel ulash uchun qanday shartlarni bajarish zarur?
6. Transformator fazirovkasi nima va u qanday bajariladi?

### 3-bob. UCH CHULG'AMLI TRANSFORMATORLAR VA AVTOTRANSFORMATORLAR

#### 3.1. Uch chulg'amli transformatorlar

Uch chulg'amli transformatorlarda har bir fazaga uchtadan chulg'am to'g'ri keladi, ya'ni har bir sterjenda uchtadan chulg'am mavjud. Bunday transformatorning nominal quvvati deb, eng katta quvvatga yuklangan chulg'am quvvati qabul qilinadi. Boshqa ikki chulg'amlarning tok, kuchlanish va qarshiliklari shu quvvati eng katta bo'lgan chulg'am qiymatlariga keltiriladi. Uch chulg'amli transformatorning ishlash prinsipi, umuman olganda, oddiy ikki chulg'amli transformator ishlash prinsipidan farq qilmaydi.

Uch chulg'amli transformatorlarda bitta birlamchi va ikkita ikkilamchi chulg'amli, hamda ikkita bir chulg'amli va bitta ikkilamchi chulg'amli transformatorlar mavjud.

Nisbatan keng tarqalgan bitta hirlamchi chulg'amli transformatorlar asosiy tenglamalari, ishlash xususiyatlari va qo'llanish sohalari ko'raylik (3.1,*a*-rasm). Bu transformatorning birlamchi (quvvati katta) chulg'ami magnitlovchi bo'lib, magnit o'zakda magnit oqimni hosil qiladi, u qolgan ikki chulg'amlarni kesib o'tadi va ularda  $\vec{E}_2$  va  $\vec{E}_3$  EYUKlarni hosil qiladi. Ikki chulg'amli transformatorga o'xshash, uch chulg'amli transformator uchun MYUK tenglamasini yozamiz.

$$\vec{I}_1 w_1 + \vec{I}_2 w_2 + \vec{I}_3 w_3 = \vec{I}_0 w_1. \quad (3.1)$$

Ifoda (3.1)ni  $w_1$  ga bo'lib, toklar tenglamasini hosil qilami

$$\vec{I}_1 + \vec{I}'_2 + \vec{I}'_3 = \vec{I}_0, \quad (3.2)$$

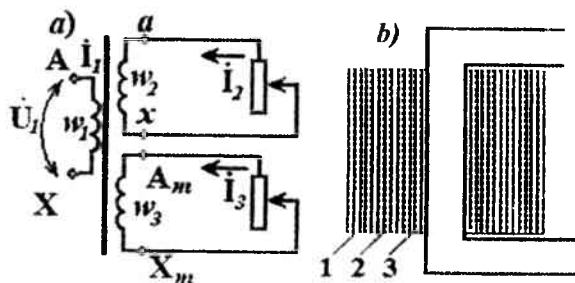
$$\vec{I}'_2 = \vec{I}_2 / k_{12}; \vec{I}'_3 = \vec{I}_3 / k_{13} \quad (3.3)$$

bunda  $k_{12}=w_1/w_2$  — ikki chulg'am  $w_1$  va  $w_2$  orasidagi transformatsiyalash koeffitsiyenti;  $k_{13} = w_1/w_3$  —  $w_1$  va  $w_3$  chulg'amlar orasidagi transformatsiyalash koeffitsiyenti.

Yuksiz ishlash tokini e'tiborga olmagan holda, uch chulg'amli transformatorning soddalashtirilgan toklar tenglamasini olamiz.

$$\dot{I}_1 \approx -(\dot{I}'_2 + \dot{I}'_3). \quad (3.4)$$

Uch chulg'amli transformatorni qo'llashning iqtisodiy asoslanishini quyidagicha izohlash mumkin. Birinchidan, uch chulg'amli transformatorni ikkita ikki chulg'amli transformator o'rninga qo'yish mumkin. Ikkinchidan, (3.4)dan ko'rinadiki, uch chulg'amli transformatorning birlamchi toki keltirilgan ikkilamchi toklarning arifmetik emas, balki geometrik yig'indisiga teng. Bu tenglikni e'tiborga olib, hamda ikkilamchi chulg'amlardagi yuklanish nominal qiymatiga bir vaqtda erishmasligi uchun, birlamchi chulg'amni ikkala ikkilamchi chulg'amlar nominal quvvatlarining arifmetik yig'indisidan kichik-roq quvvatga hisoblanadi.



3.1-rasm. Bitta birlamchi va ikkita ikkilamchi chulg'amli uch chulg'amli transformator

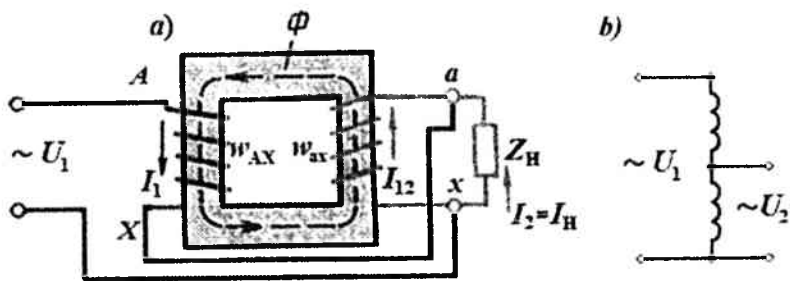
Uch chulg'amli transformatorning chulg'amlari sterjenlarda yakka o'qli ustma-ust konsentrik (3.1.b-rasm) joylashtiriladi, bunda ikkilamchi chulg'amlarni birlamchi chulg'amning ikki tomoniga joylashtirish maqsadga muvofiq bo'ladi; bunda birlamchi chulg'am

2. ikkilamchi - 1 va 3 chulg'amlar bo'ladi. Ushbu holatda ikkilamchi chulg'amlarni o'zaro ta'siri susayadi.

Yirik elektr stansiyalarning uch chulg'amli transformatorlarida ba'zan ikkita birlamchi (ularning har biriga generator ulanadi) va bitta ikkilamchi chulg'am bo'ladi (unga yuqori kuchlanish liniyasi tarmog'i ulanadi). Aksariyat, bunday uskunalar bir fazali uch chulg'amli transformatorlar guruhini tashkil etadi (1.20,*a*-rasm).

### 3.2. Avtotransformatorlar

Avtotransformator – bu shunday transformatorki, unda chulg'amlar orasida magnit bog'lanishdan tashqari elektrik bog'lanish ham mavjud. Oddiy transformatorning chulg'amlarini avtotransformator sxemasi bo'yicha yig'ish mumkin. Buning uchun  $Ax$  klemmalarni (3.2,*a*-rasm) birlamchi tarmoqqa ulab,  $ax$  klemmalari esa yuklanish  $Z_{yuk}$  klemmalariga ulansa, pasaytiruvchi transformator hosil bo'ladi. Agar  $ax$  chiqish klemmalarini birlamchi tarmoqqa ulansa va  $Ax$  klemmalariga  $Z_{yuk}$  ulansa, kuchaytiruvchi transformator hosil bo'ladi.



3.2-rasm. Bir fazali pasaytiruvchi avtotransformatorning elektromagnit (a) va prinsipial (b) sxemalari

Pasaytiruvchi transformator ishlashini batafsil ko'raylik. Chulg'am  $w_{ax}$  bir vaqtning o'zida birlamchi va ikkilamchi chulg'amlarning tarkibiy qismlaridir. Bu chulg'amdan  $I_{12}$  toki oqadi. Nuqta  $a$  uchun toklar tenglamasini yozamiz.

yoki

$$I_2 = I_1 + I_{12}, \quad (3.5)$$

$$I_{12} = I_2 - I_1, \quad (3.6)$$

ya'ni,  $w_{ax}$  o'ramdan  $I_2$  va  $I_1$  toklarning algebraik yig'indisiga teng bo'lgan  $I_{12}$  toki oqadi. Agan avtotransformator transformatsiyalash koeffitsiyenti  $k_A = w_{Ax}/w_{ax}$ , birga yaqin bo'lsa, u holda  $I_1$  i  $I_2$  bir-biridan farqi kam bo'ladi, ular algebraik yig'indisi esa juda kichik qiymat hisoblanadi. Bu vaziyat  $w_{ax}$  o'ramlarni kichik kesim yuzasiga ega bo'lgan simdan yasash imkonini beradi. Birlamchi chulg'amdan ikkilamchi chulg'amga uzatilayotgan avtotransformatorning uzatish quvvati  $S_{uzat} = U_2 I_2$  tushunchasini kiritamiz. Bundan tashqari, birlamchi chulg'amdan ikkilamchi chulg'amga magnit oqimi orqali o'tkazilayotgan hisobiy quvvat degan miqdor ham qo'llaniladi. Bu quvvatni hisobiy deyishlaridan maqsad, transformatorning og'irligi va gabaritlari shu quvvatga bog'liqdir. Transformatorlarda barcha uzatiluvchi quvvat elektromagnit quvvatidir, chunki ularda transformator chulg'amlari orasida faqat magnit bog'lanish mavjuddir. Avtotransformatorlarda esa, birlamchi va ikkilamchi chulg'amlar orasida magnit bog'lanishdan tashqari, elektrik bog'lanish ham mavjuddir. Shu sababli hisobiy quvvat uzatiluvchi quvvatning bir qisminigina tashkil etadi, qolgan qismi bir chulg'amdan ikkinchisiga uzatilishda magnit oqim ta'sirisiz o'tadi. Buning isboti sifatida avtotransformatorning uzatiluvchi quvvatini tashkil etuvchilarga ajratamiz  $S_{uzat} = U_2 I_2$ . Buning uchun (3.5)dan foydalanamiz. Bu ifodani uzatish quvvati ifodasiga qo'ysak, quyidagini hosil qilamiz.

$$S_{uzat} = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_e + S_{hisob}. \quad (3.7)$$

bunda  $S_e = U_2 I_1$ , - elektrik bog'lanish natijasida avtotransformator birlamchi zanjiridan ikkilamchi zanjiriga uzatilayotgan elektr quvvati.

Shunday qilib, avtotransformatorning  $S_{hisob} = U_2 I_{12}$  hisobiy quvvati, uzatilayotgan quvvatning bir qisminigina tashkil etar ekan. Bu esa, avtotransformator ishlab chiqarish uchun magnit o'zakni

transformatorlardagiga nisbatan kichik kesim yuzasi tanlash imkonini berar ekan.

Chulg'amning o'rtacha uzunligi ham kamayadi; natijada mis sarflanishi kamayadi. Shu bilan birga, magnit o'zak va misdagi energiya isrofi kamayadi, avtotransformator F.I.K.ortadi.

Shunday qilib, avtotransformator bir hil quvvatli transformatoridan quyidagi afzalliklari bilan farqlanadi:

- aktiv materiallar (mis, elektrotexnik po'lat)ning kam sarflanishi;
- F.I.K.ning yuqoriligi (katta quvvatli avtotransformatorlarda F.I.K.99,7% gacha bo'ladi);
- gabaritining kichikligi;
- narxining pastligi.

Avtotransformatorning o'rnatilgan quvvati oshgan sari, uning yuqorida keltirilgan afzalliklari kattaroq bo'ladi.

Birlamchi zanjirdan ikkilamchi chulg'amga elektrik bog'lanish tufayli o'tkazilayotgan elektrik quvvat  $S_E$ , quyidagi ifoda bilan aniqlanadi.

$$S_E = U_2 I_1 = U_2 I_2 / k_A = S_{p1} / k_A, \quad (3.8)$$

ya'ni,  $S_E$  transformatsiyalash koeffitsiyenti  $k_A$  ga teskari proporsional ekan.

3.3-rasmdan ko'rinadiki, kichik transformatsiyalash koeffitsiyenti bo'lganda oddiy transformatorlarning o'rniga avtotransformatorlarni qo'llash bilan katta yutuqlarga erishish mumkin. Masalan,  $k_A = 1$  bo'lganda avtotransformatorning barcha quvvati ( $S_E/S_{izal} = 1$ ) ikkilamchi chulg'amga zanjirlar orasidagi elektrik bog'lanish tufayli o'tadi.

Avtotransformatorlar qo'llashning eng maqsadga muvofiq rejimi transformatsiyalash koeffitsiyentining  $k_A < 2$  dir. Transformatsiyalash koeffitsiyenti katta bo'lganda avtotransformator eng katta kamchiliklari quyidagilardan iborat:

1. Avtotransformator pasaytiruvchi bo'lganda q.t. toki kattaligidir. 3.2-rasmdagi  $a$  va  $x$  klemmalar qisqa tutashtirilganda  $U_1$  kuchlanish chulg'amning juda kichik q.t. qarshiligiga ega bo'lgan o'ramlar soni  $Aa$  ga qo'yilgan bo'ladi. Bunda avtotransformator q.t.ning xavfli ta'siridan o'z-o'zini himoya qila olmaydi. Shu sababli, q.t. toklari

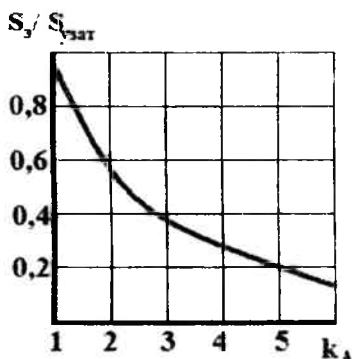


avtotransformator zanjiriga ulangan boshqa elektr qurilmalar hisobiga cheklanadi.

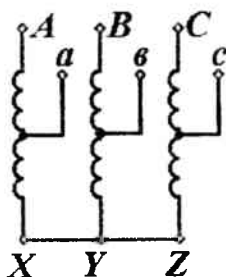
2. YUK chulg'ami va QK tomoni orasidagi elektrik bog'lanish; bu barcha chulg'amlarni kuchaytirilgan darajada elektr izolyatsiyalashni talab etali.

3. Avtotransformatorlar kuchlanishni pasaytiruvchi sxemalarda qo'llanilganda QK tarmog'i o'tkazgichlari va zaminlovchi o'tkazgichlar orasida, YUK tomonidagi faza va zamin orasidagi kuchlanishga yaqin bo'lgan kuchlanish hosil bo'ladi.

4. Xizmat ko'rsatuvchi personalning xavfsizligini ta'minlash maqsadida, YUK tarmog'i kuchlanishni bevosita iste'molchiga ulangan QK zanjiri qiymatigacha pasaytirishda avtotransformatordan foydalanish mumkin emas.



3.3-rasm.  $S_2 / S_{uzat}$  qiymatning transformatsiyalash koeffitsiyentiga bog'liqligi



3.4-rasm. Uch fazali avtotransformator

Avtotransformatorlar katta quvvatli elektr motorlarining ishga tushirish toklarini pasaytirish uchun o'zgaruvchan tok elektr yuritmalarida qo'llaniladi, shuningdek, elektr metallurgik pechlarining ishlash rejimlarini boshqarish uchun ham ishlatiladi. Kichik quvvatli avtotransformatorlar radio, axborotlashtirish va avtomatika tizimlarida ham ishlatiladi.

Texnikada o'zgaruvchan transformatsiyalash koeffitsiyentiga ega bo'lgan avtotransformatorlar keng qo'llaniladi. Bunday vaziyatlarda ikkilamchi kuchlanish qiymatini o'zgartirish uchun, avtotransformator o'ramlar soni  $w_{ax}$ ni o'zgartiruvchi qurilma bilan jihozlanadi (3.2-rasm). Buni amalga oshirish uchun yoki qayta ulagichdan, yoki izolyatsiyadan tozalangan chulg'am o'ramlarida sirpanuvchi kontakt (cho'tkalar)dan foydalaniladi. Bunday transformatorlar kuchlanish rostiagichiari deyiladi va bir fazali va uch fazali bo'lishi mumkin.

### Nazorat savollari

1. Uch chulg'amli transformatorning afzalliklari nimada?
2. Avtotransformatorlarning afzalliklari va kamchiliklarini nimada?
3. Avtotransformatorlarning afzalliklari transformatsiyalash koeffitsiyentiga bog'liqmi? Tushuntiring, nima uchun?
4. Transformatsiyalash koeffitsiyenti o'zgaruvchan avtotransformator ishlash prinsipini tushuntiring.

## II QISM

### O'ZGARUVCHAN TOK MASHINALARI UMUMIY MASALALARI

#### 4-bob. ASOSIY QISM VA STATOR CHULG'AMLARI

##### 4.1. O'zgaruvchan tok mashinalarining asosiy turlari va aktiv qismlari

O'zgaruvchan tok mashinalari ikki turga bo'linadi. *Asinxron va sinxron* mashinalari. Bu mashinalar qo'zg'almas qism – *stator*dan va uning ichiga podshipniklar va podshipnik qalqonlari vositasida mahkamlangan aylanuvchi qisim – *rotor*dan iborat. Stator va rotor bir-biridan *havo oralig'i* bilan ajratilgan. Havo oralig'ining o'lchami mashinaning ish xossalriga jiddiy ta'sir qiladi. Masalan, sinxron mashinalarda u o'ta yuklanish qobiliyatini oshirsa, asinxron mashinalarda havo oralig'ning katta bo'lishi ularning quvvat koeffitsiyenti  $\cos\varphi$  va aylantiruvchi momenti  $M_{ni}$  kamaytiradi.

O'zgaruvchan tok elektr mashinalari – asinxron va sinxron mashinalar bir-biridan rotorining tuzilishi bilan farq qilsa ham, ularning *statorlarida prinsipial farq bo'lmasligi*, ishlash prinsipi va nazariyasi *o'xshashlik jihatlari* mavjud. Bulardagi fizik jarayonlarning umumiyliги ular nazariyasi o'xshashligini, o'zgaruvchan tok chulg'amlari konstruksiyasi haında statorlari tuzilishining prinsipial o'xshashligini keltirib chiqaradi.

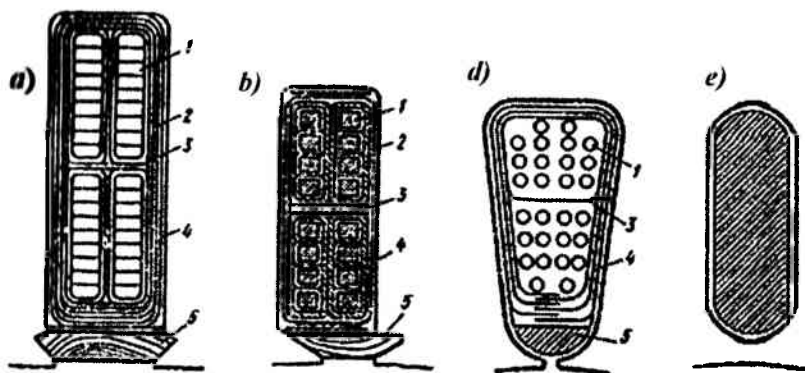
##### **Aktiv qismlari.**

*Magnit o'zak va chulg'amlar* o'zgaruvchan tok mashinalarining *aktiv qismlari* hisoblanadi. O'zgaruvchan magnit oqim o'tadigan mashinaning magnit o'zagi, aniqrog'i asinxron mashina stator va rotor hamda sinxron mashina statori magnit o'zaklari elektrotexnik izotrop (magnit o'tkazuvchanligi po'latning jo'valanish yo'nalishiga bog'liq bo'lmagan) sovuq- jo'valangan po'lat tunuka (list)laridan yig'iladi. Stator o'zagining ichki silindrik yuzasi (havo oralig'i)

tomonida stator chulg'ami joylashtirish uchun shtamplash vositasida po'lat listlarga bir xil andozali pazlar qirqiladi.

Elektr mashinalarining rotori valga mahkamlangan podshipniklar vositasida aylanadi. Quvvati 1000 kWt gacha bo'lgan elektr mashinalarida podshipnik qalqonida joylashtiriladigan *sharikli va rollikli dumalash podshipniklari*, quvvati  $R \geq 1000$  kWt bo'lganda esa mashina korpusidan tashqarida bo'lgan tayanchda *sirpanish podshipniklari* qo'llaniladi.

Asinxron mashinaning rotor o'zagi uning valiga (katta quvvatli mashinalarda esa rotor vtulkasiga) presslanadi va maxsus siquvchi shaybalar bilan mahkamlanadi. Rotor po'lat o'zagining tashqi silindrik yuzasi (havo oralig'i) tomonidagi pazlarda rotor chulg'ami joylashadi.

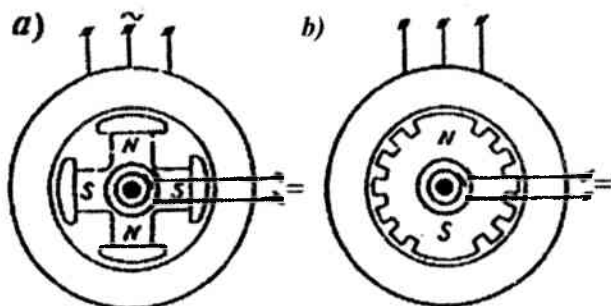


4.1-rasm. Statorning ochiq (a), yarim ochiq (b), yarim yopiq (d) hamda rotorning yopiq (e) shakldagi pazlar kesimlari

Po'lat o'zak tishlari va pazlarining shakllari mashina turiga va uning quvvatiga bog'liq. *Katta quvvatli* mashinalarda stator va rotor chulg'amlarini to'g'riburchak kesimli o'tkazgichlardan bajariladi; bu holda o'tkazgichlarni pazda yaxshi joylashtirish va ishonchli izolyasiyalashni ta'minlash imkoniyati yaxshilangani sababli to'g'riburchak shaklli *ochiq pazlar* qo'llaniladi. *Kichik va o'rta quvvatli* mashinalarda rotor va stator chulg'amlari, aksariyat aylana kesim yuzali o'tkazgichlardan yasalib, pazlar *yopiq* yoki trapetsiyaga

o'xshash yarim yopiq shaklda qir qiladi. Ayrim hollarda to'g'ri-burchak kesimli o'tkazgich ishlatilganda yarim ochiq pazlar qo'llaniladi (4.1-rasm).

Simxron mashinalar rotorining tuzilishiga ko'ra: ayon qutbli va noayon qutbli turlarga bo'linadi.



4.2-rasm. Simxron mashinasining rotorlari tuzilishi: ayon qutbli (a) va noayon qutbli (b) rotorlar

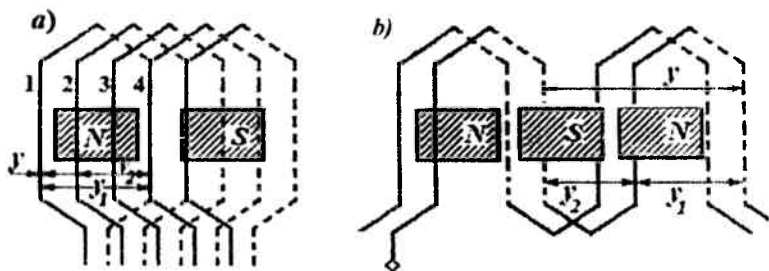
Noayon qutbli simxron mashinalarda rotor massiv (yaxlit po'lat to'sin) qilib bajariladi (4.2,a-rasm). Unda frezerlab qir qilgan pazlarida qo'zg'atish chulg'ami joylashtiriladi va rotorga nisbatan qo'zg'almas bo'lgan magnit oqimi hosil qilinadi.

Mashina havo orlig'ida magnit induksiyaning taxminan sinusoidal bo'lishini ta'minlash maqsadida, qo'zg'atish chulg'ami o'tkazgichiari rotor aylanasiining 2/3 qismidagi pazlarda taqsimlangan holda joylashtiriladi.

Ayon qutbli simxron mashinalarda qutb o'zagiga maxsus shakl beriladi. Uning chekkalaridagi havo oraliq  $\delta_{max}$  qutb o'rtasidagi  $\delta$  ga nisbatan  $1,5 \div 2$  baravar katta qilib tayyorlanadi. Ayon qutbli simxron mashinalarda rotorning markazdan qochirma kuchlari katta bo'lganligi sababli qutb ulanish joylari sinishining oldini olish uchun rotor aylanish tezligi nisbatan kichik - qutblar soni katta ( $2r \geq 4$ ) qilib tayyorlanadi (4.2,b-rasm).

## 4.2. O'zgaruvchan tok mashinasi stator chulg'ami sxemalari

O'zgaruvchan tok mashinalarida stator chulg'ami magnit o'zak pazlariga ma'lum tartibda joylashtiriladi. Bir xil pazlarda joylashgan o'ramlar bir-biri bilan ketma-ket ulanib *g'altak (seksiya)*larni hosil qiladi (4.3,a-rasm). Qo'shni pazlarda joylashgan *g'altaklar guruhini* hosil qiladi. Ular mashinaning bitta fazasi va juft qutbiga to'g'ri keladi. Chulg'amning har bir fazasi A-X, V-U, S-Z bir necha parallel (faza toki katta bo'lgan hollarda) yoki ketma-ket ulangan *g'altaklar guruhidan* tashkil topadi.



4.3-rasm. Sirtmoqsimon (a) va to'liqsimon (b) chulg'amlar

O'zgaruvchan tok chulg'amlarini tushunishda darslikda chulg'am fazasi boshi A, V, S va keti X, Y, Z lotin harflari bilan belgilanadi. Ta'kidlash lozimki, bunday uslubiy yondashish chulg'amlarni nazariy o'rganishda yaqqollikni ta'minlaydi (amalda esa standartda belgilangan shartlarga rioya qilinadi).

Ilgari uch fazali stator chulg'ami (ba'zan yakor chulg'ami ham deyiladi) ning klemmalari S1–S4 (A-faza), S2–S5 (V-faza), S3–S6 (S-faza) belgilangan. Xalqaro standartga ko'ra (ГОСТ 26772-85), 1.01.1997-dan boshlab MDH mamlakatlari elektr mashinasozlik zavodlarida ishlab chiqarilgan o'zgaruvchan tok mashinalari stator chulg'ami fazasining boshi va keti uchun yangicha belgilanish joriy qilingan: U1–U2 (A-faza), V1–V2 (V-faza), W1–W2 (S-faza). Statorning faza chulg'amlari yulduz (Y) yoki uchburchak ( $\Delta$ ) usulida

ulanishi mumkin, shu maqsadda klemmlar qutichasida chulg'am uchlarning boshi va keti ma'lum tartibda joylashtiriladi.

Chulg'amning *eng oddiy elementi o'ram* (4.3,a- rasm) hisoblanadi. O'ram bir-biridan yakor aylanasida chulg'am qadami «y» ga teng bo'lgan masofadagi pazlarda joylashgan ikkita o'tkazgichning ketma-ket ulanishidan hosil bo'ladi. Chulg'am qadami taxminan qutb bo'linmasiga teng:  $u \approx \tau = \pi D / (2r)$ ; (bunda  $D$  – stator ichki diametri;  $2r$  – qutblar soni).

Qutb bo'linmasi  $\tau$  ni pazlar soni  $Z$  orqali ham aniqlash mumkin, bu holda chulg'am qadami:

$$y = \tau = Z / (2p) = \pi D_1 / 2p, \quad (4.1)$$

Agar  $u = \tau$  bo'lsa, chulg'am diametral yoki to'la qadamli;  $y < \tau$  bo'lsa – qisqartirilgan qadamli;  $y > \tau$  bo'lganda esa uzaytirilgan qadamli chulg'am deyiladi.

Qo'shni pazlarda joylashgan bitta g'altak guruhidagi g'altak tomonlari  $q$  ta pazlarni egallab faza siljish

$$\alpha = 2\pi r \cdot q / Z \quad (4.2)$$

bilan faza zonasini hosil qiladi

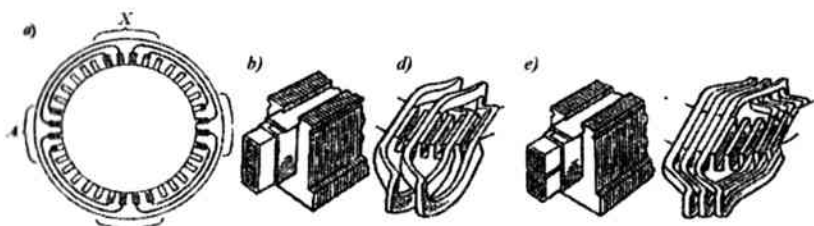
$$q = Z / (2r \cdot m), \quad (4.3)$$

bunda  $m$  – fazalar soni.

4.4,g-rasmda ko'rsatilgan stator chulg'amining har bir fazasi A-X, V-U, S-Z uchta g'altakdan tashkil topgan bo'lib, tomonlari uchta pazlarda joylashgan, ya'ni  $q=3$ . Umuman uch fazali chulg'amda bitta qutb bo'linmasida  $3q$  pazlar joylashgan bo'ladi,  $q=1$  bo'lganda esa har bir qutb ostida bir fazaning bitta g'altagi joylashgan bo'ladi.

Seksiya tomonlarining pazlarda joylashish tartibi va pazlardan tashqari qismining joylashtirilishiga qarab chulg'amlar *bir qatlamli*, (4.4,b,d-rasm) *ikki qatlamli* (4.4,g-rasm) va *bir-ikki (kombinat-siyalangan) qatlamli* bo'ladi. Agar pazda seksiyaning faqat bitta tomoni joylashgan bo'lsa – *bir qatlamli*, pazda seksiyaning yuqorgi

qatlami va boshqa seksiyaning pastki qatlami ustma-ust joylashsa – ikki qatlamli chulg‘am deyiladi.



**4.4-rasm.** Uch fazali bir qatlamli stator ( $Z=36$ ,  $2p=4$ ,  $q=3$ ) chulg‘amida “A” fazasi g‘altaklarini joylashtirish sxemasi (a) hamda bir qatlamli (b) va ikki qatlamli (d,e) chulg‘amlar joylanishi

*Bir-ikki qatlamli konsentrik chulg‘amlarda bir qatlamli chulg‘am g‘altaklarini pazlarga joylashtirishda mexanizatsiyani qo‘llashning engilligi va ikki qatlamli chulg‘amlarda esa qisqartirilgan qadam qo‘llash mumkinligi kabi afzalliklarini o‘zida mujassamlashtirgan.* Bunday chulg‘amlar quvvati  $15\div 100$  kWt ( $q \leq 6$ ) bo‘lgan mashinalarda qo‘llaniladi.

Bir qatlamli chulg‘amni qisqartirilgan qadamli qillb bo‘lmaydi, bu ularning *asosiy kamchiligi* hisoblanadi. Chulg‘am qadami qisqartirilmagan bo‘lsa, mashina havo oralig‘idagi magnit maydonning shaklida yuqori garmonikalarning bo‘lishi, qo‘shimcha isroflarning ortishiga, mexanik tavsifda o‘pirilish (ya‘ni keskin pasayishi)lar vujudga kelishiga va mashina shovquni oshishiga olib keladi.

Lekin o‘zining oddiyligi, arzonligi va chulg‘am seksiyalarini pazlarga joylashtirish texnologiyasida mexanizatsiyani to‘la qo‘llash mumkinligi tufayli bir qatlamli chulg‘amlar kam quvvatli (ya‘ni quvvati  $10\div 15$  kWtgacha bo‘lgan) mashinalarning stator chulg‘ami uchun keng qo‘llanilmoqda. Misol tariqasida bir qatlamli chulg‘amning amalda keng qo‘llaniladigan turi, ya‘ni bir qatlamli konsentrik chulg‘am sxemasini ko‘rsatish mumkin ( $Z=24$ ,  $2p=4$ ,  $q=2$ ,  $a=1$ ).

O‘zgaruvchan tok elektr mashinalarining chulg‘amlari fazalar somiga ko‘ra bir, ikki va uch fazali bo‘lishi mumkin; seksiyalarining



shakliga va ulanishiga ko'ra esa *sirtmoqsimon* va *to'lqinsimon* turlarga bo'linadi; ularning qadamlari tegishli 4.3-rasmlarda ko'rsatilgan.

### 4.3. Stator chulg'amini hisoblash

**Ikki qatlamli sirtmoqsimon chulg'amlar** turbogeneratorlarda va umum maqsad o'zgaruvchan tok elektr mashinalarida keng qo'llaniladi.

Mashining har bitta qutbiga va fazasiga to'g'ri keladigan pazlar soni  $q$  butun songa teng bo'lgan sirtmoqsimon chulg'am o'zgaruvchan tok mashinalarida keng qo'llanishini e'tiborga olib quyidagi misolda ko'rib chiqamiz.

**4.1-misol.** Berilgan: pazlar soni  $Z=24$ , qutblar soni  $2r=4$  bo'lgan uch fazali ( $m=3$ ) chulg'amni hisoblash, yoyilgan sxemasini chizish va uning asosida parallel shaxobchalar hosil qilish hamda chulg'amning pazlardagi EYK lar yulduzini qurish talab etiladi.

Bu holda mashining har bitta qutbiga va fazasiga to'g'ri keladigan pazlar soni «q» quyidagicha aniqlanadi.

$$q = Z / (2p \cdot m) = 24 / (4 \cdot 3) = 2. \quad (4.4)$$

Tish bo'linmasida ifodalangan qutb bo'linmasi quyidagicha topiladi:

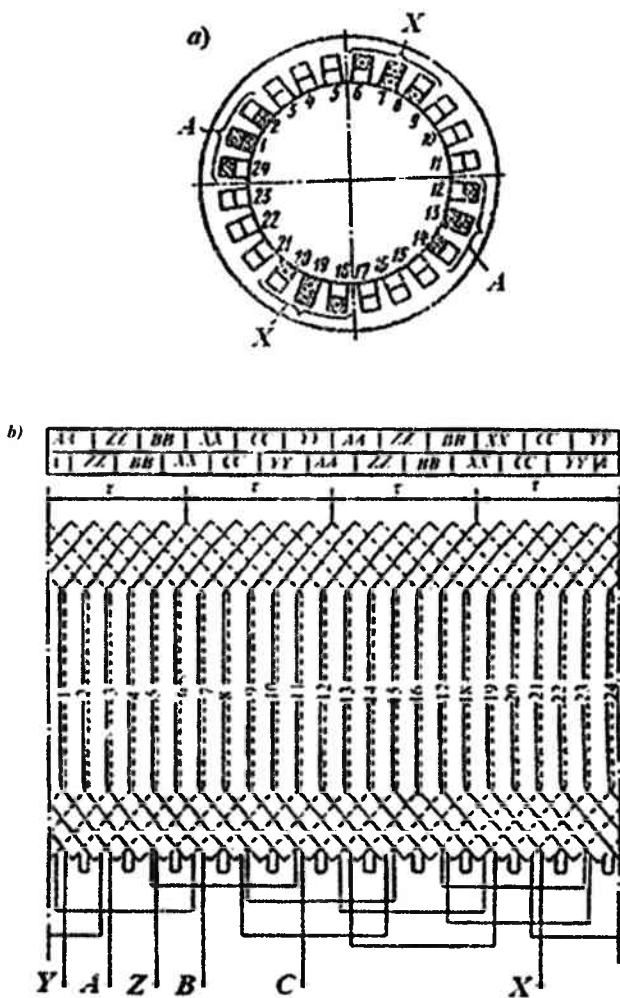
$$\tau = Z / (2r) = 24 / (2 \cdot 2) = 6. \quad (4.5)$$

O'zgaruvchan tok mashinasida MYK (yoki EYK) ning o'zgarish shaklini sinusoidal shaklga yaqinlashtirish maqsadida chulg'amning qadami taxminan  $u \approx 0,833 \cdot \tau$  ga teng bo'lgan qisqartirilgan qadam tanlanadi. Shu sababli chulg'amning tish bo'linmasida ifodalangan qadami quyidagiga teng bo'ladi.

$$u = 0,833 \cdot \tau = 0,833 \cdot 6 = 5.$$

Bu chulg'amning sxemasi 4.5-rasmda ko'rsatilgan. Bu chulg'am sxemasining tuzilishi quyidagicha tushuntiriladi: dastavval pazlarning ustida joylashgan g'altaklar tomonlarini har qaysi zonada

ikkita pazda joylashgan tomonni ( $q=2$ ) faza zonarlari bo'yicha taqsimlab chiqamiz.



4.5-rasm. Uch fazali ikki qatlamli chulg'am g'altaklari stator pazlarida joylanishi (a) va sirtmoqsimon chulg'am ( $Z=24$ ,  $m=3$ ,  $2p=4$ ) yoyma sxemasi (b)

Agar 1 va 2-pazlarni «A» faza zonasini uchun ajratilsa, u holda «V» faza zonasiga 5 va 6-pazlarni ajratish kerak bo'ladi, chunki «V» faza «A» fazaga nisbatan  $120^\circ$  ga siljigan bo'ladi, ya'ni 2 ta zona  $60^\circ$  dan yoki 4 ta ( $120^\circ / \alpha = 120^\circ / 30 = 4$ ) pazga ciljigan bo'lishi kerak ( $1+4 = 5$ ;  $2+4 = 6$ ). "S" faza zonasini ham "V" faza zonasiga nisbatan  $120^\circ$  ga siljib,  $5+4=9$  va  $6+4 = 10$  pazlarni egallaydi. Keyingi juft qutb bo'linmasi davomida ham (pazlar  $13+24$ ) «A», «V» va «S» zonalarning almashib kelishi shunday tartibda amalga oshadi («A» faza zonasiga 13, 14-pazlar; «V» faza zonasiga 17, 18-pazlar; «S» faza zonasiga 21, 22-pazlar to'g'ri keladi). Demak, ustki qatlam shu tarzda taqsimlanadi.

Boshqa faza zonalarini ham «A», «V», «S» fazalar bo'yicha taqsimlab chiqamiz va ularni mos ravishda «X», «U», «Z» bilan belgilaymiz. Bunda «A» fazaga tegishli «X» zona uchun «A» zonaga nisbatan  $\tau = 6$  taga siljigan pazlarni ajratamiz, ya'ni  $1+6 = 7$ ,  $2+6=8$ ,  $13+6 = 19$ ,  $14+6 = 20$ -pazlar. Xuddi shunday «U» zonaga  $5+6 = 11$ ,  $6+6 = 12$ ,  $17+6 = 23$ ,  $18+6 = 24$ -pazlarni, «Z» zona uchun esa  $9+6 = 15$ ,  $10+6 = 16$ ,  $21+6 = 27-24 = 3$ ,  $22+6 = 28 - 24 = 4$  pazlarni ajratamiz. Shu tarzda pazlarning ustki qatlamidagi g'altaklar tomonlarini fazalar zonasini bo'yicha tarqalishiga ega bo'lamiz.

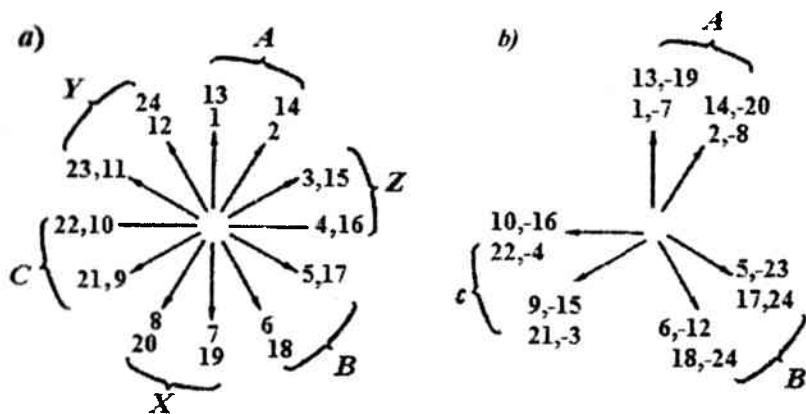
«A», «V», «S» va «X», «U», «Z» zonalar orasidagi farq shundaki, g'al-taklarning tomonlaridagi EYKlar faza bo'yicha  $180^\circ$  siljigan bo'ladi, chunki ular magnit maydonda bir yoki toq son qutb bo'linmasiga siljigan bo'ladi. Ko'rayotgan misolimizda qadam bir tish bo'linmasiga qisqartirilgan, shuning uchun pazlarning pastki qatlamidagi g'altaklar tomonlari, 4.5-rasm yuqori qismining pastki qatorida ko'rsatilganidek, chap tomonga bir tish bo'linmasiga siljiydi. Pastki tomonlarni zonalar bo'yicha bo'lib chiqmasa ham bo'ladi, chunki g'altaklarning pazlardan tashqari qismlarini chizganda o'z-o'zidan kelib chiqadi.

Shuni ta'kidlash lozimki, 4.5-rasmdagi «A», «Z», «V», «X», «S», «Y» zonalarning har bir zonada  $q$  ta paz bilan qo'sh qutb bo'linmasi davomida almashib kelishi faza zonasini  $60^\circ$  bo'lgan har qanday uch fazali chulg'am uchun taalluqli bo'lib, yuqoridagi hisoblashlarga hojat yo'qdir.

Faza bo'yicha pazlarning tarqalishini chulg'am pazlaridagi g'altak (yoki o'tkazgich)larning EYK lari yulduzi (4.6-rasm) yordamida ham amalga oshirish mumkin.

Qo'shni pazlar o'tkazgichlaridagi EYK larning faza bo'yicha siljish burchagi  $\alpha$  ko'rilayotgan misolda quyidagicha topiladi:

$$\alpha = r \cdot 360^\circ / Z = 2 \cdot 360^\circ / 24 = 30^\circ.$$



4.6-rasm. Avvalgi rasmda tasvirlangan chulg'amning pazlaridagi o'tkazgichlar EYK lari vektor diagrammalari

Pazlardagi g'altaklar tomonlari EYK larining vektorlari qo'sh qutb bo'linmasi davomida aylanib kelishi (1÷12 vektorlar) EYK vektorlarining yulduzi  $q$  butun son bo'lganda, mos keluvchi pazlarning (1 va  $1+12 = 13$  hamda shunga o'xshashlar) EYK lari ustma-ust tushganligi uchun faza bo'yicha takrorlanadi. Agarda birinchi ikki vektorni «A» zonasi uchun (1; 2 va 13; 14-vektorlar) ajratsak, u holda «V» va «S» zonalaridagi vektorlar «A» zona vektorlariga nisbatan  $120^\circ$  va  $240^\circ$  ga siljigan bo'ladi. «X», «U», «Z» zonalarining vektorlari esa «A», «V», «S» zonalar vektorlariga nisbatan  $180^\circ$  ga siljigan bo'ladi. Natijada 4.5-rasmdagi yuqori qatorda ko'rsatilgan zonalar bo'yicha pazlarning tarqalishiga ega bo'lamiz.

Sxemada har bir paz uchun ikkita o'tkazgich (g'altak tomonlari) chizilgan. Ularning chap tomonlari yuqori qatlamga, o'ng tomonlari

esa pastki qatlamga joylashgan deb hisoblaymiz. g'altaklarni yuqori tomonlaridan boshlab nomerlab chiqamiz. Qo'shni pazlardagi g'altaklarning EYK lari ham  $30^\circ$  ga siljigan bo'ladi, demak, pazlardagi g'altaklar o'tkazgichlarining EYK lari yulduzini (4.6,*a*-rasm) g'altaklar EYK lari yulduzi (4.6,*b*-rasm) deb qarash mumkin. Har bir g'altak guruhleri chegarasida  $q=2$  g'altaklar ketma-ket ulanadi.

Shunday qilib, «A» faza uchun (4.6,*a*-rasm) 4 ta, ya'ni 1–2, 7–8, 13–14 va 19–20 g'altaklar guruhiga ega bo'lamiz. Barcha guruh EYK lari bir-biri bilan qo'shilishi uchun ular ketma-ket ulangan, 7–8 va 19–20 guruhlar esa 1–2 va 13–14 (1–2 guruh oxirlari 7–8 guruh oxirlari bilan ulangan) guruhlariga nisbatan teskari bo'ladi (4.6,*b*-rasmda *minus* «-» ishorali paz raqamlari). Boshqa fazalardagi guruhlarining ulanishi ham xuddi shunday usul bilan amalga oshiriladi.

«X», «U», «Z» zonalardagi g'altak guruhlarining chulg'amda teskari ulanishi shu zonalardagi g'altak EYK vektorlarining  $180^\circ$  ga burilganiga ekvivalent (teng kuchli)dir. Bunda 4.6,*a*-rasm o'rniga 4.6,*b*-rasmdagi g'altaklar EYK lari diagrammasiga ega bo'lamiz. Bu diagramma uchta sektordan tuzilgan bo'lib,  $q = 2$  yoy va fazdagi g'altaklar soniga mos holda  $2p \cdot q = 2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$  vektordan iborat. Har bir fazadagi EYK lar mos sektordagi g'altaklar EYK lari vektorlarining ylg'indisiga teng. Demak, hamma fazadagi EYK lar bir biriga teng va faza bo'yicha  $120^\circ$  ga siljigan bo'ladi.

4.6-rasmda «A», «V» va «S» fazalarning bosh uchlari o'rnida bir-biriga nisbatan  $120^\circ$  ga siljigan 1, 5 va 9 g'altaklarning bosh uchlari olingan. «X», «U» va «Z» fazalarning oxirgi uchlari o'rnida 19, 23 va 3 g'altaklarning boshlanishi mos keladi.

Faza zonasi  $\alpha = 60^\circ$  bo'lgan ikki qatlamli chulg'amning har bitta faza-sidagi g'altaklar guruhlarining soni qutblar soni  $2r$  ga teng. Har bitta qutbga va fazaga to'g'ri kelgan pazlar soni  $q$  butun son bo'lsa  $a = 2r$  gacha bo'lgan bir xil qiymatli va fazalari mos bo'lgan EYK lar hosil bo'ladigan parallel shaxobchalar (*a*) ni bajarish mumkin. Masalan, ko'rilayotgan ( $2r=4$ ) chulg'amda  $a = 1; 2$  yoki 4 ta parallel shaxobcha bajarish mumkin.

#### 4.4. Stator chulg'ami EYKlari

Sinxron va asinxron mashinalarda aylanma magnit maydon hosil qilish usullari har xil bo'lsa ham (masalan, *sinxron generator*da rotor bilan birga aylanadigan qo'zg'atish chulg'amiga o'zgarmas tok berib aylanma magnit maydon hosil qilinsa, *uch fazali asinxron motord*a esa bunday maydon stator chulg'amidan uch fazali tok o'tganda hosil bo'ladi), stator chulg'amida *elektromagnit induksiya qonuniga* asosan aylanma magnit maydon tufayli EYK larning hosil bo'lish jarayoni bir xil kechadi.

*Sinxron generatorlarning* stator chulg'ami o'tkazgichlariga (o'ramlariga ham) nisbatan har xil qutblar davriy ravishda (navbatma-navbat) o'tishi tufayli hosil bo'ladigan EYK o'z yo'nalishini o'zgartirib turadi, ya'ni o'zgaruvchan bo'ladi. Magnit maydon bir marta aylanganida o'tkazgichdagi EYK ning davri « $r$ » ga, « $n$ » ta aylanganida esa « $rn$ » ga teng bo'ladi; demak, uning chastotasi:  $f_1 = pn / 60$ .

Mashina havo oralig'ining « $x$ » nuqtasidagi o'tkazgich EYK ning oniy qiymatini aniqlash formulasi umumiy hol uchun quyidagicha yoziladi:

$$e_{o'tkaz,x} = V_{\delta x} l_{\delta} v. \quad (4.7)$$

Bundan, rotorning burchak tezligi  $v$  ni o'zgarmas va stator chulg'ami o'tkazgichining aktiv (magnit maydon ta'siridagi) uzunligi  $l_{\delta} = \text{const}$  bo'lganligi e'tiborga olsak, EYK magnit maydonga proporsional o'zgarib, uning vaqt bo'yicha o'zgarish shakli mashina havo oralig'idagi magnit induksiya  $V_{\delta}$  ning juft qutb bo'linmasi ( $2\tau$ )dagi taqsimlanishini takrorlaydi.

Umumiy holda induksiyaning taqsimlanish shakli nosinusoidal xarakterda bo'ladi. Induksiyaning egri chizig'i absissa o'qiga va qutblar o'qiga nisbatan simmetrik bo'lganligi sababli, bu egri chiziqni Fure qatoriga yoyganda, unda faqat toq garmonikalar bo'ladi. Ularni *fazoviy garmonikalar* deyiladi, chunki bu garmonikalar induksiyaning taqsimlanishi fazoviy koordinatalarga bog'liq bo'lib, vaqtga esa bog'liq emas. Bu garmonikalarga oid

qutblar sonining oshishi va mos ravishda qutblar bo'linmasining kamayishi ularning tartibiga bog'liq bo'ladi; *bu esa ularning o'ziga xos xususiyati hisoblanadi.*

Magnit maydon 1-garmonikasining o'tkazgichda hosil qilgan EYK ning 1-garmonikasi ( $e_{o'tkaz.x 1}$ ), uning amplitudasi ( $E_{o'tkaz.x 1}$ ) va ta'sir etuvchi ( $E_{o'tk1}$ ) qiymatlari quyidagilarga teng bo'ladi:

$$e_{o'tkaz.x 1} = E_{o'tkaz.x 1} \sin \omega t; \quad (4.8)$$

$$E_{o'tkaz.x 1} = V_{\delta_{max1}} \cdot l_{\delta} \cdot \nu; \quad (4.9)$$

$$E_{o'tk1} = E_{o'tkaz.x 1} / \sqrt{2} = (B_{\delta_{max1}} / \sqrt{2}) \cdot l_{\delta} \cdot \nu, \quad (4.10)$$

bunda  $B_{\delta_{max1}}$  – mashina havo oralig'i magnit oqim induksiyasi 1-garmonikasi, T;  $l_{\delta}$  – o'tkazgichning aktiv magnit maydon ta'siridagi uzunligi, m;  $\nu$  – aylanuvchi magnit maydonning burchak tezligi, m/s

EYKni hisoblashda qutb bo'linmasidagi magnit oqim  $F_{\delta}$  dan foydalanish zarur. Uning 1-garmonikasi quyidagiga teng.

$$F_{\delta 1} = V_{\delta(o'tr).1} \cdot \tau \cdot l_{\delta}, \quad (4.11)$$

bu yerda:  $V_{\delta(o'tr).1}$  – magnit induksiyaning o'rtacha qiymati;  $\tau = \pi D_1 / (2p)$  – qutb bo'linmasi;  $D_1$  – statorning ichki diametri.

Sinusoidal uchun  $V_{\delta(o'tr).1} = (2/\pi) \cdot V_{\delta_{max1}}$  bo'lganligi tufayli (4.11) ifodadan quyidagiga ega bo'lamiz.

$$V_{\delta_{max1}} = \pi F_{\delta 1} / (2 \tau \cdot l_{\delta}). \quad (4.12)$$

$V_{\delta_{max1}}$  ning bu qiymatini (4.10) ga qo'yib va

$$\nu = \pi D_1 \cdot n_1 / 60 = \tau \cdot 2p \cdot n_1 / 60 = 2\tau \cdot f$$

tenglikni hisobga olgan holda, quyidagiga ega bo'lamiz.

$$E_{o'tk.1} = 2 [\pi / (2\sqrt{2})] \cdot f \cdot F_{\delta 1} = 2,22 \cdot f \cdot F_{1}. \quad (4.13)$$

Magnit maydon shakli nosinusoidal bo'lganda o'tkazgichdagi EYK quyidagi ifoda bo'yicha hisoblanadi:

$$E_{o'ik} = 2 k_v \cdot f \cdot F_{\delta}; \quad (4.14)$$

bu yerda  $k_B = V_{\delta_{max1}} / V_{o'it}$  – magnit maydon shaklining koeffitsiyenti. Magnit maydon sinusoidal shaklga ega bo'lganda  $k_B = \pi / (2\sqrt{2}) = 1,11$  ga teng.

Taqsimlangan chulg'amda qo'shni pazlarda joylashgan o'tkazgichlar o'zaro fazoviy (geometrik) burchak ( $\alpha = 360^\circ / Z$ ) ga siljiganligidan, ularning EYK lari fazasi bo'yicha mos bo'lmaydi. Qo'shni pazlardagi o'tkazgichlar EYK larining vektorlari bir-biridan o'zaro elektr burchakka siljigan bo'ladi.

$$\alpha_e = 360 p / Z = \alpha p$$

#### 4.5. G'altak o'ramining EYK

Agar g'altak o'ramlari bir-biridan qutb bo'linmasiga teng ( $u = \tau$ ) bo'lgan masofadagi pazlarda joylashgan o'tkazgichlardan yasalgan bo'lsa, ulardagi EYKlar o'zaro  $180^\circ$  ga siljigan bo'ladi, chunki o'ramning aktiv tomonlari (o'tkazgichlari) qarshi ulangan, ya'ni chap tomondagi o'tkazgichning keti o'ng tomondagi o'tkazgich keti bilan ulangan. Shu sababli o'ram EYKi ( $E_{o'r,1}$ ) o'tkazgichlardagi EYKlarning geometrik (vektor) ayirmasiga teng bo'ladi. Bu vektor diagrammadan ko'rinishicha, chulg'am qadami diametral ( $u = \tau$ ) bo'lganda o'tkazgichlar EYK larining geometrik ayirmasi ( $E_{o'r,1(d)}$  – o'ram EYK) ularning arifmetik yig'indisiga teng bo'ladi, ya'ni

$$E_{o'r,1(d)} = 2 E_{o'ik} = 4,44 f F_{\delta 1}. \quad (4.15)$$

Chulg'am qadami qisqartirilgan ( $u < \tau$ ) da o'tkazgichlar EYKlarining geometrik ayirmasi ( $E_{o'r,1(qis)}$  – o'ram EYK), chulg'am



qadami diametr.l bo'lgandagi ularning arifmetik yig'indisidan kichik ( $E_{o'r.l(qis)} < E_{o'r.l(c)}$ ) bo'ladi

$$E_{r.l(qis)} = 2 E_{o'uk.l} \cdot \sin(\beta\pi/2) = 4,44 f F_{\delta l} k_{qis.l}, \quad (4.16)$$

bunda

$$k_{qis.l} = \sin(\beta\pi/2) \quad (4.17)$$

– chulg'am qisartirish koeffitsiyentining 1-garmonikasi;  $\beta = (u / \tau)$   
 – chulg'amning nisbiy qadami.

Qisqartirish koeffitsiyenti  $v$ -garmonika uchun quyidagicha yoziladi

$$k_{qis.v} = \sin(v\beta\pi / 2). \quad (4.18)$$

O'ramlar soni  $w_s$  bo'lgan stator chulg'ami seksiyasi (g'altagi)da hosil bo'ladigar EYK ning qiymati quyidagiga teng bo'ladi:

$$E_{s.l(qis)} = w_s \cdot E_{o'r.l(qis)} = 4,44 f F_{\delta l} w_s \cdot k_{qis.l}. \quad (4.19)$$

#### 4.6. G'altaklar guruhining EYK

Agar g'altaklar guruhidagi barcha seksiyalar bir-biridan chulg'am qadami  $u = \tau$  masofada joylashgan ikkita pazga to'plansa, u holda EYK lar faza jihatdan mos tushadi, barcha seksiyalar guruhining EYK esa, shu guruhni hosil qiluvchi seksiyalar EYK larining arifmetik yig'indisiga teng bo'lar edi. Lekin, amalda statorlarning taqsimlangan holdagi, ya'ni g'altaklar guruhi qo'shni pazlarda joylashgan  $q$  ta bir xil g'altak (seksiya)laridan tashkil topgan chulg'ami ishlatiladi. Ularda har qaysi g'altaklar guruhidagi seksiyalarning aktiv tomonlari har bitta qutb ostidagi  $q > 1$  pazni egallaydi. Shuning uchun g'altaklar guruhining seksiyalarida hosil bo'ladigan EYK lar faza jihatdan bir-biriga nisbatan qo'shni pazlar orasidagi  $\alpha_e$  burchakka siljigan bo'ladi.

Seksiyalar guruhining hamma seksiyalari o'zaro ketma-ket ulanganligi sababli seksiyalar guruhining EYK lari yig'indisi  $E_{g1}$  alohida seksiyalar EYK larining geometrik yig'indisi ( $E_{g1} = \sum_{i=1}^q E_{s1(qis)}$ ) ga teng bo'ladi. Bu yig'indi chulg'am diametral qadamli bo'lgandagi ularning arifmetik yig'indisi ( $E_{g1(d)} = q E_{s1(d)}$ ) dan kichik bo'ladi. Bu EYK larning nisbati

$$k_{t1} = E_{g1} / E_{g1(d)} = \sin(q\alpha_e/2) / [q \sin(\alpha_e/2)], \quad (4.20)$$

– chulg'am taqsimlanish koeffitsiyentining 1-garmonikasi deyiladi.

Taqsimlanish koeffitsiyenti  $\nu$ -garmonika uchun quyidagicha yoziladi:

$$k_{t\nu} = \sin(q\nu\alpha_e/2) / [q \sin(\nu\alpha_e/2)]. \quad (4.21)$$

Seksiyalar guruhining EYK  $E_{g1}$  quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$E_{g1} = q E_{s1} k_{t1} = 4,44 f F_1 w_s \cdot q k_{qis1} k_{t1}. \quad (4.22)$$

#### 4.7. Chulg'am fazasining EYK

Hozirgi kunda o'zgaruvchan tok mashinalari stator chulg'ami uchun ikki qatlamli qisqartirilgan qadamli taqsimlangan chulg'am turi keng qo'llanilmoqda. Yuqorida ta'kidlanganidek, faza chulg'ami seksiyalar guruhlaridan tarkib topgan; bu guruhlar ham, o'z navbatida, bitta qutblar jufti ostida joylashgan  $q$  ta seksiyadan iborat. Demak, barcha guruhlar bir xil magnit sharoitlarda bo'lgan bir xil sondagi seksiyalardan tashkil topadi.

Bunday elektr mashinaning faza chulg'amida hosil bo'ladigan EYK shu fazaning tarkibidagi barcha g'altaklar (seksiyalar) EYK larining yig'in-disiga teng bo'ladi. Fazaning ikki qatlamli chulg'ami  $2r$  ta g'altaklar guru-hidan, bir qatlamli esa  $r$  ta guruhdan iborat bo'ladi. G'altaklar guruhleri o'zaro ketma-ket, parallel yoki aralash (ketma-ket va parallel) ulanishi mumkin. Agar seksiya (g'altak)

guruhlari, o'ramlar soni  $w_3$  bo'lgan  $q$  ta seksiyadan iborat bo'lib, ular ketma-ket ulanganda chulg'amning har bitta shaxobchasi ( $a$ ) va fazasida hosil bo'ladigan EYK ta'sir etuvchi qiymatining 1-garmonikasi quyidagiga teng bo'ladi:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \cdot k_{qis.1} \cdot k_{t.1} \cdot F_1 = 4,44 f w_1 \cdot k_{ch.1} \cdot F_1, \quad (4.23)$$

bunda

$$k_{ch.1} = k_{qis.1} \cdot k_{t.1} \quad (4.24)$$

– o'rta va katta quvvatli mashinalar chulg'am ko'effitsiyentining 1-garmonikasi.

## **5-bob. O'ZGARUVCHAN TOK MASHINASI CHULG'AMLARI MAGNIT YURITUVCHI KUCHLARI VA MAGNIT MAYDONLARI**

### **5.1. Chulg'am magnit yurituvchi kuchlari**

O'zgaruvchan tok mashinasi havo oralig'idagi induksiya stator aylanasi bo'ylab magnit yurituvchi kuchning taqsimlanishi bilan aniqlanadi. Mashinaning statorida yoki rotorida joylashgan barcha o'zgaruvchan tok chulg'amlarining natijaviy magnit yurituvchi kuchlari (MYK) havo oralig'ida aylanuvchi magnit maydonni hosil qiladi. Shuning uchun sinusoidal kuchlanish ulanayotgan har bir chulg'am, fazoda sinusoidal taqsimlangan MYKga ega bo'ladi. Agar bu shartlar bajarilmasa (berilayotgan kuchlanish nosinusoidal yoki MYK nosinusoidal taqsimlangan bo'lsa), u holda magnit maydoni tarkibida yuqori garmonikali tashkil etuvchilar hosil bo'lib, ular mashinaning energetik ko'rsatkichlarini pasaytiradi.

O'zgaruvchan tok mashinasi stator chulg'amlari MYKlarini tahlil qi-lishda quyidagi farazlar qabul qilinadi:

1) o'zgaruvchan tok chulg'amining MYKi vaqt bo'yicha o'zgaradi va fazoda (stator aylanasi bo'ylab) taqsimlangan bo'ladi;

2) stator chulg'amidagi tokning vaqt bo'yicha o'zgarishi sinusoidal shaklda, demak, chulg'am MYK ham sinusoidal shaklda o'zgaradi;

3) mashina havo oralig'i stator perimetri bo'yicha o'zgarmas, ya'ni rotor o'zagi silindrik shaklda;

4) rotor chulg'amida tok yo'q va rotor magnit maydon hosil qilmaydi.

### **5.2. Mujassamlangan chulg'am MYK**

MYKning taqsimlanishini mujassamlangan chulg'amli ikki qutbli mashina misolida ko'rib chiqamiz.

Bunda A-X faza chulg'amining hamma o'ramlari diametral holatdagi ikkita pazda joylashgan. Agar tok faza chulg'amining boshi

A dan keti X ga yo'nalgan bo'lsa, kuch chiziqlari rasmda ko'rsatilgandek, yo'nalgan ikki qutbli magnit oqimi hosil bo'ladi. Bu oqimning har bitta kuch chizig'i faza g'altagining hamma o'ramlari ( $w = w_g$ ) ni kesib o'tadi, shu sababli g'altak hosil qilgan MYK  $F_g = I \cdot w$  ga teng bo'ladi. Tok maksimal qiymatga ega bo'lganda MYK ham maksimal qiymatga erishadi.

$$G'_{g' \max} = I_{\max} \cdot w = \sqrt{2} I w, \quad (5.1)$$

bunda  $I_{\max}$ ,  $I$  – tokning maksimal va effektiv qiymatlari.

Agar magnit zanjiri ferromagnit qismlarining magnit qarshiligini nolga teng deb qabul qilinsa, u holda MYKning taqsimlanishi stator aylanasi bo'ylab to'g'ri burchakli to'rtburchak shaklida bo'ladi.

Statorning mujassamlangan chulg'ami ikkita pazda joylashganligi sababli, uning MYK ikkita (musbat va manfiy) to'g'riburchak ko'rinishida bo'ladi. Ulardan har birining qiymati magnit zanjirining bitta havo oralig'idan magnit oqimini o'tkazish uchun zarur bo'lgan MYK ga mos keladi, ya'ni:

$$F = F_{g' \max} / 2 = (\sqrt{2} \cdot I \cdot w) / 2 = (\sqrt{2} / 2) \cdot I \cdot w \quad (5.2)$$

To'g'ri burchakli to'rtburchak shakldagi MYKni Fure qatoriga yoyib sinusoidalar yig'indisi ko'rinishida yozish mumkin.

$$F_x = (\sqrt{2} / 2) \cdot I \cdot w \cdot (4 / \pi) \cdot [\cos(\pi x / \tau) + (1 / 3) \cdot \cos(3\pi x / \tau) + (1 / 5) \cdot \cos(5\pi x / \tau) + \dots + (1 / n) \cdot \cos(n\pi x / \tau)], \quad (5.3)$$

bunda  $x$  – chulg'am simmetriya o'qi (faza o'qi)dan tekshirilayotgan nuqtagacha bo'lgan masofa;  $(\sqrt{2} / 2) \cdot I \cdot w = F$  – mashina magnit zanjirida bitta havo oralig'idan magnit oqimini o'tkazish uchun zarur bo'lgan MYK.

Tok maksimal qiymatga ega bo'lganda, mujassamlangan chulg'am MYK ning birinchi garmonikasi quyidagiga teng bo'ladi:

$$F_1 = (2 \sqrt{2} / \pi) \cdot I \cdot w = 0,9 \cdot I \cdot w. \quad (5.4)$$

Demak, mujassamlangan chulg'amning MYK sinusoida shakli-dan ancha farq qilar ekan, shu sababli bunday chulg'amlar amalda kam ishlatiladi.

### 5.3. Taqsimlangan chulg'amning MYK

Magnit maydonning taqsimlanish egri chizig'ini sinusoidaga yaqimlashtirish maqsadida, har bir faza g'altak-lari bir nechta pazlarga joylashtiriladi. Bunda chulg'amning sovitilishi ham yaxshilanadi.

6 ta pazga ( $q = 3$ ) joylashtirilgan ikki qutbli mashina chulg'ami ko'rsatilgan. Bunday chulg'am MYK ning taqsimlanish shakli pog'onasimon bo'ladi. Taqsimlangan chulg'amning MYK o'ramlar soni  $w = w'/3$  bo'lgan va fazoda  $\alpha = \pi\beta/\tau$  burchakka (bunda  $\beta$  – qo'shmi pazlar o'qlari orasidagi masofa) siljigan uchta mujassamlangan chulg'am MYKlarining geometrik yig'indisidan iborat bo'ladi.

Taqsimlangan chulg'am MYK 1-garmonikasi quyidagicha ifodalanadi:

$$F_{1,1} = 0,9 \cdot I \cdot w \cdot k_{1,1}, \quad (5.5)$$

bunda

$$k_{1,1} = \sin(q\alpha/2) / [q \sin(\alpha/2)] \quad (5.6)$$

– birinchi garmonika uchun chulg'amning taqsimlanish koef-fitsiyenti ( $q=3$ ).

Umumiy holda  $\nu$ -garmonika uchun chulg'amning taqsimlanish koef-fitsiyenti quyidagicha topiladi:

$$k_{1,\nu} = \sin(q\nu\alpha/2) / [q \sin(\nu\alpha/2)], \quad (5.7)$$

bunda  $\nu\alpha$  – alohida g'altaklar MYKlarining  $\nu$ -garmonika tashkil etuvchilari orasidagi siljish burchagi.

Chulg'am g'altaklarini pazlar bo'yicha taqsimlab joylashtirish, uning natijaviy MYK egri chizig'idagi yuqori garmonikalar amplitudalarini ancha kamaytiradi va mashina havo oralig'idagi magnit oqim shaklini sinusoidaga yaqinlashtiradi.

#### 5.4. Qadami qisqartirilgan chulg'amning MYK

Taqsimlangan chulg'amda MYK 5 va 7-garmonikalarining ta'siri ancha kamayadi, lekin ayrim garmonikalar juda oz miqdorda kamayadi. Shuning uchun taqsimlangan chulg'amda chulg'am qadami qisqartiriladi ( $y < \tau$ ). Bu holda chulg'am ikki qatlamli qilib o'raladi, har bir seksiyaning bir tomoni pazning pastki qismida, ikkinchi tomoni esa boshqa pazning ustki qismida yotadi.

Ikki qutbli mashina stator pazlarida  $q = 3$  bo'lganda joylashtirilgan ikki qatlamli qadami qisqartirilgan chulg'am berilgan bo'lsin. Har bir faza chulg'ami oltita g'altakdan iborat. Birinchi, ikkinchi va uchinchi g'altak tomonlari 1, 2, 3 pazlarning pastki qatlamlarida va 2', 3', 4' pazlarning ustki qatlamlarida, to'rtinchi, beshinchi va oltinchi g'altak tomonlari esa - 2, 3, 4 pazlarning ustki qatlamlarida va 1', 2', 3' pazlarning pastki qatlamlarida yotadi.

Qadami qisqartirilgan taqsimlangan chulg'amning MYKni hisoblashda o'ramlar soni  $w' = w/2$ , diametral qadamli, taqsimlangan, bir-biriga nisbatan  $\pi(1-\beta)$  burchakka (bunda  $\beta = w/\tau$  - nisbiy qadam) siljigan 2 ta chulg'am MYK ( $F'_x$  va  $F''_x$ ) larining geometrik yig'indisi orqali aniqlanadi. Bu chulg'amlardan bittasi 1-1', 2-2', 3-3' pazlarning pastki qatlamlarida joylashgan uchta g'altakdan, ikkinchi chulg'ami esa 2-2', 3-3' va 4-4' pazlarning ustki qatlamlarida joylashgan uchta g'altakdan iborat. Natijaviy MYK 1-garmonikasining amplitudasi ko'rsatilgan chulg'amlarning  $F'_1$  va  $F''_1$  MYK lari birinchi garmonika amplitudalarini vektor qo'shish yo'li bilan aniqlanadi. Faza tokining qiymati maksimal bo'lganda bu MYKlar  $F'_1 = F''_1 = 0,45 I w k_{t1}$  bo'ladi.

Demak, pazlarda taqsimlangan qadami qisqartirilgan chulg'am MYK 1-garmonikasining qiymati quyidagicha aniqlanadi:

$$F_1 = 2 F'_1 \cos(\pi\beta/2) = 0,9 \cdot I w \cdot k_{t1} \cdot k_{qis1}, \quad (5.8)$$

bunda

$$k_{qis.1} = \cos(\pi\beta/2) \quad (5.9)$$

– birinchi garmonika uchun *chulg'amning qisqartirish koeffitsiyenti* deyiladi.

Yuqori ( $v$ ) garmonika uchun *chulg'amning qisqartirish koeffitsiyenti* quyidagi ifoda yordamida aniqlanadi:

$$k_{qis.v} = \cos(v\beta/2). \quad (5.10)$$

Shunday qilib, *chulg'am qadami qisqartirilganda MYK va induksiyaning taqsimlanishi sinusoidal shaklga yaqinlashar ekan.*

### 5.5. Pulslanuvchi, elliptik va aylana shakldagi aylanuvchi magnit maydon.

#### Bir fazali *chulg'amning magnit maydon*

Bir fazali *chulg'am o'zgaruvchan tok manbaiga ulansa, vaqt bo'yicha tok chastotasi  $f_1$  bilan o'zgaradigan pulslanuvchi magnit maydon* hosil bo'ladi. Bu holda MYK sinusoidal taqsimlangan bo'lsa *chulg'am o'qidan biror « $\alpha$ » masofada joylashgan havo oralig'ining har bir nuqtasiga quyidagi MYK to'g'ri keladi.*

$$F_x = F_0 \cos(\pi x/\tau) = F_{max} \sin \omega t \cos(\pi x/\tau), \quad (5.11)$$

bunda  $F_0 = F_{max} \sin \omega t$  - *chulg'am o'qida joylashgan nuqtadagi MYK.*

Bu ifodani quyidagicha yozish mumkin

$$F_x = 0,5 F_{max} \sin(\omega t - \pi x/\tau) + 0,5 F_{max} \sin(\omega t + \pi x/\tau). \quad (5.12)$$

Tenglamaning o'ng tomonidagi har qaysi tashkil etuvchisi aylanuvchi MYKning tenglamasini ifodalaydi. Demak, fazoda sinusoidal taqsimlangan pulslanuvchi magnit maydon, bir-biriga nisbatan teskari tomonga aylanuvchi ikkita ( $F'_x$  va  $F''_x$ ) MYK yig'indisidan iborat ekan,

$$\text{ya'ni } F'_x = 0,5 F_{max} \sin(\omega t - \pi x/\tau); F''_x = 0,5 F_{max} \sin(\omega t + \pi x/\tau). \quad (5.13)$$



MYK  $F'_x$  to'liqining aylanish yo'nalishi soat mili (strelkasi) bo'yicha,  $F''_x$  to'liqining aylanishi esa unga teskari deb qabul qilamiz.

MYKlarining maksimal qiymatlari vaqtning istalgan onida o'zgarib qoladi. Agarda bu MYKlar yig'indisini fazoda vektor ko'rinishida tasavvur qilsak, u holda bu vektorning keti aylanani chizadi. Bunday maydonga *aylanasimon maydon* deyiladi. Bu maydonning chiziqli tezligi quyidagicha aniqlanadi:

$$v = dx / dt = \omega \tau / \pi = 2 f \tau. \quad (5.14)$$

Maydonning aylanish chastotasi esa quyidagiga teng, (ayl/min):

$$n_1 = 60v / (\pi D) = 60 \cdot 2f \tau / (\pi D) = 60 f / p, \quad (5.15)$$

bu yerda  $p = \pi D / (2\tau)$  – mashinaning juft qutblari soni.

Demak, mashinaning qutblar soni  $2p$  ni o'zgartirib magnit maydonning har xil aylanish chastotani olish mumkin ekan.

## 5.6. Uch fazali chulg'amning aylanuvchi magnit maydoni

Agarda elektr mashinasining statoriga simmetrik bo'lgan uch fazali chulg'am (o'qlari  $120^\circ$  ga siljigan A–X, V–U va S–Z faza chulg'amlari) joylashtirilsa va unga uch fazali simmetrik tok berilsa, u holda bu chulg'amda *aylanuvchi magnit maydon* hosil bo'ladi. Bunda har bir fazada hosil bo'lgan MYK sinusoidal taqsimlangan deb hisoblanadi.

Ko'rilayotgan chulg'am fazalarining o'qlari bir-biriga nisbatan fazoda  $(2/3)\tau$  ga siljirilgan, ulardagi toklar esa vaqt bo'yicha  $(2/3)\pi$  burchakka siljiganligidan har qaysi fazaviy chulg'am o'qidan x uzoqlikdagi nuqtada MYK tashkil etuvchilar uchun quyidagi ifodalarga ega bo'lamiz:

$$F_{x,A} = F_{\max} \sin \omega t \cdot \cos (\pi x / \tau) = 0,5 F_{\max} \cdot \sin (\omega t - \pi x / \tau) + 0,5 F_{\max} \cdot \sin (\omega t + \pi x / \tau); \quad (5.16)$$

$$F_{xB} = F_{\max} \sin(\omega t - 2\pi/3) \cdot \cos(\pi x/\tau - 2\pi/3) = \\ = 0,5 F_{\max} \sin(\omega t - \pi x/\tau) + 0,5 F_{\max} \sin(\omega t + \pi x/\tau - 4\pi/3); \quad (5.17)$$

$$F_{xC} = F_{\max} \sin(\omega t - 4\pi/3) \cdot \cos(\pi x/\tau - 4\pi/3) = \\ = 0,5 F_{\max} \cdot \sin(\omega t - \pi x/\tau) + 0,5 F_{\max} \cdot \sin(\omega t + \pi x/\tau + 4\pi/3). \quad (5.18)$$

MYK ning natijaviy qiymatini uning  $F_{xA}$ ,  $F_{xV}$ ,  $F_{xS}$  tashkil etuvchilarini qo'shish yo'li bilan olinadi. Bunda MYKning teskari aylanuvchi to'lqinlari yo'qoladi, MYKning natijaviy qiymati esa quyidagi ifoda bo'yicha aniqlanadi:

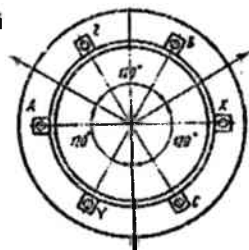
$$F_{x(nat)} = 1,5 F_{\max} \sin(\omega t - \pi x/\tau). \quad (5.19)$$

Uch fazali mashinalar, odatda aylana shakldagi aylanuvchi magnit maydonda ishiyadi.

### 5.7. Ikki fazali chulg'amning aylanuvchi magnit maydoni

Ikki fazali simmetrik chulg'amning A-X va V-U fazalari fazoda bir-biriga nisbatan qutb bo'linmasi  $\tau$  ning yarmiga siljigan bo'ladi. Agar bunday chulg'amning har bir fazasiga bir-biriga nisbatan vaqt bo'yicha  $\beta=90^\circ$  burchakka siljigan ( $I_V = \pm jI_A$ ) tok berilsa, u holda aylanuvchi magnit maydon hosil bo'ladi.

B-Y chulg'am o'qi



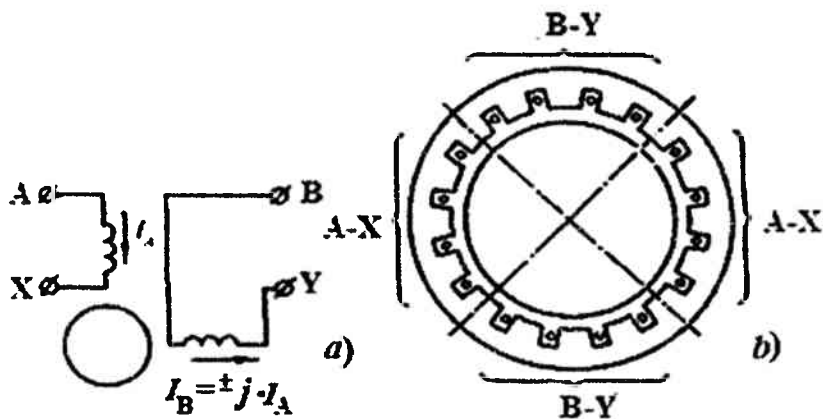
C-Z chulg'am o'qi

A-X chulg'am o'qi

5.1-rasm. Uch fazali ikki qutbli mashina statorida chulg'amlar (pazlar) joylanishi chulg'am o'qi

Bu toklar hosil qilgan MYK tashkil etuvchilari mashina havо oralig'ida ixtiyoriy  $x$  nuqta uchun quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$F_{xA} = F_{\max A} \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\pi x / \tau) = 0,5 F_{\max A} \cdot \sin(\omega t - \pi x / \tau) + 0,5 F_{\max A} \cdot \sin(\omega t + \pi x / \tau); \quad (5.20)$$



5.2-rasm. Ikki fazali ikki qutbli mashina sxemasi (a) va stator chulg'ami pazda joylanishi (b)

$$F_{xV} = F_{\max V} \cdot \sin(\omega t - \pi / 2) \cdot \cos(\pi x / \tau - \pi / 2) = 0,5 F_{\max V} \cdot \sin(\omega t - \pi x / \tau) + 0,5 F_{\max V} \cdot \sin(\omega t + \pi x / \tau - \pi). \quad (5.21)$$

Bunda aylanuvchi maydon tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$F_{xnat} = F_{xA} + F_{xB} = F_{\max} \sin(\omega t - \pi x / \tau). \quad (5.22)$$

Bunday chulg'amda hosil bo'lgan doiraviy magnit maydonning aylanish chastotasi ham (5.22) tenglama bo'yicha topiladi.

Ikki fazali mashinada aylanuvchi magnit maydon olish uchun ikkita fazaning to'g'ri  $F'_{xA}$  va  $F'_{xB}$  yoki teskari  $F''_{xA}$  va  $F''_{xB}$  MYKlari bir-birini kompensatsiya qilishlari kerak, bu shart esa ko'rsatilgan

MYKlar amplitudalari teng, lekin fazalari qarama-qarshi, ya'ni  $\alpha \pm \beta = \pi$  bo'lishi kerak bo'ladi.

Aylanuvchi magnit maydon quyidagi xossalarga ega:

a) natijaviy MYK va induksiyaning maksimumlari doimo tok maksimumiga erishgan faza chulg'aming o'qi bilan mos bo'ladi;

b) natijaviy magnit maydonning siljishi maydonning keyingi maksimumi qaysi qo'shni faza chulg'ami o'qi bilan mos bo'lsa, shu tomonga yo'nalgan bo'ladi. Bu xossa to'g'ridan-to'g'ri oldingi  $a$  bundan kelib chiqadi;

d) maydonning aylanish yo'nalishini teskariga o'zgartirish uchun fazalar ketma-ketlik tartibini o'zgartirish lozim. Uch fazali mashinalarda buning uchun tarmoqqa ulangan uchta fazadan xohlagan ikkitasini almashtirib ulash, ikki fazali mashinalarda tarmoq fazalariga ulangan o'tkazgichlarni almashtirish lozim bo'ladi.

## 5.8. Elliptik maydon

Fazoda bir-biriga nisbatan simmetrik joylashgan chulg'amlardan vaqt bo'yicha o'zaro mos siljigan toklar o'tganda aylanuvchi magnit maydon hosil bo'ladi. Agarda bu shartlardan birortasi bajarilmasa, aylanuvchi magnit maydon emas, balki *elliptik maydon* hosil bo'ladi. Bunday maydon MYKning faza vektori ellipsni chizadi.

Ellips shaklidagi aylanuvchi magnit maydonda natijaviy MYK va induksiyaning maksimal qiymati vaqtning har xil onida o'zgaruvchan bo'ladi (aylanuvchi magnit maydonda esa bu qiymat o'zgarmas bo'ladi).

Ellips shaklidagi maydonni qarama-qarshi yo'nalishlarda aylanayotgan ikkita bir xil (ekvivalent) aylana shaklidagi aylanuvchi magnit maydon ko'rinishda tasavvur qilish mumkin. Natijaviy elliptik maydon yo'nalishida aylanayotgan maydonni - *to'g'ri maydon*, qarama-qarshi tomonga aylanayotganni esa *teskari maydon* deyiladi. Ellips shaklidagi maydonni to'g'ri va teskari aylanuvchi maydonlarga ajratish simmetrik tashkil etuvchilar usuli bilan amalga oshiriladi va bu orqali to'g'ri va teskari ketma-ketliklar MYKlari aniqlanadi.

### III QISM

## ASINXRON MASHINALAR

### 6-bob. ASINXRON MASHINA TUZILISHI, ISHLASH PRINSIPI VA ISH REJIMLARI

Asinxron motorlar elektr yuritmaning asosini tashkil etib, xalq xo'jaligining barcha sohalaridagi boshqarilmaydigan va avtomatik boshqarish jarayonlarida, kon ishlaridagi yirik, o'rta va kichik quvvatli elektr jihozlari yuritmalarida, qishloq xo'jaligida va boshqa sohalarda keng qo'llaniladi. Asinxron mashinalari motor, generator va elektromagnit tormoz rejimlarida ishlash imkoniga ega bo'lsalar ham, aksariyat motor rejimiga mo'ljallanib ishlab chiqarilmoqda.

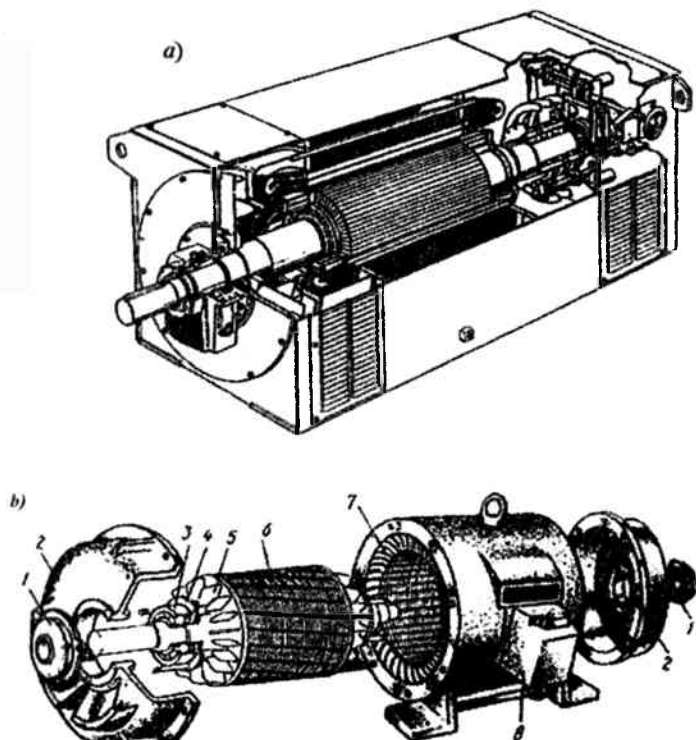
Rotor aylanish tezligini o'zgartirib boshqarish imkoni bo'lgan faza rotorli asinxron motorlar sanoatning ba'zi sohalarida ishiatilsa, yaqin o'tmishgacha boshqarish imkoniyati cheklangan deb kelingan, eng arzon, ekspluatatsiyasi eng qulay deb topilgan qisqa tutashgan rotorli asinxron motorlari xalq xo'jaligining barcha sohalarida eng ko'p tarqalgan elektr motori sifatida ishlatilmoqda.

Yarim o'tkazgichli o'zgartkichlar texnikasi va elektromexanika fanlarining keyingi 20-30-yillar mobaynidagi keskin rivojlanishi natijasida chastotali boshqarish imkoniyati ochib berilgan qisqa tutashgan rotorli asinxron motorlari xalq xo'jaligining ko'plab sohalarida o'z o'rnini topmoqda.

#### 6.1. Asinxron mashinaning tuzilishi

Asinxron mashina ikki qism: qo'zg'almas (rotor) va aylanuvchi (stator) qismlardan iborat. Rotor stator ichiga o'rnatiladi. U val, magnit o'zak (magnit o'tkazgich) va uning tashqi silindrik yuzasidagi pazlariga joylashtirilgan qisqa tutashgan (ko'p fazali) chulg'am yoki uch fazali chulg'amdan iborat. Stanina, magmit o'zak va uning ichki silindrik yuzasidagi pazlarida joylashgan bir, ikki yoki uch fazali

chulg'undan iborat. Stator va rotorlarning magnet o'zaklari maxsus elektrotexnik po'latdan tayyorlangan yupqa tunukalardan yig'iladi.



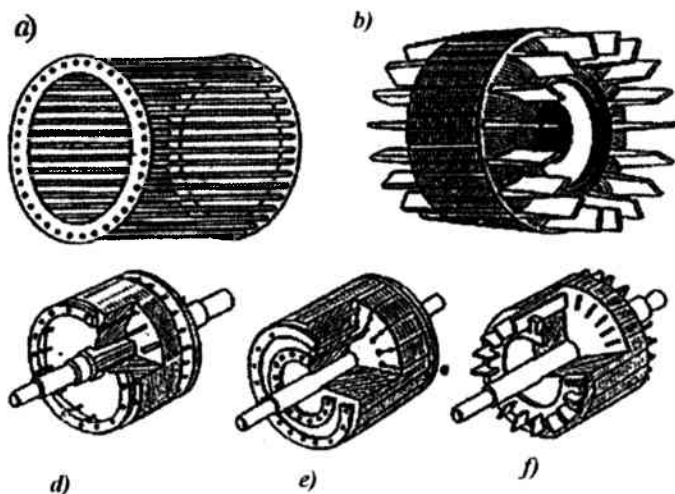
6.1-rasm. "BROWN BOVERI" (Shvetsariya) firmasi ishlab chiqargan katta quvvatli faza rotorli asinxron motori (a); qisqa tutashgan rotorli asinxron motori (b)

Asinxron motor rotorining tuzilishiga qarab ikki xil bo'ladi:

- 1) qisqa tutashgan rotorli asinxron motor;
- 2) faza rotorli asinxron motor.

Qisqa tutashgan rotorli asinxron motor – rotorining magnet o'zagi pazlariga eritilgan alyuminiy quyilib chulg'am o'tkazgichlari (sterjenlar) hosil qilinadi va ularning pazlardan tashqari uchlari ikki tomondan quyma alyuminiy halqalar orqali qisqa tutashgan bo'ladi.

Natijada, yaxlit "olmaxon katagi" (6.2,*a,b*-rasmlar) ko'rinishidagi qisqa tutashgan chulg'am hosil qilinadi.



**6.2-rasm.** Qisqa tutashgan rotor chulg'amlari turlari:

- a)* olmaxon qafasi; *b)* quyma alyuminiyli rotor; *d)* bir katakli; *e)* ikki katakli; *f)* chuqur katakli chulg'amlar

Faza rotorli asinxron motori ham val, valga o'rnatilgan magnit o'zak, uning pazlariga bir-biriga nisbatan  $120^0$  ga siljigan uch fazali chulg'am joylashtiriladi. Rotoring faza chulg'amlari keti yulduz usulida ulangan bo'ladi va boshlari esa valning bir tomonida o'rnatilgan uchta mis yoki jez (mis va rux aralashmasi) halqalarga ulanib, cho'tkalar yordamida tashqi zarjir bilan ulanadi.

## 6.2. Ishlash prinsipi

Uch fazali asinxron motorning stator chulg'amiga uch fazali tarmoqqa ulanganda vujudga kelgan magnit yurituvchi kuch (MYK) statorda aylanish chastotasi  $n_1 = 60f / p$  bo'lgan aylanuvchi magnit maydoni hosil qiladi. Bu maydon kuch chiziqlari stator chulg'ami o'ramlarini va rotorning qisqa tutashgan chulg'am sterjenlarini yoki uch fazali chulg'ami o'ramlarini kesib o'tib, ularda EYK lar hosil

qiladi. Agar rotor chulg'ami qisqa tutashgan bo'lsa, undagi EYK ta'sirida qisqa tutashgan rotor chulg'amlari sterjenlaridan tok o'tib, bu tokning stator hosil qilgan aylanuvchi magnit maydoni bilan o'zaro ta'siri natijasida rotor chulg'ami o'ramlariga elektromagnit kuch ta'sir qiladi. Bu kuch hosil qilgan aylantiruvchi (elektromagnit) moment tormozlovchi momentdan katta bo'lsa, rotorni aylanuvchi magnit maydon yo'nalishida aylantiradi.

Aylanuvchi magnit maydonning aylanish chastotasi  $n_1$  bilan rotorning aylanish chastotasi  $n$  orasidagi nisbiy farq sirpanish ( $s$ ) deyiladi va quyidagicha aniqlanadi:

$$a) s = (n_1 - n) / n_1; \quad b) s = (n_1 - n) / n_1 \cdot 100 \quad (6.1)$$

### 6.3. Asinxron mashinaning ishlash rejimlari

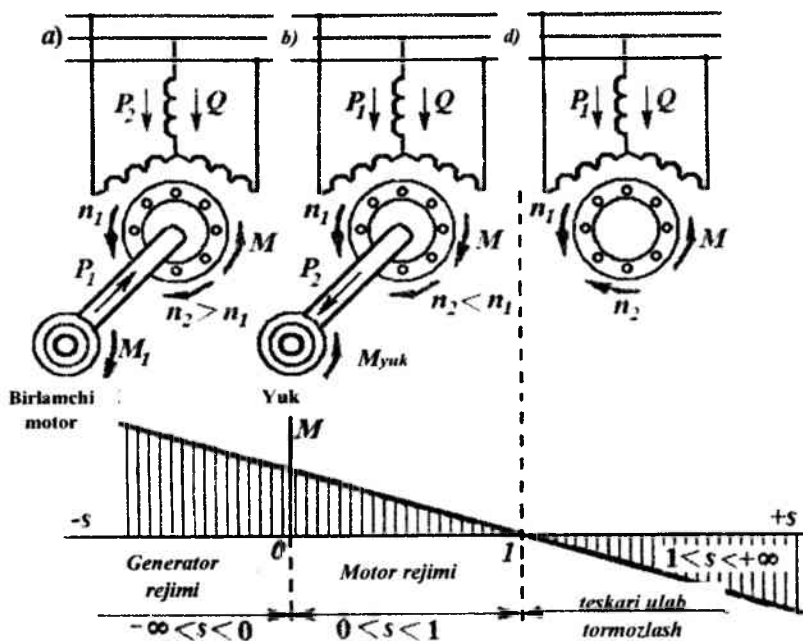
Stator magnit maydonining aylanish chastotasi  $n_1$  va rotorining aylanish chastotasi  $n$  larning qiymatlariga bog'liq holda asinxron mashina motor, generator va elektromagnit tormoz rejimlarida ishlashi mumkin. Asinxron mashina motor rejimida (6.3.a-rasm) ishlaganida rotorning aylanish chastotasi stator aylanuvchi magnit maydoni chastotasidan kichik ( $n_1 > n$ ) bo'lib, sirpanish esa  $0 < s < 1$  oraliqda bo'ladi. Bu holda stator chulg'ami tarmoqdan elektr energiya bilan ta'minlanadi va rotorning vali biror ishchi mexanizmiga mexanik energiya beradi. *Mashina elektr energiyasini mexanik energiyaga aylantiradi.*

Asinxron mashina stator chulg'ami tarmoqqa ulangan, motor rejimining chegaraviy sirpanishida  $s = 1$  da, rotor to'xtagan ( $n = 0$ ) holatni *qisqa tutashuv rejimi* deyiladi. Agar asinxron mashina stator chulg'ami tarmoqqa ulangan, motor rejimining chegaraviy sirpanishida  $s = 0$  da, ya'ni rotorning aylanish chastotasi stator chulg'ami aylanuvchi magnit maydoni chastotasi (sinxron chastotasi) bilan teng ( $n = n_1$ ) bo'lsa, bunda aylantiruvchi moment hosil bo'lmaydi, chunki aylanuvchi maydon rotor chulg'amini kesib o'tmaydi. Bunday rejimni asinxron mashinaning *ideal yuksiz ishlash rejimi* deyiladi.

Agar asinxron mashinaning rotorini birorta mexanizm yordamida stator magnit maydoni aylanish chastotasidan katta ( $n > n_1$ ) bo'lgan



chastotada aylantirilsa rotor chulg'ami o'tkazgichlaridagi EYK, tokning aktiv tashkil etuvchisi va sirpanishiar o'z yo'nalishini o'zgartiradilar. Bunda elektromagnit moment  $M$  ham o'z yo'nalishini o'zgartirib *tormozlovchi* bo'ladi, ya'ni asinxron mashina *generator rejimiga* o'tadi. Asinxron mashina generator rejimda birlamchi motordan mexanik energiya olib, uni elektr energiyaga aylantirib tarmoqqa uzatadi. Bunda sirpanish  $0 > s > -\infty$  oraliqda o'zgaradi.



6.3-rasm. Asinxron mashinaning ishlash rejimlari

Agar asinxron mashinaning rotori boshqa motor bilan stator magnit maydoni aylanishiga teskari yo'nalishda aylantirilsa, rotor chulg'ami o'tkazgichlaridagi EYK va tokning aktiv tashkil etuvchisi motor rejimidagi singari yo'nalgan bo'ladi, ya'ni mashina tarmoqdan energiya oladi. Lekin bu rejimda elektromagnit moment rotor aylanishiga teskari yo'nalib, tormozlovchi bo'ladi (6.3,s-rasm). Bu rejim – asinxron mashinaning *elektromagnit tormoz rejimi* deyiladi.

Bunda rotorning aylanish yo'nalishi aylanuvchi magnit maydonikiga nisbatan teskari bo'lgani uchun rotor aylanish chastotasi  $n < 0$ , sirpanishi esa  $1 < s < +\infty$  oraliqda o'zgaradi. Bu rejimda asinxron mashina rotor tomonidan mexanik energiya, stator tomonidan esa elektr energiya oladi.

Asinxron mashinaning elektromagnit tormoz rejimi amaliyotda kranlarda va ko'targich mexanizmlarda yukni tushirish jarayonida uning tezligini kamaytirish yoki zarur bo'lganda ularni tezda to'xtatish uchun qo'llaniladi. Bu maqsadda stator chulg'amiga tarmoqdan ulangan xohlagan ikki faza simining o'rnini almashtirib ulash kerak bo'ladi. Bu holda statorning aylanuvchi magnit maydoni o'z yo'nalishini o'zgartiradi va tormoz momentini hosil qiladi. Bu rejimda sirpanish katta ( $s = 1$ ) bo'lganligidan, rotor chulg'amidagi EYK, demak, tok ham katta bo'ladi. Bu tokni kamaytirish uchun faza rotorli motorda rotor chulg'amini aktiv qarshilikka – tormozlovchi reostatga ulaydilar.

Sanoatda qo'llanilayotgan asinxron motorlar nominal yuklama bilan ishlaganda sirpanish  $s_N = 3 \div 5 \%$  ni, maxsus asinxron motorlarning ayrimlarida esa  $s_N = 12 \div 15\%$  ni tashkil qiladi.

#### 6.4. Rotor chulg'ami parametrlarini stator chulg'ami o'ramlari soniga keltirish

**Rotori tormozlangan faza rotorli asinxron mashinasida elektromagnit jarayon.** Rotori qo'zg'almas bo'lgan asinxron mashina ishlash rejimi transformator ishlash rejimidan farq qilmaydi. Rotori qo'zg'almas bo'lganda (bunda,  $s = 1$ ) mashinaning stator va rotor chulg'amlarida chastotalari teng ( $f_2 = f_1$ ) bo'lgan EYKlar induktivlanadi va ular quyidagicha aniqlanadi:

$$E_1 = 4,44 f_1 \cdot w_1 \cdot k_{ch.1} \cdot F_{max}; \quad (6.2)$$

$$E_2 = 4,44 f_1 \cdot w_2 \cdot k_{ch.2} \cdot F_{max}, \quad (6.3)$$

bunda  $k_{ch.1}$ ,  $k_{ch.2}$  – stator va rotorning chulg'am koeffitsiyentlari;  $w_1$ ,  $w_2$  – stator va rotor chulg'ami bitta fazasining o'ramlar soni;  $F_{max}$

– magnit oqimning maksimal qiymati. Ifoda (6.2) ning (11.3) ga nisbati

$$E_1/E_2 = w_1 \cdot k_{ch,1} / (w_2 \cdot k_{ch,2}) = k_E \quad (6.4)$$

- rotori ko'zg'almas asinxron mashinada *kuchlanish transformatsiyalash koeffitsiyenti* deyiladi.

Agar faza rotorli asinxron mashinaning rotor chulg'ami ochiq bo'lsa undan chulg'amda tok oqmaydi va bu holatni *yuksiz ishlash rejimi* deyiladi. Bunday rejim statorida bo'ladigan elektromagnit jarayonga ta'sir qilmaydi.

Yuksiz ishlayotgan asinxron mashina statorining faza chulg'am-lari EYKlar muvozanat tenglamasi transformatoridagi kabi quyidagicha yoziladi:

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 + \underline{E}_{\sigma 1} = \underline{I}_0 \cdot r_1, \quad (6.5)$$

bu yerda:

$$E_{\sigma 1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_{ch,1} \cdot F_{\sigma 1} \quad (6.6)$$

tarqoq magnit oqimi  $F_{\sigma 1}$  stator chulg'amida hosil qilgan tarqoq EYK;  $I_{0r1}$  – stator chulg'ami aktiv qarshiligida kuchlanish pasayuvi.

Ifoda (6.5) va yuksiz ishlashda stator tok  $I_0 = I_{0,r} + I_{0,a}$  ekanligini hisobga olgan holda, asinxron mashinaning vektor diagrammasini qurish mumkin. Bu diagramma yuksiz ishlayotgan transformator diagrammasidan (3.2,b-rasin) vektorlar uchun tanlangan mashtab bilan farq qiladi, xolos. Bunga sabab, asinxron mashinada havo oralig'i mavjudligidan yuksiz ishlash toki  $I_0$  transformatoridagidan taxminan 10÷12 marta katta, ya'ni asinxron motorlar seriyasida nominal toki  $I_N$  ning 20÷40% ni tashkil qiladi.

Asinxron mashinalarda yuksiz ishlash toki  $I_0$ ning katta bo'lishi ulardagi eng *asosiy kamchilik* bo'lib, u stator chulg'amidagi Joule isrofini oshiradi va mashinaning quvvat koeffitsiyenti  $\cos\phi$  ni kamaytiradi. Yuksiz ishlash toki  $I_0$  ni kamaytirish uchun asinxron mashinalardagi havo oralig'i ishlab chiqaruvchi tomonidan imkon

qudlar (konstruktiv va texnologik nuqtai nazardan) kichik qilib tayyorlanadi. Masalan, quvvati 5 kWt.gacha bo'lgan asinxron motorlarda stator va rotor orasidagi havo oralig'i  $0,1 \div 0,3$  mm ni tashkil qiladi.

**Rotor chulg'ami parametrlarini stator chulg'amiga keltirish.** Asinxron mashinalarda rotor va stator chulg'amlar o'ramlari soni har xil bo'lganligi sababli ulardagi elektromagnit jarayonni taqqoslash qiyin kechadi. Buni bartaraf etish maqsadida hisoblash usulidan foydalaniladi, ya'ni rotor chulg'amining o'ramlar soni stator chulg'ami o'ramlar soniga keltiriladi. Bu holda asinxron mashinaning tarmoqdan olayotgan aktiv va reaktiv quvvatlari, FIK va  $\cos\phi$  o'zgarmay qolishi kerak.

Stator va rotor chulg'amlarining tegishlicha  $F_1$  va  $F_2$  MYK lari to'liqlarining aylanish chastotalari o'zaro teng bo'lgandagina asinxron mashina ishlay oladi. Demak, stator va rotor bir xil juft qutblari soni ( $p_1 = p_2 = p$ )ga ega bo'lishi kerak. Bu shart bajarilganda rotor MYK to'liqini stator MYK to'liqiga nisbatan qo'zg'almas bo'lib o'zaro ta'sir paydo bo'ladi. Natijada asinxron motorda statordan rotorga elektromagnit quvvat uzatiladi.

Asinxron motorning ishlash jarayonida stator va rotor chulg'amlaridagi toklar mashinada tegishlicha  $F_1$  va  $F_2$  MYK larni hosil qiladi. Bu MYK larning birgalikda ta'sir etishidan statorga nisbatan sinxron chastota  $n_1$  bilan aylanadigan umumiy magnit oqim vujudga keladi. Uning qiymati quyidagiga teng:

$$\Phi = (F_1 + F_2) / R_m = F_0 / R_m, \quad (6.7)$$

bunda  $R_m$  – motor magnit zanjirining oqim  $F$  ga ko'rsatadigan magnit qarshiligi;  $F_0$  – miqdor jihatdan yuksiz ishlashdagi stator chulg'ami MYK ga teng bo'lgan motorning natijaviy MYK:

$$F_0 = 0,45 m_1 I_0 w_1 k_{ch.1} / p; \quad (6.8)$$

$I_0$  – stator chulg'amida yuksiz ishlash toki, A.

Valiga yuklama ulangan ish rejimida motorning bitta qutbiga to'g'ri keladigan stator va rotor chulg'amlarining MYK lari quyidagilarga teng bo'ladi:

$$F_1 = 0,45 m_1 I_1 w_1 k_{ch.1} / p ; \quad (6.9)$$

$$F_2 = 0,45 m_2 I_2 w_2 k_{ch.2} / p ; \quad (6.10)$$

bunda  $m_2$  – rotor chulg'amida fazalar soni;  $k_{ch.2}$  – rotor chulg'amining chulg'am ko'effitsiyenti;  $p$ - mashina juft qutblari soni;  $w_2$  – rotor chulg'ami o'ramlari soni.

Motor valiga qo'yilgan yuk o'zgarganda stator va rotor chulg'amlaridagi  $I_1$  va  $I_2$  toklar o'zgaradi, bu esa shu chulg'amlardagi MYKlar ( $F_1$ ,  $F_2$ )ning tegishlicha o'zgarishiga olib keladi. Lekin bunda asosiy magnit oqim  $F$  o'zgarmay qoladi, chunki stator chulg'amiga berilgan kuchlanish  $U_1 = \text{const}$  va stator chulg'amining EYK  $E_1$  bilan deyarli to'la muvozanatlashadi.

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1). \quad (6.11)$$

EYK  $E_1$  asosiy magnit oqim  $F$  ga proporsional bo'lganligidan mazkur oqim, valdagi yuk o'zgarishidan qat'iy nazar, deyarli ( $F \approx \text{const}$ ) o'zgarmaydi. Shu sababli  $F_1$  va  $F_2$  larning o'zgarishiga qaramasdan, natijaviy MYK o'zgarmay qoladi, ya'ni  $\underline{E}_0 = \underline{E}_1 + \underline{E}_2 = \text{const}$  bo'ladi.

Keltirilgan (hisobiy) chulg'am va haqiqiy chulg'am o'ramlar sonida mashinaning magnit oqimi  $F_{\text{max}}$  o'zgarmay qolishi kerak, ya'ni:

$$F_{\text{max}} = E_2 / (4,44 \cdot w_2 \cdot k_{ch.2} \cdot f_1) = E_2' / (4,44 \cdot w_1 \cdot k_{ch.1} \cdot f_1) = \text{const}, \quad (6.12)$$

bunda rotor torozlangan holatda ( $s=1$ ) uning chulg'amidagi EYK chastotasi  $f_2 = f_1$  bo'lusligi hisobga olingan.

Ifoda (6.12) shartdan rotor chulg'amining keltirilgan EYK  $E_2'$  quyidagiga teng bo'ladi:

$$E_2' = E_2 [w_1 k_{ch.1} / (w_2 k_{ch.2})] = k_E E_2 = E_1, \quad (6.13)$$

bu yerda:

$$k_E = (w_1 k_{ch.1}) / (w_2 k_{ch.2}) \quad (6.14)$$

– rotorli tormozlangan asinxron mashina EYK<sup>2</sup> lari va kuchlanishlari uchun keltirish koeffitsiyenti.

Transformatoridagi singari keltirilgan va haqiqiy chulg'am MYK larining o'zgarmay qolishi  $[(m_1 w_1 k_{ch.1}) I_2' = (m_2 w_2 k_{ch.2}) I_2]$  shartidan rotor chulg'amining keltirilgan toki  $I_2'$  ni aniqlaymiz:

$$I_2' = [(m_2 w_2 k_{ch.2}) / (m_1 w_1 k_{ch.1})] \cdot I_2 = I_2 / k_I = I_1, \quad (6.15)$$

bu yerda

$$k_I = (m_1 w_1 k_{ch.1}) / (m_2 w_2 k_{ch.2}) = (m_1 / m_2) \cdot k_E \quad (6.16)$$

– rotorli tormozlangan asinxron mashina toklari uchun keltirish koeffitsiyenti.

Shunga e'tibor berish kerakki, asinxron mashinada  $k_I \neq k_E$ , chunki umumiy holda stator chulg'ami fazalari soni  $m_1$  bilan rotor chulg'ami fazalari soni  $m_2$  bir xil emas (faqat  $m_1 = m_2$  bo'lgan faza rotorli asinxron motorlarda bu koeffitsientlar bir-biriga teng bo'ladi).

Rotor chulg'ami zanjiridagi quvvat isroflarining o'zgarmay qolishi  $[(m_2 I_2'^2 r_2) = m_1 (I_2')^2 r_2']$  shartidan keltirilgan aktiv qarshilik  $r_2'$  ni hisoblashda (6.15) dan  $I_2'$  ning qiymatini qo'yib topamiz, ya'ni:

$$r_2' = (m_2 / m_1) \cdot (I_2 / I_2')^2 \cdot r_2 = k_E k_I \cdot r_2 = k_z \cdot r_2. \quad (6.17)$$

Rotoring haqiqiy va keltirilgan chulg'amlaridagi nisbiy induktiv kuchlanish pasayishlarining tengligi (ya'ni reaktiv quvvatning o'zgarmay qolishi)  $[I_2 x_2 / E_2 = I_2' x_2' / E_2']$  shartidan rotor chulg'amining keltirilgan induktiv qarshiligi  $x_2'$  ni aniqlaymiz:

$$x_2' = (E_2' / E_2) \cdot (I_2' / I_2) \cdot x_2 = k_E k_I x_2 = k_z \cdot x_2. \quad (6.18)$$

(6.17) va (6.18) ifodalardagi  $k_E \cdot k_I = k_z$  – rotor chulg'ami qarshiliklarini keltirish koeffitsiyenti deyiladi.

«Olmaxon katagi» turidagi qisqa tutashgan chulg'am uchun  $k_E$ ,  $k_I$  va  $k_z$  koeffitsiyentlarni aniqlashda  $w_2 = 0,5$ ;  $m_2 = Z_2$  va  $k_{ch.2} = 1$  deb

qabul qilinadi. U holda  $k_E = 2w_1k_{ch.1}$ ;  $k_1 = 2 m_1 \cdot w_1 k_{ch.1} / Z_2$ ;  $k_z = 4 m_1 \cdot (w_1 k_{ch.1})^2 / Z_2$ . Bunda  $Z_2$  – rotor chulg‘ami sterjenlari soni (har bitta pazda bittadan sterjen), demak, rotor chulg‘amida bir-biridan  $\alpha = 2\pi / Z_2$  burchakka siljigan  $m_2 = Z_2$  ta «fazalari» bo‘lib, juft qutblar soni  $r_2$  esa hamma vaqt aylanuvchi magnit maydon juft qutblari soni  $r_1$  ga teng ( $r_2 = r_1$ ) bo‘ladi.

Chulg‘am parametrlari stator chulg‘amiga keltirilgan, rotori qo‘zg‘almas bo‘lganda asinxron mashinaning EYKlari va toklarining muvozanat tenglamalari transformatornikiga o‘xshagan holda quyidagicha yoziladi:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1); \\ \dot{E}'_2 &= \dot{I}'_2(r'_2 / s + jx'_2); \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \end{aligned} \quad (6.19)$$

Shunday qilib, rotori qo‘zg‘almas bo‘lgan asinxron mashinalarning nazariyasi transformatorlarniki kabi bo‘lar ekan.

Rotori qo‘zg‘almas bo‘lgan asinxron mashinalar asosan *induksion rostlagich va faza) rostlagichi* sifatida ishlatiladi.

#### **Rotori aylanayotgan mashina elektromagnit jarayoni.**

Asinxron mashina normal sharoitda ishlayotganda uning rotori stator chulg‘ami hosil qilgan aylanuvchi magnit maydon yo‘nalishida  $n < n_1$  aylanish chastota bilan aylanadi. Shuning uchun stator aylanuvchi magnit maydonining rotorga nisbatan aylanish chastotasini  $n_1 - n$  ayirma deb aniqlanadi. Bu holatda stator chulg‘amining asosiy magnit oqimi  $F$  rotorni  $n_s = n_1 - n$  aylanish chastotasi bilan kesib o‘tib, uning chulg‘amida EYK  $E_{2s}$  ni hosil qiladi («S» indeksi – sirpanishga tegishli parametr ekanini bildiradi)

$$E_{2s} = 4,44 \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot k_{ch.2} \cdot F_{max}. \quad (6.20)$$

Bundagi rotor chulg‘ami EYK  $E_{2s}$  ning chastotasi  $f_2$  quyidagicha aniqlanadi:

$$f_2 = p \cdot n_s / 60 = p(n_1 - n) / 60. \quad (6.21)$$

Bu tenglamaning o'ng tomonini  $n_1 / n_1$  ga ko'paytirub,  $p n_1 / 60 = f_1$  va  $(n_1 - n) / n_1 = s$  larni hisobga olgan holda (6.21) ni quyidagicha yozish mumkin:

$$f_2 = f_1 \cdot s, \quad (6.22)$$

ya'ni rotor chulg'amidagi EYK chastotasi sirpanishga proporsional bo'lar ekan.

Aylanuvchi rotor chulg'amining EYK  $E_{2s}$  ni quyidagicha aniqlash mumkin.

$$E_{2s} = 4,44 f_2 w_2 k_{ch2} F_{max} = 4,44 f_1 \cdot s \cdot w_2 k_{ch2} \cdot F_{max} = E_2 \cdot s. \quad (6.23)$$

bunda  $E_2 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_2 k_{ch2} \cdot F_{max}$  – rotori tormozlangan asinxron mashina EYK.

## 6.5. Asinxron mashinaning vektor diagrammalari

Asinxron mashinaning vektor diagrammasi (6.19) tenglamalar tizimi asosida qurilib, transformator diagrammasini qurish tartibiga o'xshash bo'ladi.

Lekin asinxron mashinada aylanuvchi magnit maydon mavjudligi birlamchi va ikkilamchi chulg'amlardagi toklarning o'zaro ta'sirida ayrim o'ziga xos xususiyatlarni yuzaga keltiradi. Rotor chulg'ami fazalari fazoda siljigan, toklari esa vaqt bo'yicha siljigan bo'lgani uchun, ular rotorda MYK  $F_2$  ning yuguruvchi to'liqini yaratadi (6.5-rasm). Uning aylanish chastotasi quyidagiga teng bo'ladi:

$$n_{F_2} = 60 f_2 / p_2 = 60 f_1 / p_1, \quad (6.24)$$

bunda  $f_2$  va  $p_2$  – rotor tokining chastotasi va juft qutblari soni; rotori qo'zg'almas bo'lganda stator va rotor EYK lari chastotasi  $f_2 = f_1$  bo'ladi.

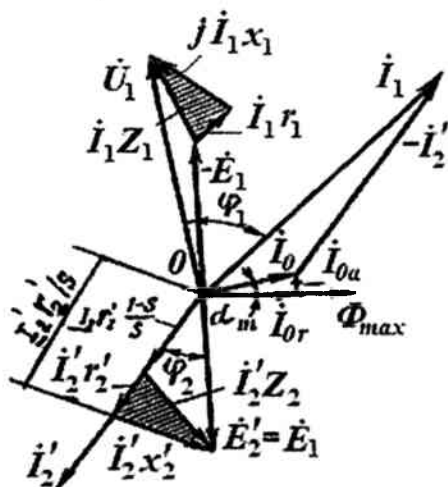
Asinxron mashina ishlashi uchun stator va rotor yuguruvchi  $F_1$  va  $F_2$  MYK to'liqlarining aylanish chastotalari teng bo'lishi zarur. Demak, ro-torning fazalari soni qanday bo'lishidan qat'iy nazar, uning juft qutblari soni bir xil (ya'ni  $r_2 = r_1 = r$ ) bo'lishi shart.



Vektor diagrammani rotor zanjiri uchun qurishda EYK  $E'_2$  va tok  $I_2$  vektorlari orasidagi siljish burchagi quyidagicha hisoblanadi

$$\psi_2 = \arctg(x'_2 s) / r'_2. \quad (6.25)$$

6.4-rasmda asinxron motorning vektor diagrammasi ko'rsatilgan. Bu diagramma transformatorning vektor diagrammasidan faqat shu bilan farq qiladiki, rotor chulg'amida (ikkilamchi chulg'amda) kuchlanish pasayuvi yig'indisi  $n = 0$  bo'lganda rotor chulg'ami EYK  $E'_2$  bilan muvozanatlashadi. Bunga sabab, rotor chulg'ami transformatorning ikkilamchi chulg'ami singari yuklamaga ulangan emas, balki qisqa tutashtirilgan.



6.4-rasm. Asinxron motorning vektor diagrammasi

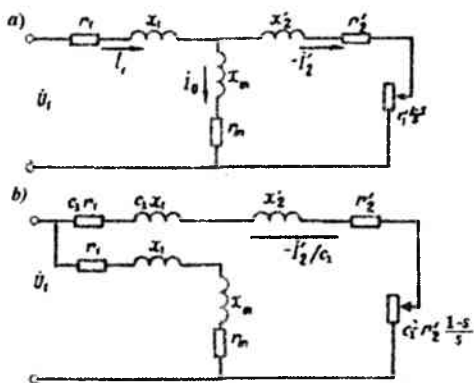
Lekin, agar kuchlanish pasayuvi  $\overline{OA} = I'_2 \cdot r'_2 [(1-s)/s]$ ni rotor chulg'ami klemmalariga ulangan ma'lum yuklama  $r'_2 [(1-s)/s]$  dagi kuchlanish sifatida qaralsa, u holda asinxron motorning vektor diagrammasini ikkilamchi chulg'amning klemmalariga o'zgaruvchan qarshilik  $r'_2 [(1-s)/s]$  ulangan transformatorning vektor diagrammasi sifatida qarash mumkin. Boshqacha qilib aytganda, asinxron motor

elektr jihatdan aktiv yuklama  $r_2'[(1-s)/s]$  da ishlaydigan transformatorga o'xshaydi.

Asinxron motorda magnitlovchi tok transformator magnitlovchi tokidan katta bo'lgani sababli, ularning almashtirish sxemalari bir-biridan farq qiladi. Agar transformator nazariyasida magnitlovchi konturni ayrim hollarda amaliy hisoblarda e'tiborga olinmasa, asinxron motor ishini tahlil qilganda bunday yondoshib bo'lmaydi, chunki bu holda katta xatolikka yo'l qo'yilgan bo'ladi.

## 6.6. Almashtirish sxemasi

Asinxron mashinalarining toki, quvvati va kuchlanish pasayuvini aniqlash uchun almashtirish sxemasidan foydalanish mumkin. Mashinaning almashtirish sxemasi uning asosiy (6.19) tenglamalari asosida quriladi. Almashtirish sxema bir-biriga elektromagnit vositasida bog'langan stator va rotor zanjirlari parametrlarining qarshiliklari orqali ko'rsatiladi.



6.5-rasm. Asinxron motorning almashtirish sxemalari

**T-simon almashtirish sxemasi.** 6.5-rasmda asinxron mashinaning T-simon almashtirish sxemasi ko'rsatilgan.

Bu sxema uchta asosiy shaxobchadan iborat:

- 1) qarshiliklari  $r_1, x_1$  va toki  $i_1$  bo'lgan stator zanjiri;
- 2) qarshiliklari  $r_0, x_0$  va toki  $i_0$  bo'lgan magnet zanjiri;

3) qarshiliklari  $r_2' + r_2'(1-s)/s = r_2'/s$ ,  $x_2'$ , va toki  $(-I_2')$  bo'lgan rotor zanjiri.

Asinxron motorning magnit jihatdan bog'langan stator va rotor chulg'amlari T-simon almashtirish sxemasida (*a*-rasm) stator va rotor elektr zanjirlari bilan almashtirilgan. Bunda aktiv qarshilik  $r_2'(1-s)/s$  ni qo'zg'almas rotor chulg'amiga ulangan tashqi qarshilik sifatida qarash mumkin. Bu holda asinxron mashina aktiv yuklama ulangan transformator sifatida ishlaydi va bu jarayonda sxemadagi  $r_2'(1-s)/s$  qarshilik yagona o'zgaruvchan parametr hisoblanadi.

Bu qarshilikning qiymati sirpanish bilan, demak, asinxron motorning valiga qo'yilgan mexanik yuk bilan aniqlanadi. Masalan, agar motor validagi foydali (yuk) momenti  $M_2=0$  bo'lsa, u holda sirpanish  $s \approx 0$  bo'lganligidan  $r_2'(1-s)/s = \infty$  bo'lib, bu hol motorning yuksiz ishlash rejimiga mos keladi. Agar valdagi yuk momenti aylantiruvchi momentdan katta bo'lsa, u holda motor rotori to'xtaydi va  $s=1$  bo'ladi. Bunda  $r_2'(1-s)/s=0$  bo'lib, asinxron motorning qisqa tutashuv rejimiga mos keladi.

T-simon almashtirish sxema ish jarayonini to'la aks ettiradi, lekin unda bir-biriga ta'sir etuvchi konturlar mavjud bo'lib, ularni hisobga olish ancha murakkabligi, bu sxemaning kamchiligi hisoblanadi. Shu sababli amaliyotda soddalashtirilgan G-simon almashtirish sxema ishlatiladi (6.6, *b*-rasm). Bunday soddalashtirish magnitlovchi kontur ( $Z_0 = r_0 + jx_0$ )ni sxema ichidan tashqariga - umumiy klemmalarga olib chiqish bilan amalga oshiriladi. U holda magnitlovchi tokning qiymati o'zgarmay qolishi uchun bu konturga  $r_1$  va  $x_1$  qarshiliklar ketma-ket ulanadi. Natijada hosil bo'lgan sxemada stator va rotor konturlarining qarshiliklari ketma-ket ulangan bo'lib, ular ish konturini hosil qiladi. Magnitlovchi kontur ana shu konturga parallel ulangan bo'ladi; bu holda konturlar bir-biriga ta'sir etmaydi.

G-simon almashtirish sxemasi ish konturining parametrlarini hisoblashda aniqlik kiritishni talab etadi. Ideal yuksiz ishlashda ( $s=0$ ) tarmoq kuchlamishi  $U_1$ ning stator chulg'ami EYK  $E_1$ ga nisbati bilan aniqlanadigan ( $s_1=U_1/E_1$  kompleks koeffitsiyentini hisoblash ifodalarga kiritish bilan amalga oshiriladi.

G-simon almashtirish sxema uchun quyidagilarni yozish mumkin.

$$\dot{I}'_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2); \dot{I}'_2 = \dot{I}'_2 / \bar{c}_1, \quad (6.26)$$

bunda  $\dot{I}'_1$  va  $\dot{I}'_2$  – mos ravishda, T-simon va G-simon almashtirish sxemalari konturining toklari; hisoblashlarda  $\dot{I}'_0 \approx \dot{I}_0$  deb olganda xatolik kam bo'ladi; – G-simon almashtirish sxemaga kiritilgan kompleks son.

$$\bar{c}_1 = 1 + (r_1 + jx_1)(r_0 + jx_0), \quad (6.27)$$

Bu sxemada kompleks  $\bar{c}_1$  ni uning moduli  $s_1$  bilan almashtirish mumkin. Quvvati 10 KВт dan katta bo'lgan asinxron mashinalar uchun  $c_1 = 1,02 \div 1,05$ .

Asinxron mashinalarni loyihasida bu qiymat ahamiyatli bo'lsa, elektromagnit jarayonlarni tahlil qilishda  $s_1 = 1$  deb olinsa katta va hato bo'lmaydi. G-simon almashtirish sxemasi magnitlovchi konturi ko'chirilgan yoki soddalashtirilgan almashtirish sxemasi deyiladi.

Aylanayotgan rotor elektr zanjiri toklari sirpanish  $s$  ning (6.22) va (6.23) dagi qiymatlarini hisobga olgan holda quyidagicha bo'ladi:

$$\dot{I}'_{2s} = \dot{E}_2 \cdot s / \sqrt{r_2^2 + (x_2 \cdot s)^2}. \quad (6.28)$$

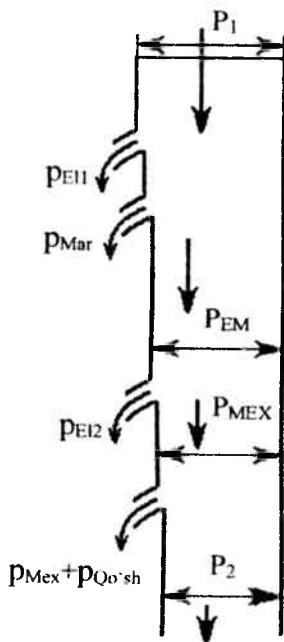
G-simon almashtirish sxema yordamida konturlardagi tok qiymati quyidagicha hisoblanadi.

$$\dot{I}'_2 = \dot{U}_1 / \sqrt{(r_1 + \bar{c}_1 r_2' / s)^2 + (x_1 + \bar{c}_1 x_2')^2} \quad (6.29)$$

## 7-bob. ASINXRON MASHINA ENERGETIK JARAYONI, ELEKTROMAGNIT MOMENTI VA MEXANIK TAVSIFI

### 7.1. Asinxron mashinani energetik diagrammasi

Asinxron mashina motor rejimida ishlaganda (7.1-rasm) tarmoqdan elektr energiyani oladi va mexanik energiyaga aylantiradi. Bu jarayonda motorda energiya isroflari bo'ladi.



7.1-rasm. Asinxron motor energetik diagrammasi

Asinxron motor tarmoqdan

$$P_1 = m_1 \cdot I_1 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (7.1)$$

aktiv quvvat oladi. Bu quvvatning bir qismi stator chulg'amidagi elektr isroflari (7.1-rasm)

$$P_{E1} = m_1 \cdot I_1^2 r_1 \quad (7.2)$$

va stator magnit o'zagidagi magnit isroflariga sarf bo'ladi

$$P_{Mag} = \varphi(U_1, f_1).$$

Aylanuvchi magnit maydon vositasida rotorga elektromagnit quvvat  $P_{EM}$  uzatiladi

$$P_{EM} = P_1 - P_{E1} - P_{Mag}. \quad (7.3)$$

Elektromagnit quvvatning bir qismi rotor elektr zanjiridagi isrofga sarf bo'ladi

$$P_{E12} = m_2 \cdot I_2^2 r_2 = m_1 \cdot (I_2')^2 r_2', \quad (7.4)$$

qolgan qismi esa foydali mexanik quvvatga aylanadi

$$P_2 = P_{EM} - P_{E12}. \quad (7.5)$$

Rotor aylanishida podshipniklardagi ishqalanish va aylanuvchi qismlarining havoda ishqalanishi natijasida mexanik quvvat isrofi bo'ladi.

Bundan tashqari tarqoq magnit oqimlari, stator va rotor po'lat o'zagi tishlarida hamda yaxlit po'lat qismlarida magnit maydonning o'zgarib turishi natijasida ham qo'shimcha quvvat isroflari bo'ladi. Asinxron motorning to'la mexanik quvvati  $R_2$  mexanik isrof  $P_{mex}$  va qo'shimcha  $P_{Ko'sh}$  isroflarni ayirib, motor orqali ishchi mexanizmga uzatilayotgan foydali quvvat  $R_2$  aniqlanadi

$$P_2 = P_{MEX} - (P_{MEX} - P_{Ko'sh}). \quad (7.6)$$

## 7.2. Elektromagnit moment

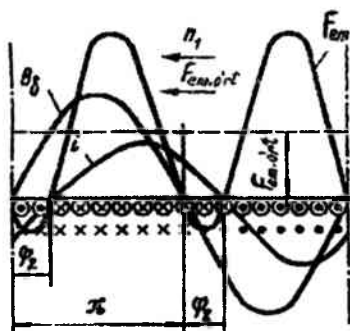
Elektromagnit momentning analitik ifodasini birnecha usullar - elektromagnit kuchlar ifodasi yordamida yoki elektromagnit quvvat ifodasi yordamida aniqlash mumkin. Quyida shularni alohida ko'rib chiqamiz.

**Elektromagnit momentni elektromagnit kuchlar yordamida aniqlash.** Asinxron mashinaning elektromagnit momenti rotor chulg'ami o'tkazgichlaridan oqib o'tayotgan tokning aktiv tashkil etuvchisi ( $I_2 \cos\psi_2$ ) va stator chulg'ami aylanuvchi magnit maydon  $F_{\max}$  bilan ta'siri natijasida (Amper qonuni asosida) elektromagnit  $F_{em}=B_{\delta}li$  kuch tufayli (7.1-rasm) vujudga keladi.

Bu kuch hosil qilgan elektromagnit moment quyidagicha aniqlana

$$M=C_M F_{\max} I_2 \cos\psi_2, \quad (7.7)$$

bunda  $C_M = p \cdot m_2 \cdot k_{ch2} / \sqrt{2}$  - o'zgarmas kattalik;  $F_{\max}$  - magnit oqimning maksimal qiymati. Ushbu ifoda faqatgina asinxron mashinalar uchungina taalluqli bo'lmay, balki elektr mashinalarining barcha turlari uchun ham tegishlidir. Bu ifoda moment qiymatining motorda sodir bo'ladigan fizik hodisalar orasidagi bog'lanishni o'rnatadi. Undan motorning har xil rejimlardagi ish jarayonini sifat jihatdan tahlil qilishda foydalanish qulay hisoblanadi.



7.2-rasm. Havo oralig'idagi magnit induksiya ( $B_{\delta}$ ), rotor chulg'ami toki ( $i_2$ ) va elektromagnit kuch ( $F_{\text{EM}}$ )

Lekin bu ifodaga kirgan ( $F_{\max}$ ,  $I_2$  va  $\cos\psi_2$ ) kattaliklar to'g'ridan-to'g'ri tarmoq kuchlanishi va mashinaning ish rejimi bilan bog'lanmagan, ularni tajribada aniqlash esa ancha murakkabdir. Shu sababli quyida elektromagnit momentning qiymatini eng oddiy aniqlash, unga mashinaning har xil parametrlari va ekspluatatsion rejimlarining ta'sirini hisobga olish imkonini beradigan boshqa ifodasi keltirib chiqariladi.

***Elektromagnit momentni elektromagnit quvvat orqali aniqlash.***

Energetik diagrammadan aniqlangan elektromagnit ( $P_{EM}$ ) va mexanik quvvat ( $P_{MEX}$ )larni elektromagnit moment orqali ifodalaymiz.

$$\begin{aligned} P_{EM} &= M \omega_1; \\ P_{MEX} &= M \omega, \end{aligned} \quad (7.8)$$

bunda  $\omega_1 = 2\pi n_1/60 = 2\pi f_1/p$  va  $\omega = 2\pi n/60$ , mos ravishda, statordagi aylanuvchi magnit maydon va rotor burchak tezliklari. (7.8) ga asoslanib, elektromagnit moment quyidagiga teng bo'ladi

$$M = P_{EM}/\omega_1. \quad (7.9)$$

Shunday qilib, asinxron motorning elektromagnit momenti, uning elektromagnit quvvatiga proporsional ekan. Energetik diagrammadan foydalanib rotor chulg'amidagi isroflarni aniqlash uchun quyidagi ifodalarini yozish mumkin:

$$P_{E12} = P_{EM} - P_{MEX} \quad (7.10)$$

yoki

$$P_{E12} = M \omega_1 - M \omega = M (\omega_1 - \omega). \quad (7.11)$$

(7.11) ifodaning o'ng tomonini ( $\omega_1/\omega_1$ ) kasrga ko'paytirib quyidagini olamiz.



$$p_{EI2} = M\omega_1 \cdot s. \quad (7.12)$$

(7.112) ifodadan quyidagini olamiz:

$$M = p'_{EI2} / (\omega_1 \cdot s) = m_1 (I'_2)^2 r'_2 / (\omega_1 s), \quad (7.13)$$

ya'ni, asinxron motorning elektromagnit momenti rotor chulg'amidagi elektr quvvat isroflariga proporsional ekan.

Agar G-simon almashtirish sxemasidan foydalanib (6.29) bo'yicha aniqlangan rotor toki  $I_2$  ning qiymatini (7.13) ga qo'yib, ( $\omega_1 = 2\pi f_1/p$ ) ni ham e'tiborga olsak, asinxron mashinaning elektromagnit momenti ifodasining umumiy ko'rinishi hosil bo'ladi

$$M = \frac{m_1 p U_1^2 r'}{2\pi \cdot f \cdot s [(r_1 + r'_2/s)^2 + (x_1 + x'_2)^2]}. \quad (7.14)$$

Nominal quvvati 10 KwT dan katta bo'lgan asinxron motorlari uchun (7.14) ifodada  $s_1 \approx 1$  deb qabul qilingan. Elektromagnit momentni hisoblashda yuqoriroq aniqlik talab qilinganda kompleks son  $s_1 \approx 1,02-1,03$  hisobga olinadi

$$M = \frac{m_1 p U_1^2 r'}{2\pi \cdot f \cdot s \cdot [(r_1 + c_1 r'_2/s)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2]}. \quad (7.14,a)$$

Ifodalar (7.14) va (7.14,a) larda sirpanish  $s$  dan boshqa hamma kattaliklar o'zgarmas deb hisoblanib, u valdagi mexanik yukka proporsional ravishda o'zgaradi.

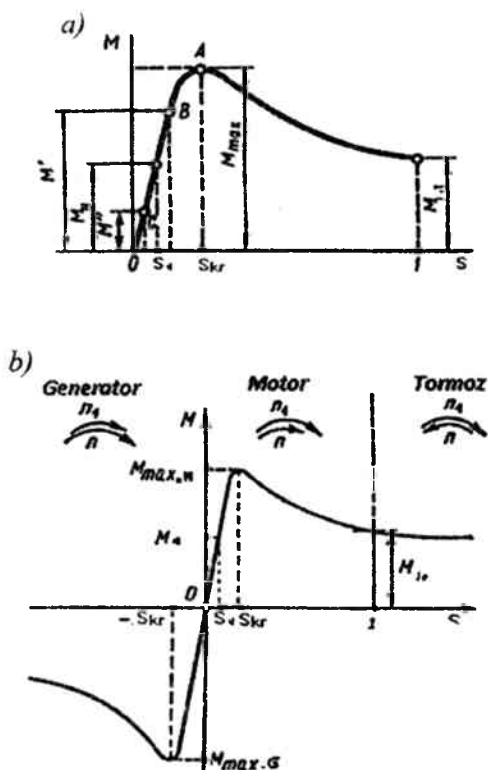
### 7.3. Mexanik tavsif

Ko'rilayotgan asinxron mashinani ideal mashina deb hisoblab, undagi mexanik isroflar (qiymati kichik) e'tiborga olinmasa, elektromagnit moment  $M$  valdagi moment  $MYK$  ga teng deb bo'ladi. Bundan buyon, elektr motori uchun qilinayotgan tahlillarda

«elektromagnit moment  $M$ » iborasi oʻrniga «aylantiruvchi moment  $M$ » iborasi ishlatiladi.

Stator chulgʻami kuchlanishi nominal  $U_1 = U_{1N}$  boʻlgandagi  $M = f(n)$  yoki  $M = f(s)$  bogʻlanish asinxron motorning mexanik tavsifi (7.3, a-rasm) deyiladi.

Aylantiruvchi momentning sirpanishga bogʻliqligi (yoki mexanik tavsif)  $M = f(s)$ . Mexanik tavsifni qurish uchun (7.14) ifodadan foydalanish mumkin. Bunda parametrlar oʻrniga qiymatlari qoʻyilib, soʻngra sirpanish  $s$  ga har xil qiymatlar berib, asinxron motor uchun izlangan mexanik tavsifni quriladi (7.3, a-rasm).



7.3-rasm. Asinxron mashinaning motor (a) va barcha rejimlari uchun qurilgan mexanik tavsiflari (b)

Maksimal momentga to'g'ri keladigan sirpanishni *kritik sirpanish*  $s_{kr}$  deyiladi. Uning qiymatini aniqlash uchun (parametrlari o'zgarmas deb hisoblagan holda) momentdan sirpanishi bo'yicha birinchi hosila olib, uni nolga tenglaymiz ( $dM / ds = 0$ ), bunda umumiy hol uchun quyidagi natijaga ega bo'lamiz.

$$s_{kr} = \pm c_1 r_2' / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2} . \quad (7.9)$$

Agarda  $c_1 \approx 1$  va qiymati ancha kichik bo'lgani uchun  $r_1 \approx 0$  deb hisoblansa, u holda kritik sirpanish  $s_{kr}$  ni aniqlash ifodasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi.

$$s_{kr} = \pm r_2' / (x_1 + x_2') = r_2' / x_{qt} , \quad (7.9,a)$$

Maksimal (kritik) moment  $M_{max}$  ning qiymatini aniqlash uchun (7.9) dan  $s_{kr}$  ning qiymatini (7.8,a) ga qo'yib hisoblanadi.

$$M_{max} \approx \pm \frac{1}{2} \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1}{2\pi f_1 \cdot c_1 [\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}]} , \quad (7.10)$$

(7.9), (7.9,a) va (7.10)larda musbat (+) ishora motor rejimiga, manfiy (-) ishora esa generator rejimiga taalluqli (7.2,b-rasm).

Umumiy qo'llanish asinxron mashinalar uchun stator chulg'ami-ning aktiv qarshiligi induktiv qarshiliklar yig'indisidan [ $r_1 \ll (x_1 + x_2')$ , ya'ni taxminan 10÷12 foizini tashkil qiladi] ancha kichik bo'lgani sababli  $r_1 \approx 0$  deb, hamda  $s_1 \approx 1$  ekanligini e'tiborga olib  $M_{max}$  ning soddalashgan ifodasini aniqlaymiz.

$$M_{max} \approx \pm \frac{1}{2} \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1}{2\pi f_1 \cdot (x_1 + x_2')} . \quad (7.10,a)$$

Ifoda (7.10)ning tahlili shuni ko'rsatadiki, asinxron mashina generator rejimida ishlaganda, uning maksimal momenti  $M_{max.G}$  motor rejimdagi maksimal momenti  $M_{max.M}$  ga nisbatan kattaroq bo'ladi. Asinxron motorning maksimal momenti tarmoq kuchlanishi

kvadratiga proporsional ekan, ya'ni  $M \equiv U_1^2$ . Bu esa uning kamchiligi hisoblanadi, chunki kuchlanish, masalan, 10 % ga kamaysa elektromagnit moment  $M' = 0,9^2 \cdot M = 0,81 \cdot M_N$  ga, ya'ni 19 % ga kamayadi va motor ishlashining turg'un bo'lmashligiga olib keladi.

Asinxron motor maksimal momentining karraligi  $k_M = M_{\max}/M_N$  Davlat standarti tomonidan qat'iy belgillangan, ya'ni  $k_M \geq 1,8$ . Ayrim maxsus asinxron motorlarda  $k_M$  ning qiymati 3,0 gacha etadi. Bu koeffitsiyent asinxron motorning o'ta yuklanish qobiliyatini xarakterlaydi.

Ifodalar (7.9) va (7.10) ning tahlilidan quyidagi muhim xulosalarga kelamiz.

1) kritik sirpanish  $s_{kr}$  rotor zanjirining aktiv qarshiligi  $r'_2$  ga proporsional ravishda o'zgaradi;

2) maksimal moment  $M_{\max}$  ning qiymati rotor zanjiri aktiv qarshiligi  $r'_2$  ga bog'liq emas;

3) asinxron motorning maksimal momenti  $M_{\max}$  va o'ta yuklanish qobiliyati  $k_M$  asosan stator va rotor chulg'amlari tarqoq induktiv qarshiliklari (mos ravishda  $x_1$  va  $x'_2$ ) yig'indisiga teskari proporsional;

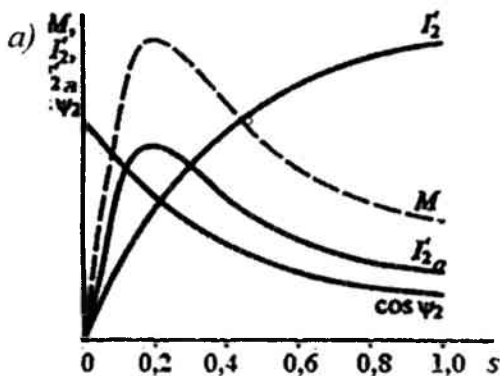
4) maksimal moment  $M_{\max}$  har qanday sirpanishdagi moment singari  $U_1^2$  ga proporsionaldir, ya'ni berilayotgan kuchlanish kamayganda motorning o'ta yuklanish qobiliyati keskin pasayadi.

$M = f(s)$  - mexanik tavsifning motor rejimida o'zgarish xarakteri quyidagicha tushuntiriladi. YUk momenti yuksiz ishlash rejimidan oshirilsa, sirpanish  $s$  ortadi. Bunda aktiv-induktiv xarakterli rotor zanjiri qarshiligidan o'tadigan tok  $I'_2$  ni va uning shu zanjirdagi EYK  $\dot{E}'_2$  dan orqada qoluvchi  $\psi_2$  burchakni hisoblash uchun quyidagi ifodalar yetarli asosan rotor toki  $I'_2$  va faza siljish burchagi  $\psi_2$  ortadi,  $\cos\psi_2$  esa kamayadi.

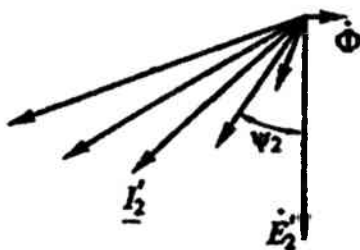
$$I'_2 = \frac{s \cdot \dot{E}'_2}{(r'_2 + js \cdot x'_2)} = \frac{\dot{E}'_2}{\frac{r_2}{s} + jx_2}, \quad (7.11)$$

$$\psi_2 = \arctg \frac{x_2}{r_2} = \arctg \frac{s \cdot x_2}{r_2} = \arctg \frac{x_2}{r_2 / s}, \quad (7.12)$$

Sirpanish ortib borishi bilan rotor tokining induktiv xarakteri ortadi, uning aktiv tashkil etuvchisi esa avval ( $\psi_2$  kichik paytda) ortib, so'ngra (umumiy tokning ortishidan qat'iy nazar) kamaya boradi (7.4,b-rasm), chunki EYK  $\dot{E}'_2$  va tok  $I'_2$  orasidagi siljish burchak  $\psi_2$  ortadi.



b)



7.4-rasm. Asinxron motor mexanik tavsifi (a); valdagi yuk o'zgarishida rotor tokining vektor diagrammasi

$M=f(s)$  bog'lanishning o'zgarish xarakterini asinxron motorning ishlash prinsipidan kelib chiqqan holda analitik yo'l bilan ham

tushuntirish mumkin, ya'ni (7.1) ga asosan uning elektromagnit momenti magnit oqim  $F$  va rotor tokining aktiv tashkil etuvchisi  $I_{2a}$  larning ko'paytmasiga proporsionaldir. Bundan,  $F = \text{const}$  bo'lganda mexanik tavsifning o'zgarish xarakteri  $I_{2a} = f(s)$  grafigi bilan aniqlanar ekan.

**Ishga tushirish momenti.** Asinxron motorni ishga tushirish uchun stator chulg'amini elektr tarmog'iga ulanadi. Bunda, rotor aylanish tezligi miqdori tarmoqqa ulanish onidadayoq  $0$  dan nominalgacha o'zgarib qolmaydi. Tezlikning bunday o'zgarishi uchun biror "ishga tushirish davomiyligi" deb nomlangan ( $t_{IsTush}$ ) muddat o'tishi zarur. Shu muddatning boshlanishida, ya'ni stator tarmoqqa ulangan, ammo rotor aylanma harakat olishga ulgurmaganda rotor sirpanishi  $s=1,0$  bo'ladi. Motorning elektromagnit momenti (7.14) ifodasiga  $s=1,0$  qo'ysak, motorning ishga tushirish quvvati  $M_{it}$  aniqlanadi.

$$M_{IshTush} = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{(r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2} \quad (7.13)$$

Bunda, maxrajdagi qarshiliklar  $r_{qt}^2 + x_{qt}^2 = z_{qt}^2$  ekanligini e'tiborga olsak, ishga tushirish momentining quyidagi ifodasi hosil bo'ladi.

$$M_{IshTush} = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot z_{qt}^2} = \frac{pm_1}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot I_n^2 \cdot r_2'} \quad (7.14)$$

bunda  $I_{it}$  – sirpanish  $s=1$  bo'lgandagi ishga tushirish toki.

Ifoda (7.14) dan ko'rinadiki, motorning ishga tushirish momenti asosan ishga tushirish tokining kvadrati  $I_{it}^2$  ga proporsional bo'lar ekan. Undan tashqari zarurat tug'ilganda qisqa tutashgan rotorli asinxron mashinada «olmaxon katagi» turidagi chulg'am qarshiligini oshirish mumkin bo'lgan maxsus konstruksiyada ishiab chiqarib, faza rotorli motorda esa rotor chulg'amiga qo'shimcha aktiv qarshilik ulash yo'li bilan ishga tushirish mumkin bo'lib,  $s=1$  bo'lgandagi momentini oshirish va tokni kamaytirish imkoniyatini hosil qilish mumkin ekan.

Davlat Standartining talabiga ko'ra, asinxron motor nominal yukda ishga tushishi uchun quyidagi shart bajarilishi, ya'ni ishga tushirish momentining karraligi  $k_{t,1} = M_{t,1} / M_{\max} \geq 1$  bo'lishi kerak.

**Mexanik tavsifni katalog qiymatlari yordamida qurish.** (7.7) va (7.28) ifodalarga asosan asinxron motorning elektromagnit momenti quyidagiga teng.

$$M = \frac{P_{E12}}{\omega_1 \cdot s} = \frac{m_2 \cdot I_2'^2 \cdot r_2'}{\omega_1 \cdot s} = \frac{m_2 \cdot s E_2'^2 \cdot r_2}{\omega_1 (r_2^2 + s^2 x_2^2)} \quad (7.15)$$

Motor validagi mexanik yukning o'zgarishi bilan magnit oqim o'zgarmaydi, shu sababli  $E_2' \approx \text{const}$  deb hisoblash mumkin. Ifoda (7.8)dan aniqlangan momentdan sirpanish bo'yicha birinchi hosila olinib, uni 0 ga tenglashtirib, kritik sirpanish  $s_{kr}$  qiymatini topish mumkin, ya'ni  $s_{sp} = \pm r_2' / x_2'$ . U holda maksimal moment quyidagiga teng bo'ladi.

$$M_{\max} = \pm \frac{m_2 E_2'^2}{2\omega_1 x_2'} \quad (7.16)$$

Ifoda (7.15) ni (7.16) ga bo'lib ixchamlashtirishdan keyin nisbiy birliklarda hisoblashga qulay bo'lgan quyidagi soddalashgan bog'lanishga ega bo'lamiz:

$$\frac{M}{M_{\max}} \approx \frac{2}{s_{sp} / s + s / s_{sp}} \quad (7.17)$$

Bu ifodani Kloss formulasi deyiladi va u ba'zi amaliyotdagi taxminiy hisoblarda qo'llaniladi.

Ifoda (7.17) bo'yicha hisoblashda aniqlik katta bo'lmaydi, chunki stator chulg'amidagi kuchlanish pasayishi e'tiborga olmagan. Ammo asinxron motorning sirpanish kichik qiymatlarida ( $s = 0$  dan  $s_{kr}$  gacha) tekshirishda magnit oqim juda kam o'zgarishi sababli, bu ifoda amaliyotda dastlabki tahlil uchun yetarli bo'lgan tezkor natija beradi.

#### 7.4. Asinxron motorli yuritmaning statik turg'un ishlashi

Statik rejim deb elektromexanik tizim barcha elementlarining harakati rotor o'zgarish va bir xil aylanish tezligiga mos kelishiga aytiladi. Motor ishining turg'unligi deb, valdagi mexanik yukning qisqa muddat ichida keskin oshishi yoki stator chulg'amiga berilayotgan tarmoq kuchlanishi qiymatining kamayish jarayonida barqaror aylanish chastotasini tiklay olish qobiliyatiga aytiladi. Bunday rejimdan tiklanish elektromagnit moment va barcha yuklanish momentlari yig'indisiga teng bo'lishi bilan xarakterlanib, boshqaruvchi va yuklovchi ta'sirlar natijasida hosil bo'lgan o'tkinchi jarayon erkin tashkil etuvchilarining so'nishidan keyin sodir bo'ladi.

Nazariy mexanikadan ma'lumki, rotorga qo'yilgan momentlarning muvozanat tenglamasi quyidagicha bo'ladi:

$$M = M_{st} - J d\omega / dt, \quad (7.18)$$

bunda  $M$  – motorning elektromagnit momenti;  $M_{st} = M_0 + M_2$  - valda tormozlovchi ta'sir etuvchi statik moment;  $J d\omega/dt$  – aylanuvchi massalar inersiyasi;  $J$  va rotorning tezlanishi  $d\omega / dt$  larga bog'liq bo'lgan dinamik moment.

Motor turg'unlik rejimida ( $M = M_{st}$ ) ishlaganda rotor tezlanishi 0 ga teng

$$d\omega / dt = (M - M_{st}) / J = 0, \quad (7.19)$$

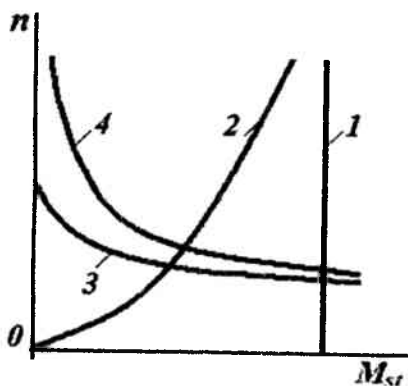
ya'ni, rotor o'zgarish chastotada ishlayapti, degani bo'ladi. Agar  $M > M_{st}$  bo'lsa, rotorning aylanish chastotasi ortadi,  $M < M_{st}$  bo'lganda esa - sekinlashadi.

Turg'unlik asinxron motor ishlayotgan konkret shartlarga bog'liq bo'ladi, xususan, motorning va u harakatga keltirayotgan ishlab chiqarish mexanizmlari mexanik tavsiflarining (7.5-rasm) o'zgarish shakliga bog'liq bo'ladi.

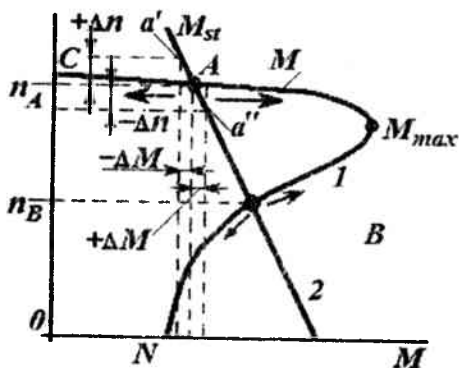
Aylanish chastotasi ortishida yuk momenti  $M_{st}$  ning kamayishi ko'rsatilgan (7.6-rasmda, 2 egri chiziq) mexanik tavsifli ishchi mexanizmini harakatga keltiradigan, mexanik tavsifi 1 egri chiziq bilan ifodalangan asinxron motorning ishini ko'rib chiqamiz.



Yuqorida ta'kidlaganimizdek,  $M=M_{st}$  bo'lganda, ya'ni 1 va 2 mexanik tavsiflar kesishgan  $A$  va  $V$  nuqtalarda aylanish chastotalari, mos ravishda,  $n_A$  va  $n_V$  bo'lganda motor turg'un ishlashi mumkin, deb faraz qilamiz.



7.5-rasm. Yuklamalar mexanik tavsiflari



7.6-rasm. Elektr yuritma statik turg'unligining tahlili

$A$  nuqtada, biror sababga ko'ra qarshilik momenti ( $-\Delta M$ ) miqdorga kamaysa ( $M_{st} - \Delta M$ ), 7.6-rasmda  $a'$  nuqta], tezlik  $\Delta n$  miqdorga ortadi. Ifoda (7.18)ga ko'ra manfiy dinamik moment hosil bo'ladi, 1 va 2 mexanik tavsiflar  $A$  nuqtaga qaytadi. Shunga o'xshash, qarshilik momenti  $M_{st}$  ( $+\Delta M$ ) miqdorga ortsa, 2 egri chiziqda  $a''$

nuqtada tezlik  $(-Δn)$  miqdorga kamayadi, (7.18)ga ko‘ra musbat dinamik moment hosil bo‘ladi va mexanik tavsiflar  $A$  nuqtaga qaytadi. Bu ko‘rilgan ikkila  $±ΔM$  o‘zgarishlar 1 va 2 tavsiflar  $A$  nuqtada statik turg‘un rejimda ekanligini bildiradi.

Aksincha,  $V$  nuqta motorning statik noturg‘un rejimi hisoblanadi. Buning shunday ekanligini tahlil qilishni o‘quvchiga mustaqil bajarish uchun tavsiya etamiz.

Kelgusida “Elektr yuritmalari” fani o‘rganilganda  $A$  va  $V$  nuqtalar (7.6-rasm) statik turg‘unligining asosiy sababi, 1 va 2 mexanik tavsiflarning ularning nishablik darajasida ekanligiga iqror bo‘lamiz.

Asinxron motorning statik turg‘un ishlash shartlari quyidagilardan iborat:

1. Agar rotorning aylanish chastotasi  $n$  ning oshishida statik moment  $M_{st}$ , momentning aylantiruvchi momenti  $M$  ga nisbatan sekin kamaysa, motorning ishi turg‘un bo‘ladi. Bu shart quyidagi tengsizlik ko‘rinishida ifodalanadi:

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_{st}}{dn} \quad (7.20)$$

Bu shart  $M_{st}=f(n)$  tavsifsi kamayuvchi bo‘lgan barcha mexanizmlar uchun bajariladi, demak, sirpanish  $0 < s < s_{kr}$  oraligida o‘zgarganda asinxron motor turg‘un ishlaydi. Lekin, shuni ta’kidlash lozimki, rotor chulg‘amidagi isroflar sirpanishga proporsional bo‘ladi, shu tufayli asinxron motorning iqtisod nuqtai nazaridan normal ishi sirpanishning kam qiymatlarida bo‘lishligidir.

2. Amaliy jihatdan (7.20) shart zaruriy hisoblanib, ammo yetarli emas. Asinxron motorni ekspluatatsiya qilish jarayonida qisqa muddatli yuk momentining o‘zgarishi faqat kichik bo‘lmasdan, uning ish rejimida keskin o‘zgaradigan katta qiymatli yuk momenti ham sodir bo‘lib turadi. Bunday holda motorning sirpanishi  $s_{kr}$  dan kam bo‘lib, lekin unga yaqin sirpanishda ishlayotganda tasodifan katta yuk qo‘yilsa, unda  $M_{st} > M_{em}$  bo‘lib uning to‘xtashiga olib keladi. Shuning uchun asinxron momentning maksimal momentini ayrim hollarda barbod qiluvchi (to‘ntaruvchi) moment deyiladi.

Katta ortiqcha yuklanishlarda motor ishining turg‘unligini nominal momentni  $M_N < M_{max}$  qilib tanlash bilan ta’minlanadi.

Maksimal momentning karraligi yoki o'ta yuklanish bilan ishlash qobiliyati  $k_M = M_{\max} / M_N$

Davlat standarti tomonidan belgilanadi. Umumiy maqsadli asinxron motorlar uchun  $k_M = 1,7 \div 2,5$  oraliqda bo'ladi.

3. Asinxron motorlarning turg'un ishiashini ta'minlash uchun elektr ta'minotining sifati katta ahamiyatga egadir. Asinxron motorning aylantiruvchi momenti unga berilayotgan kuchlanishning kvadratiga bog'liq bo'ladi. Shuning uchun, hatto kuchlanishning ozgina kamayishi ham maksimal momentga ta'sir qiladi, kuchlanish nisbatan ko'proq kamayganda (masalan,  $U_1 = 0,7 \cdot U_N$  bo'lganda) esa motorning nominal yuk bilan ishlashi mumkin bo'lmay qoladi, chunki bu holda aylantiruvchi moment  $M \propto U_1^2 = 0,49$ , ya'ni elektromagnit moment taxminan 2 marta kamayadi va motor nominal yukda ishlashi mumkin bo'lmay qoladi.

## 8-bob. ASINXRON MOTOR AYLANA DIAGRAMMASI VA ISHCHI TAVSIFLARI

### 8.1. Asinxron mashina aylana diagrammasini qurish usullari. YU.i. va q.t. tajribalari

Asinxron mashina toklarining aylana diagrammasi sirpanishning har qanday qiymatida mashinaning ish rejimini xarakterlaydigan barcha elektromagnit kattaliklarni bilvosita aniqlashga imkon beradi.

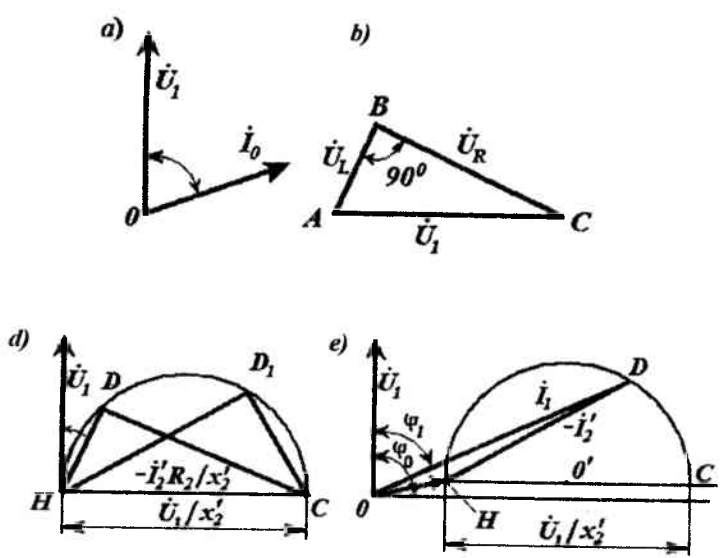
Quyida parametrlari (aktiv va induktiv qarshiliklar) o'zgarmas deb va o'zgaruvchan kattaliklar (kuchlanish, tok, MYK va boshqalar)ning o'zgarishi sinusoidal shaklda deb taxmin qilingan asinxron motorning soddalashgan aylana diagrammani qurish tartibi bilan tanishamiz.

Mazkur diagramma asinxron motorning soddalashgan G-simon almashtirish sxemasi asosida quriladi. Bu sxemaning magnitlovchi shaxobchasi parametrlari o'zgarmasdir. Ishchi shaxobcha ( $r_2 + jx_2$ ) tarkibida esa o'zgaruvchan parametr ( $r_2/s$ ) majud. Bu shaxobcha uchun diagrammani kuchlanishlarning to'g'ri burchakli uchburchagi  $AVS$  ko'rinishida tasvirlab berish oson. Bu uchburchakning katetlari  $AB = \dot{U}_2 = \dot{I}_2 x_2$  va  $BC = \dot{U}_r = \dot{I}_2 r_2$  - kuchlanish  $U_1$  ning, mos ravishda, reaktiv va aktiv tashkil etuvchilari;  $AC = \dot{U}_1 = \dot{U}_r + j\dot{U}_L$  - motorga berilgan kuchlanish (8.1, b-rasm).  $AVS$  uchburchak har bitta tomonini  $x_2$  ga bo'lib NDS uchburchagini hosil qilamiz. Bunda  $\overline{HD}$  katet  $-\dot{I}_2$  tok vektorini tasvirlaydi. Bu vektorga ordinatalar o'qining musbat yo'nalishida  $\varphi_2 = \arctg(x_2/r_2)$  burchak ostida  $\dot{U}_1$  kuchlanish vektorini qo'yamiz.

Agar aktiv qarshilik  $r_2$  o'zgartirilsa, unda zanjirdagi tok ham o'zgaradi, uchburchakning katetlari yangi holatni ( $HD_1$  va  $D_1C$ ) egallaydi, lekin uchburchakning  $AC = U_1/x_2$  gipotenuzasi o'zgarмай qoladi.

Shunday qilib, elektr zanjiri (ishchi shaxobcha)ning yangi ish rejimi diagrammada  $D_1$  nuqtaning holati bilan aniqlanadi. Agar aktiv

qarshilik  $r_2$  ni keng diapazonda ( $0$  dan  $\infty$  gacha) o'zgartirilsa, unda  $-I_2$  tok vektori diagrammada har xil holatni egallaydi va  $U_1/x_2$  diametrli aylanani tasvirlaydi.



8.1-rasm. Asinxron motorning aylana diagrammasi

Agar aktiv qarshilik  $r_2 = 0$  (sof induktiv yuklama) bo'lsa  $D$  nuqta  $S$  nuqtaning ustiga tushadi. Aktiv qarshilik  $r_2 = \infty$  bo'lganda tok  $I_2 = 0$  va, shu sababli  $D$  nuqta  $S$  nuqtaning ustiga tushadi. Agar aktiv qarshilik  $0 < r_2 < \infty$  oraliqda bo'lsa,  $-I_2$  tok vektorining uchi  $NDC$  aylana har xil holatni egallaydi.

Agar 8.1, a, b-rasmlarda ko'rsatilgan diagrammalar birga qo'shilsa G-simon almashtirish sxemasining aylana diagrammasi hosil bo'ladi (d-rasm).  $I_0$  va  $-I_2$  tok vektorlarini qo'shib stator toki  $I_1$  vektorini hosil qilamiz. Bu vektor kuchlanish vektori  $U_1$  ga nisbatan faza bo'yicha  $\varphi_1$  burchakka siljigan. Aylana diagramma toklari aylanasining diametri  $\overline{HC} = (U_1/x_{qt}) / m_i$  ga teng bo'ladi. Bunda  $m_i$  - tok masshtabi, A/ mm.

Aylana diagrammasini qurish uchun ma'lumotlarni olishning uch usuli mavjud: a) loyihalash jarayonida aniqlanadi ma'lumotlar

yordamida; b) motorni bevosita tajriba yo'li bilan yuksiz ishlash rejimidan nominal miqdorgacha yuklantirib, zarur bo'lgan qiymatlarni o'lchab olish; v) yuksiz ishlash va qisqa tutashuv tajribalari natijalari asosida olish.

Ikkinchi usul 10-15 KВт quvvatli asinxron motorlar uchun qo'llaniladi. Motor quvvati ortgan sari, tajriba o'tkazish imkoniyati kamayib boradi – yuklanishni tashkil etish, tarmoqni foydasiz yuklantirish bilan quvvat isroflarini hosil qilib. Ushbu usulning cheklanishiga yuklanish tajribasi jihozlarining doimo mavjud emasligi, hamda katta quvvatli motorlarni o'ta yuklantirish mumkin emasligi ham o'z ta'sirini o'tkazadi.

Usullar orasida keng tarqalgani uchinchi – bilvosita usuli bo'lib, uni qo'llash motorning quvvati bilan cheklanmaydi. Bu usul yuksiz ishlash (YU.i.) va qisqa tutashuv (q.t.) tajribalarini bajarish bilan bo'g'liq.

Asinxron motorning YU.i.va q.t. tajribalari, asosan, transformatorlardagiga o'xshash (1.11 ga qarang). Ammo, motorlarning aylanuvchi qismi-rotorlari mavjudligi sababli, ularning biroz o'ziga hos xususiyatlari mavjud. Undan tashqari, YU.i. rejimidan q.t. rejimiga o'tishda, stator va rotorning tishsimon ekanligi sababli, motor chulg'amlari parametrlari (aktiv va induktiv qarshiliklar) o'zgarmas bo'lib qolmaydi. Bular hammasi tajribalar o'tkazishda va so'ngra ularni tahlil qilishda ba'zi qiyinchiliklar tug'diradi.

**Asinxron motorning YU.i.tajribasi.** Asinxron motorning YU.i. tajribasini o'tkazish uchun manba bilan motor orasiga induksion kuchlanish rostlagichi ulanadi va uning yordamida kuchlanish katta diapazonda ravon o'zgartiriladi (8.2-rasm). Bunda motorning vali yuklanish mexanizmidan uzilgan bo'lishi zarur.

Tajriba o'tkazish  $U_1 = 1,15 U_{1nom}$  kuchlanishdan boshlanib, asta sekin  $0,4U_{1nom}$  gacha kamaytiriladi va shu oraliqda 5-7 nuqta uchun o'lchov asboblari ko'rsatkichlari yozib olinadi. O'lchov yozuvlaridan biri nominal kuchlanish  $U_{1nom}$  uchun bo'lishi lozim.

Kuchlanish va toklarning limiya qiymatlari o'lchanadi va o'rtacha qiymatlari quyidagi ifodalar yordamida hisoblanadi:

$$U_{O'ra} = (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA})/3; \quad (8.1)$$

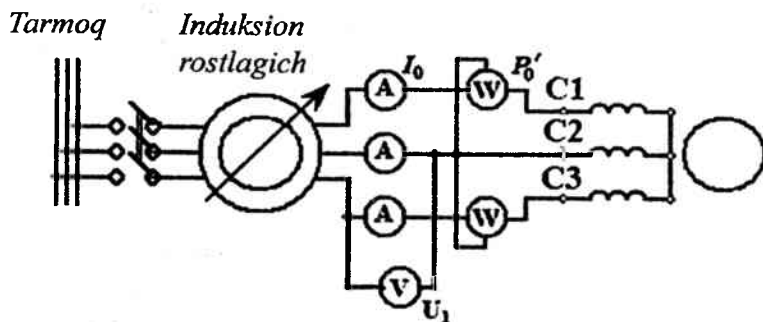
$$I_{0,0'ria} = (I_{OA} + I_{OB} + I_{OC})/3, \quad (8.2)$$

shundan so'ng, stator chulg'amlari ulamish sxemalariga qarab, YU.i.kuchlani va toklarning faza miqdorlari hisoblanadi yulduz ulanganda

$$U_1 = U_{0'ria} / \sqrt{3}; I_0 = I_{0'ria}; \quad (8.3)$$

yoki uchburchak ulanganda

$$U_1 = U_{0'ria}; I_0 = I_{00'ria} / \sqrt{3}. \quad (8.4)$$



8.2-rasm. Uch fazali asinxron motori YU.i.va q.t. tajribalari sxemasi

Vattmetrlar motor YU.i.rejimida iste'mol qilayotgan  $P_0$  aktiv quvvatni o'lchaydi. Bunda  $P_0$  tarkibida chulg'amlardagi elektr quvvat isroflari  $m_1 I_0^2 r_1$ , stator magnit o'zagida magnit isroflari va aylanuvchi qismida mexanik isroflar  $P_{0Mex}$ , (Vt) mavjud.

$$P_0 = m_1 I_0^2 r_1 + P_{Mag} + P_{Mex}. \quad (8.5)$$

bunda  $r_1$  – bevosita tajriba bajarilgandan so'ng (chulg'am sovub qolmasligi uchun) o'lchangan stator faza chulg'aming aktiv

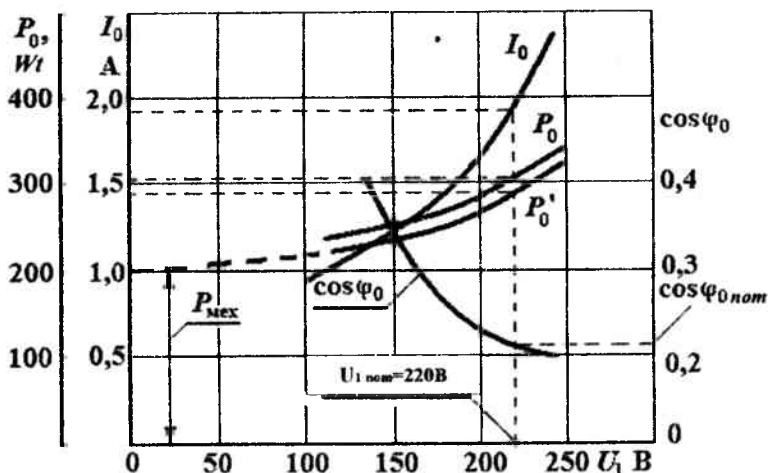
qarshiligi (Om). Motorning magnit va mexanik quvvat isroflari yig'indisi (Vt)

$$P'_0 = p_{Mag} + p_{Mex} = P_0 - m_1 I_0^2 r_1. \quad (8.6)$$

YU.i. rejimi uchun quvvat koeffitsiyenti

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (m_1 U_1 I_0). \quad (8.7)$$

Tajriba va hisoblashlarning natijalari bo'yicha YU.i.tavsiflari  $I_0, P_0, P'_0$  va  $\cos \varphi_0 = f(U)$  quriladi (8.3-rasm) va ularda nominal  $U_{1nom}$  kuchlanishga mos kelgan  $I_{0nom}, P_{0nom}, P'_{0nom}$  va  $\cos \varphi_{0nom}$  qiymatlar belgilanadi.



8.3-rasm. Uch fazali asinxron motorning YU.i.tavsiflari

Agar grafik  $P'_0 = f(U_1)$ ni ordinata o'qi bilan kesishgunga qadar ( $U_1=0$ ) davom ettirsak, mexanik quvvat isroqlari  $p_{Mex}$  qiymatini aniqlaymiz.

Mexanik va magnit isroflarni ajratish shunga asoslanganki, tarmoq chastotasi  $f_1$  ning o'zgarmas qiymatlarida YU.i.rejimida



ishlayotgan motor rotorining aylanish chastotasi  $n$ , hamda mexanik quvvat isroflari  $P_{mex}$  o'zgarmas bo'ladi, deb faraz qilinadi. Shu vaqtning o'zida magnit oqim  $F$  kuchlanish  $U_1$  ga, hamda e.yu.k.  $E_1$  to'g'ri proporsionaldir. YU.i. rejimi uchun  $U_1 \approx E_1$ , shu sababli  $U_1=0$  bo'lganda magnit oqim ham  $\Phi=0$  va demak, magnit isroflar ham  $P_{mag}=0$ .

Mexanik isroflar  $P_{mex}$  qiymatini aniqlab, magnit quvvat isroflarini hisoblab olish mumkin.

$$P_{mag} = P'_0 - P_{mex}. \quad (8.8)$$

Faza rotorli asinxron motorlarining YU.i.tajribalari o'tkazishda stator va rotor chulg'amlari orasidagi kuchlanishlar transformatsiyalash koeffitsiyenti hisoblanadi. Bu koeffitsiyent yordamida yetarli darajadagi aniqlik bilan rotor chulg'amlari faza kuchlanishlarining o'rtacha arifmetik qiymatlarini hisoblab topish mumkin.

**Asinxron motorning q.t. tajribasi.** Asinxron motorning q.t. tajribasi uchun sxema YU.i.rejimidagi sxemadan (8.2-rasm) farqi bo'lmaydi. Biroq, o'lchov asboblari tok, kuchlanish, quvvatlarning qiymatlariga mos bo'lishi zarur. Motorning rotorini shunday qimirlamaydigan holatda mahkamlash zururki, bu holatda faza chulg'amlardagi toklar miqdorlari q.t. tokining o'rtacha qiymatiga teng bo'lsin. Bu maqsadda stator chulg'amiga kichik kuchlanish ( $U_k = 0,1U_{nom}$ ) berilib, ampermetr ko'rsatkichini nazorat qilib turib, rotor asta sekin buriladi. Rotor holatiga va stator bilan rotor tishlari mosligiga ko'ra ampermetr strelkasi tebrana bosblaydi.

Tajriba o'tkazishda q.t. tokining eng katta qiymati, tarmoqning joiz o'ta yuklanishi va chulg'amlar qizib ketmasliklari uchun o'lchovlarni qisqa muddatda o'tkazish imkonlari asosida  $I_k = (1,5 \div 2,0)I_{nom}$  gacha o'rnatish mumkin.

Kuchlanishni o'zgartirish diapazoni aniqlanib, induksion rostlagich yordamida tokining eng katta qiymati o'rnatiladi va o'lchov asboblari ko'rsatkichlari yozib olinadi. Shu tariqa kuchlanishni kamaytirib, 5-7 nuqta uchun tajriba o'tkaziladi. Shu nuqtalardan biri nominal tok  $I_k = I_{nom}$  uchun mos bo'lishi lozim.

Tajriba qisqa muddatda bajarilishi zarur. Shu sababli voltmetr faqat bitta liniya kuchlanishini o'lchasa yetarli bo'ladi, chunki liniya kuchlanishi nosimmetriyasi tajriba natijalariga ta'siri minimal bo'ladi. Liniya toklari hech bo'lmaganda ikkita liniya ampermetrlari (masalan  $I_{\kappa A}$  va  $I_{\kappa B}$ ) yordamida o'lchanadi va tavsiflar uchun o'rtacha arifmetik miqdor hisoblanadi. So'nggi o'lchamlar yozilgandan so'ng, darhol motor tarmoqdan uziladi va chulg'am aktiv qarshiliklari o'lchanadi. Liniya kuchlanishlari va toklari (8.3) va (8.4) ifodalar yordamida avvalgi tajriba o'tkazdagidek,  $U_K$  va  $I_K$  uchun qayti hisoblanadi. Vattmetr yordamida aktiv quvvat  $P_K$  o'lchanib, so'ngra olingan qiymatlar  $U_K$ ,  $I_K$  va  $P_K$  yordamida quyidagi kattaliklar hisoblanadi:

Q.t. quvvat koeffitsiyenti

$$\cos\varphi = P_K / (m_1 U_K I_K); \quad (8.9)$$

q.t. to'la qarshiligi (Om)

$$z_K = U_K / I_K; \quad (8.10)$$

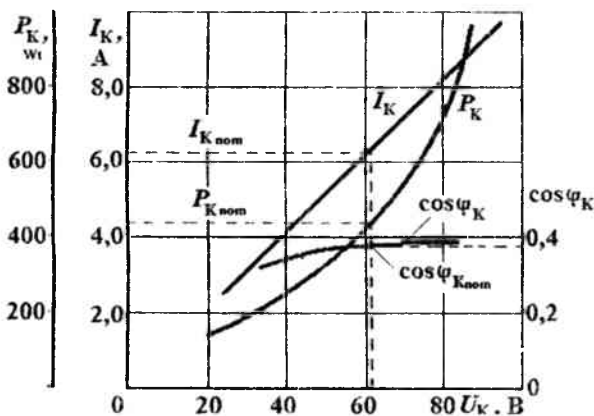
shu qarshilikning aktiv va induktiv tashkil etuvchilari (Om)

$$r_K = z_K \cos\varphi_K; \quad (8.11)$$

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2} = z_K \sin\varphi_K. \quad (8.12)$$

Tajriba va hisoblashlarning natijalari jadvalga kiritilib, so'ngra  $I_K, P_K$  va  $\cos\varphi_K = f(U_K)$  quriladi (8.4-rasm).

Q.t. tajribasi o'tkazilganda chulg'amdagi toklar katta bo'lganligi hamda rotor qo'zg'almas bo'lganda ventilyasiya yo'qligi sababli, chulg'amlar tez qiziydi. Shuning uchun, chulg'am qarshiliklarini, chulg'amlar haroratini ishchi haroratga keltirib olish shart. Chulg'am harorati  $\theta_1$  ni ( $^{\circ}\text{S}$ ) o'lchash uchun faza qarshiligi  $r_1'$  bevosita tajribadan so'ng o'lchanadi va quyidagi ifoda yordamida hisoblanadi



8.4-rasm. Uch fazali asinxron motorning q.t. tavsiflari

$$\theta_1 = [(r'_1 - r_{1,20})(255/r_{1,20})] + 20, \quad (8.13)$$

bunda  $r_{1,20}$  – chulg'am sovuq holatdagi faza chulg'ami qarshiligi (aksariyat harorat  $20^{\circ}\text{C}$  bo'lganda), Om.

Agar chulg'am harorati ushbu motor izolyasiyatsining issiqlik bardosh turi ishchi haroratidan  $\theta_2$  farqli bo'lsa, u holda chulg'am aktiv qarshiligi ishchi haroratga quyidagi ifoda yordamida qayta hisoblanadi.

$$r_k = r'_k [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)], \quad (8.14)$$

bunda  $r'_k$  - ishchi haroratdan farqlanuvchi, harorat  $\theta_1$  bo'lgandagi q.t. qarshiligi;  $\alpha = 0,004$ .

So'ngra ishchi harorat uchun q.t. to'la qarshiligi  $z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}$ , q.t. kuchlanishi  $U_k = I_k \cdot z_k$  va q.t. quvvati  $P_k = m_1 \cdot I_k^2 \cdot r_k$  hisoblanadi.

Q.t. tavsiflarida (8.4-rasm)  $I_k = I_{1NOM}$  uchun mos kelgan  $P_{kNOM}$  va  $U_{kNOM}$  qiymatlari ko'rsatiladi.

## 8.2. Aylana diagrammasini tajriba natijalari bo'yicha qurish

Asinxron motorining aylana diagrammasini qurish uchun quyidagi qiymatlarni aniqlash zarur: tarmoqning faza kuchlanishi  $U_1$ , yuksiz ishlash faza toki  $I_0$ , kuchlanish  $U_1$  va tok  $I_0$  orasidagi siljish burchagi  $\varphi_0$ , qisqa tutashuvdagi faza toki  $I_{K\text{NOM}}$  hamda q.t. qarshiligi  $z'_R = r_1 + jx'_2$ .

Agar aylana diagrammasi motorni hisoblash (loyihalash) jarayonida qurish zarur bo'lsa, kerakli parametrlarni hisoblash natijalari yordamida aniqlanadi. Agar aylana diagramma tayyor motor uchun qurilsa, u holda zarur parametrlarni YU.i.va q.t. tajribalari natijalaridan olinadi.

Aylana diagramma quyidagi tartibda quriladi. Koordinata o'qlari tanlanib, ordinata o'qi bo'ylab kuchlanish  $\dot{U}_1$  vektori yotqiziladi (8.5-rasm). Tokning masshtabi  $m_i$  (A/mm) tanlanadi va kuchlanish  $\dot{U}_1$  ga  $\varphi_0$  burchak ostida  $\dot{I}_0$  ( $ON$  kesmasi) toki yotqiziladi. Sirpanish  $s=0$  bo'lgan va yuksiz ishlash nuqtasi deb nomlangan  $N$  nuqtadan absissa o'qiga parallel nur o'tkaziladi va unda toklar aylanasining diametriga teng bo'lgan  $NS$  kesma (mm) o'rnatiladi.

$$D_i = (U_1 / x_k) / m_i, \quad (8.17)$$

Aylana diagrammasining kelgusida ishlatishda yuqori aniqlikka erishish uchun tok masshtabi  $m_i$  ni shunday qabul qilish kerakki, unda aylana diametri 200 mm dan kam bo'lmasin.

$NS$  kesmani ikki teng bo'laklarga bo'lib,  $Q$  nuqtani aniqlaymiz va uni aylana markazi deb, undan  $D_i/2$  radiusli yarim aylana chizamiz. So'ngra  $O$  nuqtadan tok masshtabida q.t. toki  $I_{K\text{NOM}}$  ga ekvivalent bo'lgan radiusda yoy o'tkazamiz. Bu yoyning toklar yarim aylanasi bilan kesishgan nuqtasida q.t. nuqtasi ( $s=1$ ) deb nomlangan  $K$  nuqtani belgilaymiz.  $N$  va  $K$  nuqtalarni birlashtirib, qisqa tutashuv toki vektori ( $\dot{I}_{K\text{NOM}} = \dot{I}_{II}$ )ni aniqlaymiz. Diagrammadagi  $K$  nuqtasi sinpanishning  $s=1$  qiymatiga, ya'ni stator chulg'amiga nominal kuchlanish ulanib, rotorning to'xtab turgan ondagi holatiga mos keladi.

$O_1S$  kesmaning o'rtasida  $G'$  nuqtani belgilaymiz va shu nuqtadan diametrga perpendikulyar o'tkazamiz. Bu perpendikulyarda quyidagi kesmani o'lchaymiz.

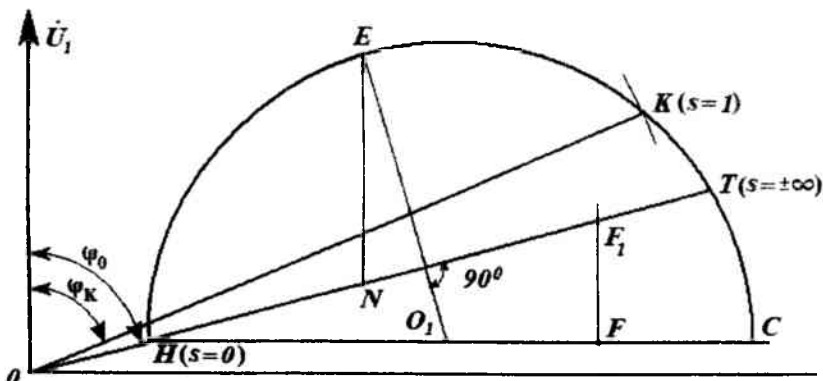
$$FF_1 = HF(r_1/x_K). \quad (8.18)$$

$N$  nuqtadan  $G'$  nuqta orqali to'g'ri chiziq o'tkazamiz va aylana bilan  $T$  nuqtada kesishgunga qadar davom ettiramiz. Nuqta  $T$  sirpanishning  $s = \pm\infty$  (rotor soat mili bo'ylab, yoki teskari yo'nalishda cheksiz katta chastotada aylanadi) qiymatiga mos keladi.

Shunday qilib, aylana diagrammasida uchta xos nuqtalar aniqlandi:  $N(s=0)$ ,  $K(s=1)$  va  $T(s=\pm\infty)$ . Ushbu nuqtalar orasida asinxron mashinasining uchta ishlash rejimlari joylashgan uch zonasi mavjud. Toklar aylana diagrammasini soat mili yo'nalishida o'tilganda bu rejimlarga quytdagilar mos keladi:

- a)  $NE$  yoyi - motor rejimi ( $s = 0 \div 1$ );
- b)  $KT$  yoyi - tormoz rejimi ( $s = 1 \div \infty$ );
- d)  $TSN$  yoyi (8.5-rasmning pastki qismida ko'rsatilmagan yarim aylananani ham e'tiborga olib) - generator rejimi ( $s = -\infty \div 0$ ).

$N$  va  $K$  nuqtalarni birlashtirib,  $NK$  foydali quvvat chizig'ini hosil qilamiz,  $N$  va  $T$  nuqtalarni birlashtirib,  $NT$  elektromagnit quvvat chizig'ini hosil qilamiz.



8.5-rasm. Asinxron motorning aylana diagrammasi

Aylana diagrammasidagi  $E$  nuqta maksimal moment, ya'ni kritik sirpanish  $s_{KP}$  ga mos keladi. Ushbu nuqtani aniqlash quyidagicha amalga oshiriladi:  $O_1$  nuqtadan elektromagnit quvvat chizig'i  $NT$  ga perpendikulyar o'tkazamiz va aylana bilan  $E$  nuqtada kesishgunga qadar davom ettiramiz.

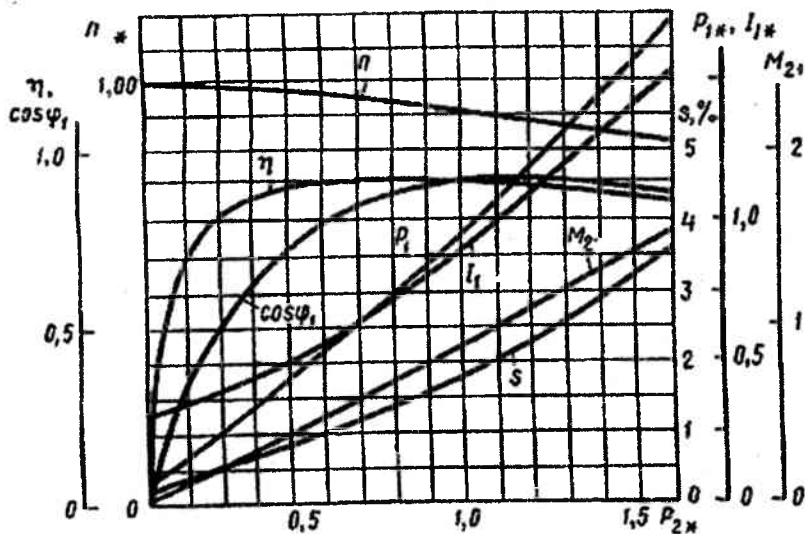
Ko'rilayotgan aylana diagrammasi soddalashtirilgan bo'lib, asinxron motor almashtirish sxemasining aktiv va induktiv qarshiliklari o'zgarmas, deb qabul qilingan farazi natijasida qurilgan. Biroq, bu qarshiliklar asinxron motorning yuklanishi o'zgarishida o'z qiymatlarini o'zgartiradi. Bunga sabab quyidagilardan iborat: yuklanish ortishi stator va rotorning tish qismlaridagi magnit to'yinishning kuchayishiga va, natijada, induktiv qarshiliklar  $x_1$ ,  $x_m$  va  $x_2'$  ning kamayishiga olib keladi. Bundan tashqari, motor yuklanishining ortishi sirpanish ortishiga olib keladi va, demak, rotor chulg'amidagi tokning chastotasi ortishiga sabab bo'ladi. Natijada, "tokni siqib chiqarish effekti" kuchayib, rotor aktiv qarshiligi  $r_2'$  ortadi. Soddalashtirilgan aylana diagrammasini qo'llash tajribasi shuni ko'rsatadiki, soddalashtirilgan aylana diagrammasini qo'llashdan hosil bo'lgan xatolik  $s > s_{KP}$  bo'lganda sezilarli bo'lib,  $s = 0.4 - 0.5$  bo'lganda esa bu xatolik katta bo'ladi.

### 8.3. Asinxron motor ishchi tavsiflari. Ularni aylana diagrammasi yordamida qurish.

**Ishchi tavsiflari** deb,  $U_1 = const$  va  $f_1 = const$  bo'lganda, valdagi yuk (foydali quvvat)  $P_2$  ni o'zgartirib, rotorning aylanish chastotasi  $n$ , sirpanish  $s$ , stator toki  $I_1$ , foydali moment  $M_2$ , quvvat koeffitsiyenti  $\cos\varphi$  va F.I.K.  $\eta$  larning  $n, s, I_1, M_2, \cos\varphi, \eta = f(P_2)$  bog'lanishga aytiladi (8.6-rasm).

Motor valdagi yuk ortishi bilan sirpanish  $s$  o'sib boradi. Nominal yuklama bo'lganda sirpanish  $s_N = 1,5 \div 5\%$  ni tashkil qiladi. Rotorning aylanish chastotasi (6.1,a) dan quyidagiga teng bo'ladi

$$n = n_1 \cdot (1 - s) = 60 f_1 \cdot (1 - s) / p. \quad (8.19)$$



8.6-rasm. Nominal qiymati 50 KВт, 220/380 V, 1470 ayl/min bo‘lgan qisqa tutashgan rotorli asinxron motorning ishchi tavsiflari

Ifoda (7.12)ga ko‘ra yuklama (moment  $M$ ) ortishi bilan sirpanish  $s$  ortadi, natijada (8.3)ga ko‘ra rotorning aylanish chastotasi  $n$  kamayadi.

Asinxron motorning nominal yuk bilan ishlagandagi foydali momenti

$$M_{2N} = 9,55 \cdot P_{2N} / n_N, \text{ [ N}\cdot\text{m ]}. \quad (8.20)$$

Agar  $n = \text{const}$  bo‘lsa,  $M_2 = f(P_2)$  ifodaning grafigi taxminan to‘g‘ri chiziq bo‘lardi. Lekin yuklama ortishi bilan  $n$  kamayadi, shu sababli yuklamaning ortishi bilan moment  $M_2$  foydali quvvat  $P_2$  ga qaraganda tezroq o‘sadi va uning o‘zgarishi yuqoriga og‘gan egri chiziqdan iborat bo‘ladi.

Motorning validagi yuk ortishi bilan stator toki  $I_1$  ning aktiv tashkil etuvchisi ootib boradi. Kuchlanish  $U_1 = \text{const}$  bo‘lganligidan tok  $I_1$  ning reaktiv tashkil etuvchisi  $I_{1r}$  esa o‘zgarmaydi. Shu sababli

yuklama o'zgarganda motor magnit oqimi sezilarli o'zgarmaydi va  $I_1 = f(P_2)$  bog'lanish deyarli bir xilda qoladi.

Motor kichik yuk bilan ishlaganda stator toki tarkibidagi reaktiv tashkil etuvchisi, aktiv tashkil etuvchisiga nisbatan katta bo'ladi. Shu sababli motorning quvvat koeffitsiyenti kichik ( $0,1 \div 0,2$ ) bo'ladi. Yuklamaning ortishi bilan tokning aktiv tashkil etuvchisi orta boradi. Bunda kuchlanish  $U_1$  va stator toki  $I_1$  vektorlari orasidagi burchak kichiklashib,  $\cos\varphi$  esa o'sib boradi. Motorning validagi yuk nominal qiymatga yaqinlashganda  $\cos\varphi_1$  katta qiymatga erishadi ( $\cos\varphi_1 = 0,8 \div 0,85$ ). Yuklamaning yanada ortishi natijasida rotorning aylanish chastotasi  $n$  kamayadi, sirpanish  $s$  va rotorning induktiv qarshiligi  $x_2$  lar ortishi tufayli  $\cos\varphi_1$  bir oz kamayadi.

F.I.K.ning  $P_2$ ga bog'liq o'zgarishi, boshqa elektr mashinalari yoki transformatordagidek xarakterga ega. Yuksiz ishlash rejimida F.I.K. nolga teng ( $\eta = 0$ ). Yuklamaning ortishi bilan  $\eta$  oshib boradi va o'zgaras isroflar (yuklamaga bog'liq bo'lmagan mexanik va yuksiz ishlash isroflari) o'zgaruvchan isroflarga (yuklamaga bog'liq ravishda o'zgaradigan chulg'amlardagi elektr va qo'shimcha isroflar) teng bo'lganda o'zining maksimal qiymatiga erishadi va yuklamaning ortishda davom etishi natijasida o'zgaruvchan isroflarning parabolik ortishi sababli  $\eta$  bir oz kamayadi.

**Ishchi tavsifni aylana diagrammasi yordamida qurish.** Asinxron motorning nominal rejimda ishlashini ta'minlaydigan parametrlarini, hamda ishchi tavsiflarni aylana diagramma yordamida qurish tartibini ko'raylik. Motorning ishchi rejimini ifodalovchi aylana diagramma zonasi 8.5-rasmda juda kichik joy egallagan. Unda grafik ishlarini bajarish va o'lchovlar o'tkazish ishlarining noqulayliklari sababli, 8.7-rasmda keltirilgan aylana diagrammaning shu qismi biroz kattaroq qilib ko'rsatilgan.

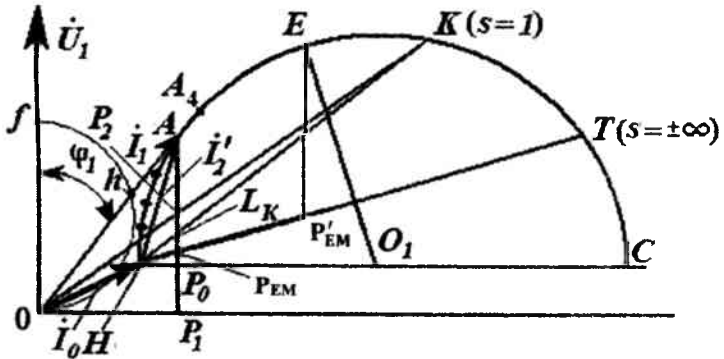
Ishchi tavsiflarni aylana diagramma yordamida qurish uchun unga qo'shimcha (yordamchi) chiziqlar kiritamiz.

Stator chulg'ami toki  $I_1$  ni tokning masshtabi  $m_i$  da

$$\overline{OA} = I_1 / m_i, \text{ (mm)} \quad (8.21)$$



So'ngra,  $A$  nuqtani  $N$  bilan birlashtirib, toklar uchburchagi  $OAN$  ni hosil qilamiz. Bunda YU.i.toki  $\dot{I}_0 = m_1 OH$ , rotorning keltirilgan toki  $\dot{I}'_2 = m_1 HA$  va stator toki  $\dot{I}_1 = m_1 OA$ .



8.7-rasm. Ishchi tavsiflarni aylana diagrammalarni yordamida qurish

$A$  nuqtadan absissa o'qiga perpendikulyar ( $AP_1$ ) o'tkazamiz va to'g'ri burchakli uchburchak hosil qilamiz. Undan stator tokining aktiv va reaktiv tashkil etuvchilarini hisoblaymiz

$$\dot{I}_{1a} = m_1 AP_1; \dot{I}_{1p} = m_1 OP_1. \quad (8.22)$$

Agar  $U_1 = \text{const}$  va  $f_1 = \text{const}$  bo'lsa, u holda  $P_1$  quvvat stator chulg'ami tokining aktiv tashkil etuvchisiga ( $P_1 \equiv I_{1a}$ ) proporsional bo'ladi. Aylana diagrammada  $I_{1a}$  ning qiymati  $AP_1$  kesma bilan aniqlanadi, shuning uchun motorga keltirilgan  $P_1$  quvvat quyidagicha aniqlanadi ( $Wt$ ):

$$P_1 = m_p AP_1, \quad (8.22)$$

bunda  $m_p = m_1 U_1 m_1$  - quvvat masshtabi,  $Vt/mm$ .

Motorga tarmoqdan kelayotgan quvvatni keltirilga quvvat chizig'i deb nomlangan absissa o'qidan toklar aylanasila joylashgan ishchi nuqtasi  $A$  gacha bo'lgan masofa bilan aniqlanadi.

Motorning foydali quvvati  $P_2$  aylana diagrammasida  $A$  nuqtadan tushirilgan vertikalidagi  $AP_2$  kesma bilan aniqlanadi.

$$P_2 = m_p AP_2, \quad (8.23)$$

Elektromagnit quvvat va elektromagnit moment aylana diagrammasida  $A$  nuqtadan  $P_{EM}$  nuqttagacha bo'lgan kesma bilan aniqlanadi.

$$P_{EM} = m_p AP_{EM}, \quad (8.24)$$

$$M_{EM} = m_M AP_{EM}, \quad (8.25)$$

bunda  $m_M = 9,55 m_p/n_1$  –moment masshtabi, N·m/mm.

Quvvat koeffitsiyenti  $\cos\varphi_1$  ni aniqlash uchun ordinata o'qida ihtiyoriy  $Of$  diametrda yarim aylana quriladi. Stator toki  $I_1$  vektori yangi yarim aylana bilan kesishgan nuqtani  $h$  deb belgilaymiz. Quvvat koeffitsiyenti

$$\cos\varphi_1 = Oh / Of \quad (8.26)$$

Foydali ish koeffitsiyenti foydali quvvat  $P_2$  ni keltirilgan quvvat  $P_1$  ga nisbati kabi olinadi.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{AP_2}{AP_1}. \quad (8.27)$$

Bu usulda hisoblangan F.I.K.katta xatolikka olib keladi, chunki unda barcha turdagi quvvat isroflari e'tiborga olingan deb bo'lmaydi. Shu sababli F.I.K.ni (7.3) - (7.5) yordamida YU.i.va q.t. tajribalaridan foydalanib hisoblagan maqbul. Magnit va mexanik quvvat isroflarining yig'indisi quyidagicha aniqlanadi.

$$P_{\text{mog}} + P_{\text{max}} = P_{01} - m_1' I_0^2 r_1; \quad (8.28)$$

Stator chulg'amidagi elektr isroflar (7.1), rotor chulg'ami elektr isroflari esa (7.2) yordamida; qo'shimcha isroflar  $P_{\text{qo'sh}}$  Davlat standartiga ko'ra motor nominal yuklanish bilan ishlaganda motorga keltirilayotgan quvvatning 0,5% tashkil etadi. Qo'shimcha quvvat isroflari stator toki  $I_1$  ning kvadratiga proporsional deb hisoblash qabul qilingan. Unda, qo'shimcha isroflar quydagicha:

$$P'_{\text{qush}} = P_{\text{qush}} (I_1 / I_{\text{NOM}})^2. \quad (8.29)$$

Motorning o'ta yuklanish qobiliyati maksimal moment  $M_{\text{max}}$  ning nominal moment  $M_{\text{NOM}}$  ga nisbatiga aytiladi. Maksimal momentni aniqlash yuqorida (8.5-rasm) ko'rsatilgan.

$$M_{\text{max}} = m_M EP'_{EM}. \quad (8.30)$$

Agar toklar aylanasidagi  $A$  nuqta (8.7-rasm) nominal rejimga mos bo'lsa, u holda motorning o'ta yuklanish qobiliyati quyidagiga teng bo'ladi.

$$M_{\text{max}} = EP'_{EM} / AP_{EM}. \quad (8.31)$$

Sirpanish quyidagicha aniqlanadi:

$$s = P_{E12} / P_{EM}, \quad (8.32)$$

bunda  $P_{EM}$  (8.24) dan hisoblanadi.

Ishchi tavsiflarini qurish uchun aylana diagrammasida stator tokining birnecha qiymatlarini  $0,5 \cdot I_{\text{NOM}}$ ;  $0,75 \cdot I_{\text{NOM}}$ ;  $I_{\text{NOM}}$ ;  $1,15 \cdot I_{\text{NOM}}$  tok masshtabiga ko'paytirib, aylana diagrammasiga qo'yiladi (8.7-rasm) va yuqorida keltirilganidek, har bir ( $A_1$ ;  $A_2$ ;  $A_3$ ;  $A_4$ ;  $A_5$ ) nuqta uchun qiymatlar aniqlanadi, jadvalga kiritiladi va tavsiflar chiziladi (8.6-rasm).

## 9-bob. ASINXRON MOTORNI ISHGA TUSHIRISH VA AYLANISH TEZLIGINI ROSTLASH

### 9.1. Faza rotorli asinxron motorni ishga tushirish

Asinxron motorni ishga tushirish jarayoni, bu stator chulg'amini tarmoqqa ulagandan so'ng, rotor va mahkamlangan ijro mexanizmi aylanuvchi qismlarining to'xtab turgan bir turg'un holatidan, ikkinchi turg'un holatiga – motorning aylantiruvchi momenti bilan unga aks ta'sir etuvchi qarshilik momentlari muvozanatlangandagi ravon aylanuvchi holatiga etishdagi o'tkimchi jarayondan iborat.

Motorning ishga tushirishdagi xususiyatlari, birinchi galda uning ishga tushirish toki  $I_{IT}$  qiymati hamda uning karraligi  $I_{IT}/I_{NOM}$  va ishga tushirish momenti  $M_{IT}$  qiymati hamda uning karraligi  $M_{IT}/M_{NOM}$  qiymatlari bilan belgilanadi. Yaxshi ishga tushirish xususiyatlariga ega bo'lgan motor, nisbatan kichik ishga tushirish toki va yetarli darajadagi katta ishga tushirish momentini hosil qiladi. Biroq, bunday yaxshi xususiyatlarning mujassamligiga erishish mushkul. Chunki kichik ishga tushirish toki  $I_{IT}$  va katta ishga tushirish momenti  $M_{IT}$  istagi - bu bir-biriga zid bo'lgan shartlardir. Agar motorni loyihalashda maxsus qurilmalarsiz  $I_{IT}$  ni kamaytirishga erishilsa, unda  $M_{IT}$  ham kamayadi va, aksincha, motor sxemasiga qo'shimcha element kiritmasdan  $M_{IT}$  ni oshirishga erishilsa, u holda  $I_{IT}$  ham ortadi. Bu fikrlarni quyida  $I_{IT}$  va  $M_{IT}$  uchun keltiriladigan ifodalardan ham anglam olish mumkin.

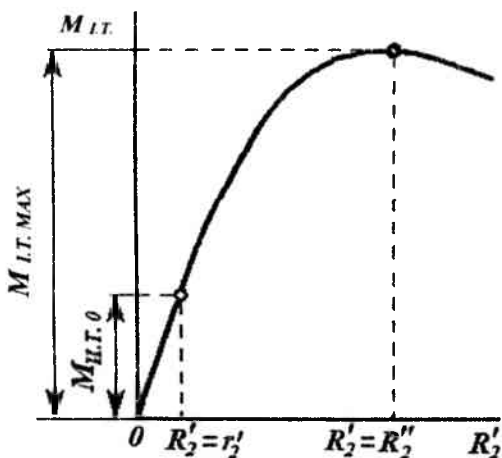
Stator chulg'ami tarmoqqa ulagandan so'ng, ishga tushirishning dastlabki onlarida sirpanish  $s=1$  bo'lganda, YU.i.toki e'tiborga olinmasa, ishga tushirish tokini va momenti (7.14) va (7.19) dan quyidagicha bo'ladi:

$$I_{IT} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}}; \quad (9.1)$$

$$M_{IT} = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (9.2)$$

Ifoda (9.1) va (9.2)dan ko'rinadiki, motorning ishga tushirish xususiyatlarini yaxshilashni rotor zanjiridagi aktiv qarshilikni oshirib erishish mumkin ekan, chunki bu vaziyatda ishga tushirish tokini kamaytirish bilan ishga tushirish momentini oshirish birgalikda amalga oshiriladi. Shu bilan birga, stator kuchlanishi  $U_1$  motorning ishga tushirish parametrlariga har xil ta'sir o'tkazadi:  $U_1$  ni kamaytirish  $I_{IT}$  kamayishiga olib keladi va motor ishga tushirilishiga ijobiy ta'sir ko'rsatadi, biroq,  $U_1$  ning kamayishi ishga tushirish momentini ham kamaytiradi. Ishga tushirish xususiyatlarini yaxshilash usullaridan qay birini tanlash motor ekspluatatsiyasining muayyan sharoitlari va ishga tushirishga qo'yiladigan talablarga bog'liq.

Ishga tushirish toki  $I_{IT}$  va momenti  $M_{IT}$  qiymatlaridan tashqari motorni ishga tushirish ko'rsatkichlariga - ishga tushirishning davomiyligi va ravonligi, ishga tushirish jarayonining murakkabligi, uning samaradorligi (narxi, ishga tushirish apparatlarining ishonchiligi va undagi quvvat isroflari) - ham e'tiborni qaratish zarur.

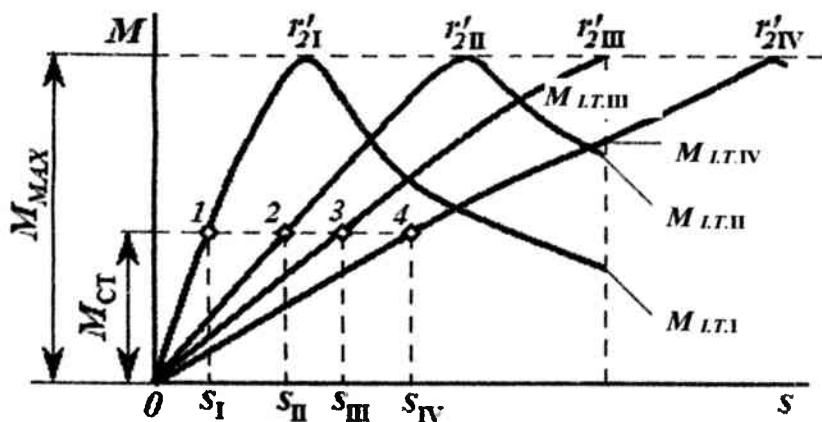


9.1-rasm. Ishga tushirish momentining rotor aktiv qarshiligi-ga bog'liqligi

Faza rotorli asinxron motorlarda kontakt xalqalar mavjud bo'lib, ular rotor valiga bir-biridan va valdan elektr izolyatsiyalangan holda maxkamlanadilar va ularning har biriga rotorning faza chulg'amlarining boshlari ulanadi, chulg'am ketlari esa yulduzcha usulda o'zaro ulanadi. Mashina ishlaganda rotor bilan birga aylanuvchi kontakt halqalar mahkamlangan cho'tkalar yordamida rotor chulg'amini tashqi zanjir bilan bog'laydilar. Motorni ishga tushirishda rotor chulg'amiga kontakt halqalar vositasida ishga tushirish reostati (ITR) ulanadi. Bunda rotor chulg'ami zanjirining aktiv qarshiligi  $R_2 = r_2' + r_{QUSH}'$ , bunda  $r_{QUSH}'$  – ITRning rotor chulg'amiga keltirilgan qo'shimcha elektr qarshiligi. Rotor chulg'amidagi aktiv qarshilikning ta'siri (9.2) ifodadan ko'rish mumkin. Bunday ta'sirni 9.1-rasmdagi grafikdan ko'rish mumkin. Uning tahlilidan shunday xulosaga kelamiz: agar ITRsiz ishga tushirilsa, ya'ni rotor zanjiri aktiv qarshiligi  $R_2' = r_2'$  bo'lsa va ishga tushirish momenti  $M_{IT} = M_{IT0}$  bo'lsa, rotor zanjiriga qo'shimcha  $r_{QUSH}'$  aktiv qarshilik ulansa va  $R_2' = r_2' + r_{QUSH}' = x_1 + x_2'$  bo'lsa, u holda  $M_{IT}$  maksimal qiymati  $M_{ITMAX}$  ga erishadi. Rotor qarshiligi undan  $R_2' > x_1 + x_2'$  ortsa,  $M_{IT}$  kamayadi.

ITRning qarshiligi  $r_{QUSH}'$ ni tanlashda motorni ishga tushirish shartlaridan kelib chiqiladi: agar motor ishga tushirilishida valdagi yuklanish momenti katta bo'lsa,  $r_{QUSH}'$  ni tanlashda eng katta ishga tushirish momenti bo'lishini ta'minlash asosiy talab qilib olinadi (9.2-rasm).

Ifoda (7.10) dan ko'rinadiki, motorning maksimal momenti  $M_{MAX}$  rotorning aktiv qarshiligi  $r_2'$  ga bog'liq emas ekan. Kritik sirpanish  $s_{KP}$  esa, (7.9) ga ko'ra qarshilik  $r_2'$  ga proporsional. Bundan shunday xulosa qilish mumkinki, asinxron motorning rotor aktiv  $r_2'$  qarshiligini asta-sekin oshirilsak, maksimal momentning qiymati o'zgarishsiz qolar ekan, kritik sirpanish esa ortib borar ekan (9.2-rasm). Bunda  $r_2'$  ortishi bilan ishga tushirish momenti  $M_{IT}$  ma'lum miqdorgacha ortib boradi. 9.2-rasmda bu holat  $r_{2III}'$  qarshilikka mos kelmoqda va ishga tushirish momenti maksimal momentga teng bo'layapti. Qarshilik  $r_2'$  ning ortishi davom etaversa ishga tushirish momenti kamayadi.



9.2-rasm. Rotor chulg'ami qarshiligining motor mexanik  $M = f(s)$  tavsifiga ta'siri

9.2-rasmda keltirilgan  $M = f(s)$  grafikning tahlili ko'rsatadiki,  $r'_2$  qarshilikning o'zgarishi bilan birga rotor aylanish chastotasi ham o'zgaradi: o'zgarmas yuklanish momenti bo'lganda ( $M_{CT} = const$ ) sirpanish ortadi, ya'ni rotor aylanish chastotasi kamayadi (1, 2, 3, va 4 nuqtalar).

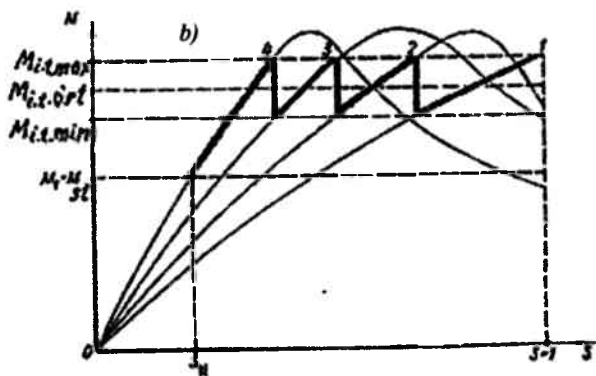
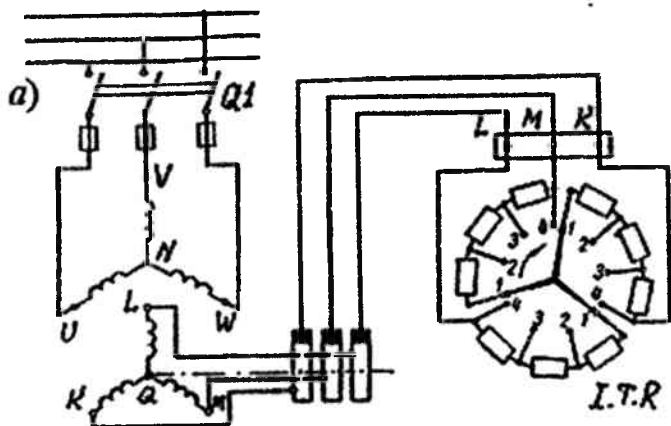
Ishga tushirish reostatini rotor chulg'amiga ulash sxemasi 9.3,a-rasmda keltirilgan. Dastlab motor 1-tavsif (9.3,b-rasm) bo'yicha ishga tushiriladi. Bu holda ITRning qarshiligi  $R_{i,t} = R_1 + R_2 + R_3$  bo'lib, aylantiruvchi moment maksimal momentga teng bo'ladi ( $M = M_{max}$ ).

Motorning aylanish chastotasi oshib borgan sari aylantiruvchi moment  $M$  ham kamaya boradi va  $M_{i,t,min}$  momentdan kichik ( $M < M_{i,t,min}$ ) bo'ladi.

$M = M_{i,t,min}$  bo'lganda ITRning bir qismi ( $R_1$ ) sxemadan chiqariladi. Shu onda aylantiruvchi moment keskin  $M_{i,t,max}$  qiymatgacha yana ortadi, so'ngra aylanish chastotasining ortishi 2-tavsif (qalin chiziq) bo'yicha o'zgaradi. Bu holda ishga tushirish reostatining qarshiligi  $R_{i,t,2} = R_2 + R_3$  bo'ladi.

Aylantiruvchi moment  $M_{i,t,min}$  gacha kamayib boradi, shu vaqtda  $R_2$  qarshilikni uzadilar, bunda motor 2-tavsif bo'yicha ishlaydi. Bunda ishga tushirish reostatining qarshiligi  $R_{i,t,1} = R_3$  bo'ladi. Ishga

tushirishning so'ngida ishga tushirish reostati sxemadan butkul chiqariladi va rotor chulg'amlari qisqa tutashadi. Bu holda motor tabiiy tavsif (4) bo'yicha ishlaydi (9.3,b-rasm). Sirpanish  $s_N$  gacha kamayadi va  $N$  nuqtada muvozanat ( $M_{CT} = M_N$ ) holatiga erishiladi.



9.3-rasm. faza rotorli asinxron motorini ishga tushirish sxemasi (a) va ishga tushirish momentining sirpanishiga bog'liqlik grafigi (b)



## 9.2. Qisqa tutashgan rotorli asinxron motorni ishga tushirish

Uch fazali qisqa tutashgan rotorli asinxron motorlarni ishga tushirishning eng asosiy ekspluatatsion muammasi - ishga tushirish toki miqdorini kamaytirish va ishga tushirish davomiyligini qisqartirishdir. Ishga tushirish momentini oshirish muammasi esa motorni loyihalash jarayonida hal qilinadi va zaruriy konstruksion yechimlar taklif etilib, motorni ishlab chiqarish jarayonida muammo bartaraf etiladi. Shu sababli, ko'pgina q.t. rotorli asinxron motorlar (asosan kichik quvvatli – 50 KWt.gacha) bevosita tarmoqqa ulash tarmoqqa ulab, ishga tushiriladi. Bunda ishga tushirishning boshlang'ich holatlarida tokning miqdori nominal qiymatidan 5-7 marta ortib ketadi (9.3-rasm).

Katta quvvatli tarmoqlarga ulanadigan kichik quvvatli motorlarda ishga tushirish toki miqdorining qisqa muddat ortishi katta muammo tug'dirmaydi. Ammo tarmoq cheklangan quvvatga ega bo'lsa, yoki motor quvvati katta bo'lsa,  $I_{IT}$  tokining kattaligi, ushbu muammoning yechilishini taqozo etadi.

1. Bevosita tarmoqqa ulash usulidan tashqari birnecha usullar mavjudki, ular mohiyatini tushunish uchun (9.1) va (9.2) ifodalardan foydalanish mumkin. Ularaga ko'ra, yana ikki usul qo'llaniladi:

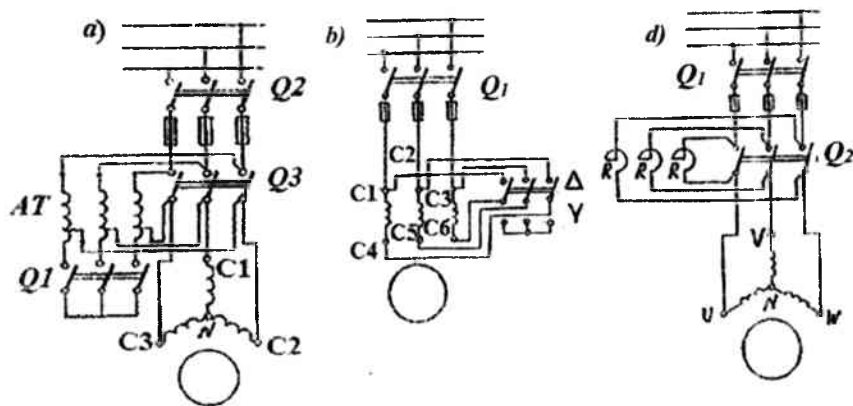
1. Stator chulg'ami kuchlanishi  $U_1$  ni o'zgartirib ishga tushirish.

2. Stator chulg'ami toki chastotasi  $f_1$  ni o'zgartirib ishga tushirish.

**Kuchlanish  $U_1$  ni o'zgartirib ishga tushirish.** Bunda barcha usullar qo'llanilishi mumkin bo'lgan vositaga qarab ajratiladi: kuchlanishni ravon oshirib - avtotransformatorli, induksion rostlagichli, yarim o'tkazgichli to'g'rilagichli ishga tushirish; pog'onali o'zgartirib - reaktorli, stator chulg'ami ulanishini yulduzchadan uchburchakka o'zgartirib ishga tushirish. Har qanday vosita bilan kuchlanish pasaytirilmasin, bu usulning eng asosiy kamchiligi – kuchlanish pasayishi bilan uning kvadratiga proporsional ishga tushirish momentning kamayishidir.

*Asinxron motorni avtotransformator yordamida (9.4,a-rasm)* ishga tushirish uchun dastlab  $Q_1$  ulagich avtotransformatorni yulduzcha sxemasiga ulaydi, so'ngra  $Q_2$  ulagich ulanadi. Bunda

motorning stator chulg'amiga avtotransformatordan pasaytirilgan kuchlanish ( $U_{1pas}$ ) beriladi.



9.4-rasm. Stator kuchlanishini pasaytirib ishga tushirish: avtotransformatordi (*a*); reaktorli (*b*); stator chulg'amini yulduzcha ulanishdan uchburchak ulanishga o'tkazish

Bunda motorning dastlabki  $M_{i,1}$  tushirish momenti

$$M_{i,1} = M_{i,1N} (U_1 / U_{1N})^2 \quad (9.1)$$

ishga tushirish toki esa kamayadi va quyidagi ifoda bo'yicha aniqlanadi

$$I_{i,1} = I_{i,1N} (U_1 / U_{1N})^2 \quad (9.2)$$

Rotorning aylanish chastotasi oshgandan keyin  $Q_1$  ulagich uziladi va avtotransformator reaktorga aylanadi. Bunda statoridagi kuchlanish biroz ortadi, ammo nominal qiymatidan pastroq bo'ladi, motor tezligi ortadi.  $Q_3$  ulagich ulangandan so'ng, motor statoriga tarmoqning nominal kuchlanishi beriladi. Shunday qilib, avtotransformator yordamida ishga tushirish usuli uch bosqichdan iborat bo'lib, birinchi va ikkinchi bosqichlarda motorga pasaytirilgan  $U_1 = (0,5-0,6)U_{1NOM}$ ,

$U_1=(0,7-0,8)U_{1\text{NOM}}$  kuchlanishlar beriladi va nihoyat, uchinchi bosqichda motorga nominal kuchlanish ulanadi.

*Stator chulg'amini yulduzcha usulida ulashdan uchburchak usulda ulashga o'tkazib ishga tushirishda* (9.4,b-rasm) asinxron motor stator chulg'ami fazalariga dastlabki berilayotgan kuchlanish nominal miqdoridan  $\sqrt{3}$  marta kam bo'ladi, xuddi shuningdek, faza toklari ham  $\sqrt{3}$  marta kamayadi. Liniya toklari esa 3 marta kamayadi. Stator chulg'amlarining ulanish sxemasini o'zgartirish 3 fazali kontaktor yoki ulagich yordamida amalga oshiriladi. *Bu usulni qo'llashning asosiy sharti – motorning stator chulg'ami nominal rejimda uchburchak usulda ulangan bo'lishidir.*

*Asinxron motorni reaktor yordamida ishga tushirishda* (9.4,v-rasm) reaktiv qarshiliklarda ishga tushirish tokiga to'g'ri proporsional bo'lgan kuchlanish pasayuvi  $\Delta U$  vujudga kelib, stator chulg'amlariga pasaygan kuchlanish  $U_{\text{tras}}$  beriladi. Bu kuchlanishning qiymati quyidagicha topiladi:

$$\Delta \dot{U}_1 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 x_p, \quad (9.3)$$

bunda  $x_r$  – ishga tushirish reaktiv qarshiligi.

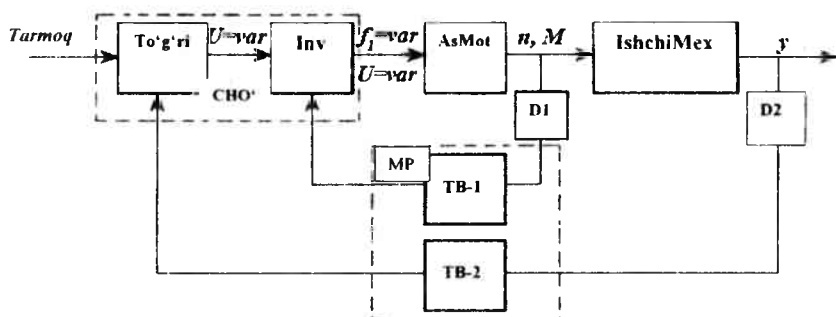
Bu kuchlanish ta'sirida motorning rotori aylana boshlaydi.<sup>1</sup> Motorning aylanish chastotasi oshib borgan sari rotor chulg'amida hosil bo'ladigan EYK  $E_{2s}$  kamayib boradi, natijada ishga tushirish toki ham kamayadi.

Stator chulg'amlari bilan ketma-ket ulangan qarshiliklarda kuchlanish pasayishi  $\Delta U$  kamayadi va motorning aylanish chastotasi oshgan sari unga berilayotgan kuchlanish  $U_1$  o'z-o'zidan ko'payib boradi. So'ngra  $Q_2$  ulagich ulanadi va motorga tarmoq kuchlanishi  $U_1$  beriladi, bunda motor nominal kuchlanish bilan ishlaydi.

**Tarmoq toki chastotasini o'zgartirib ishga tushirish.** Qisqa tutashgan rotorli asinxron motori sanoat korxonalarida boshqa elektr mashinalariga nisbatan eng ko'p o'rnatilgan (85-88%), eng arzon (2 marta), og'irlik kam (1,5-2 marta), gabarit (tashqi o'lchamlari) eng kichik (1,5-2 marta), ekspluatatsiyada eng qulay va tuzilishi bo'yicha eng soddasi hisoblanadi. Ammo, asinxron motorning eng katta

kamchiligi, bu (katta quvvatli motorlarni) ishga tushirish va rotor aylanish chastotasini boshqarishning og'irligidir.

Keyingi yillarda yarim o'tkazgichli o'zgartkichlar texnikasi, mikroelektronika, nanoelektronika va kompyuter texnologiyalari fanlarining tezkor va birgalikda rivojlanishi natijasida sanoatda asinxron motor stator chulg'ami tokining chastotasini o'zgartirib ishga tushirish - keng qo'llanishi bashorat qilinayotgan eng progressiv usul hisoblanadi. Bu usulga ko'ra, stator tokining chastotasi  $f_1$  va stator magnit maydonining aylanish chastotasi  $n_1$  orasidagi bog'lanish



**9.5-rasm.** Asinxron motorni chastotali boshqarish struktura sxemasi bunda: CHO' - chastota o'zgartkichi; To'g'r - to'g'rilagich; Inv - inverter; AsMot - asinxron motor; IshchiMex - ishchi mexanizm; D1 va D2 - motorning va ishchi mexanizmning o'zgaruvchilarini o'lchash asbobi; TB-1 va TB-2 - teskari bog'lanish; MP – mikroprotsessor

$$n_1 = f_1 / p, \quad (9.4)$$

hamda  $n_1$  bilan rotor aylanish tezligi orasidagi

$$n = n_1(1 - s) \quad (9.5)$$

bog'lanish asosida quyidagi takliflar kiritiladi. Stator chulg'amiga uzatilayotgan tokning chastotasini 0 dan  $f_{1\text{NOM}}$  gacha ravon oshirib,

$n_1$  ni va, nihoyat  $n$  ni 0 dan  $n_{NOM}$  gacha o'zgartiriladi. Buni amalga oshirish uchun yarim o'tkazgichli chastota o'zgartkichlari (CHO') qo'llaniladi (9.5-rasm).

CHO'lari stator chulg'ami kuchlanishining ham chastotasini, ham amplitudasini ma'lum qonuniyat asosidagi o'zgarishini ta'minlaydi. Bunga CHO'larining elementlari – tiristor yoki tranzistorlarni ochib-yopish bilan erishiladi. Elementlarni ochib-yopish uchun signallarni real vaqt rejimida ("on line" rejimi), asinxron motorning chiqish qiymatlarini  $D_1$  va  $D_2$  yordamida o'lchab, shu onda mikroprotses-sorda maxsus kompyuter dasturlarida qayta ishlov berilib, bshqaru singallari vujudga keladi va elementlarga ularni boshqarish signallari sifatida yetkaziladi.

Birnecha o'n yillar avval bunday sxemalar tizimi qimmat va ekspluatatsiyada ishonchliligi juda kichik bo'lganligi sababli, sanoatda o'z o'rnini topolmadi. Hozirgi kunga kelib, bunday sxemalarni tashkil etuvchi elementlar narxi pasayishi, ishonchliligi-ning ortishi sababli sanoatda o'z o'rnini topmoqda.

Bunday ishga tushirishning yana bir afzalligi shundaki, ularni biror qo'shimcha jihozlarsiz (mikroprotsessorlar dasturiy ta'minoti o'zgarishi bundan mustasno) asinxron motor rotori tezligini rostdlashda muvaffaqiyatli qo'llash mumkin.

### **9.3. Qisqa tutashgan rotorli asinxron motor aylanish tezligini boshqarish**

Asinxron motorlarning aylanish tezligini boshqarish muammosi muhim ekspluatatsion ahamiyatga ega. Sanoatning ayrim sohalarida motorlarni boshqarish tavsiflariga juda yuqori talablar (keng diapazon bo'lishi, ravon rostdlanishi va iqtisodiy samarali bo'lishi) qo'yiladi.

Asinxron motorning aylanish tezligi (9.5) ifoda

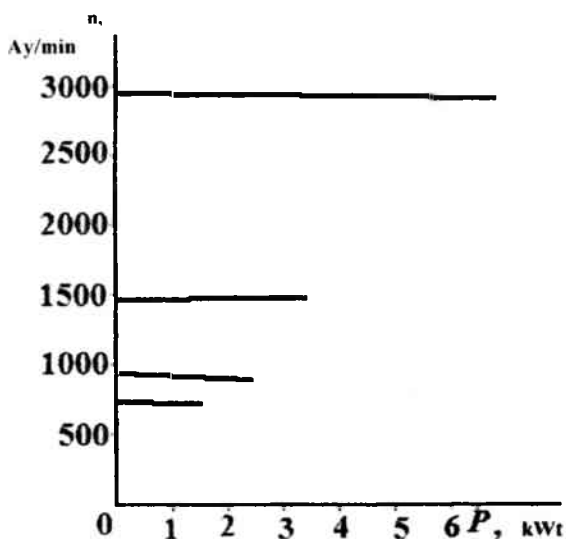
$$n = n_1(1 - s) = 60 f_1(1 - s) / p \quad (9.5,a)$$

yordamida aniqlanadi. Bundan ko'rinadiki, stator tokining chastotasi  $f_1$  va juft qutblar soni  $p$  ni o'zgartirish bilan motorning aylanish tezligini boshqarishi mumkin ekan.

A) Motorning aylanish tezligini juft qutblar  $p$  sonini o'zgartib boshqarish uchun (9.4) asoslanish mumkin. Unga ko'ra motor aylanish tezligi  $p$  ga teskari proporsionaldir. Bugungi kungacha qisqa tutashgan rotorli asinxron mashinalaridagi  $p$  ning qiymati stator chulg'amlari o'ralayotganda, ya'ni mashina ishlab chiqarilayotganda konkret miqdori ko'rsatiladi va uni ekspluatatsiya jarayonida o'zgartirib bo'lmaydi.

Ammo, hozirgi kunda elektrotexnika fanining taraqqiyoti natijasida mashina stator chulg'amlari qutblarini ekspluatatsiya jarayonida boshqarish imkomiyatlari O'zbekiston olimlari tomonidan kashf etilib, ishlab chiqarishga joriy etish ishlari bajarilmoqda.

Ekspluatatsiyaga joriy etilgan  $p$  ni o'zgartirib boshqarishda  $p$  ning qiymati chulg'am ulanishi va chulg'am qadamiga bog'liq bo'ladi. Yana shuni e'tiroz etish zarurki, (9.5) ifodaga ko'ra,  $p$  miqdori o'zgarganda rotor aylanish tezligi pog'onali boshqariladi, masalan,  $p = 1$  bo'lganda  $n_1 = 3000$  ay/min;  $p = 2$  bo'lganda  $n_1 = 1500$  ay/min;  $p = 3$  bo'lganda  $n_1 = 1000$  ay/min;  $p = 4$  bo'lganda  $n_1 = 750$  ay/min va h.k. (9.6-rasm).

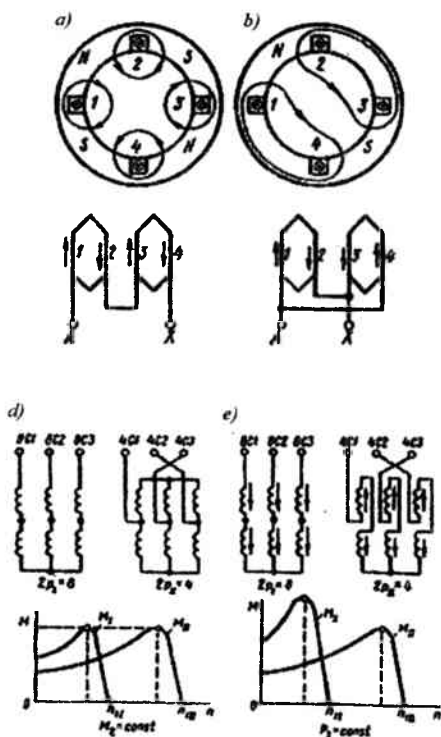


9.6-rasm. Ko'p qutbli asinxron motor rostdash tavsiflari

9.7-rasmda stator chulg'ami qutblari sonini o'zgartirishning eng oddiy sxemasi keltirilgan. Bu sxemada stator chulg'ami qutblari soni ikki marta o'zgaradi. Bunda stator chulg'amining har bir fazasi ikkiga bo'linib, ketma-ket ulanishdan parallel ulanishga o'tkaziladi. 1 va 2, 3 va 4-g'altaklarning parallel ulanishi qutblar sonini ikki marta kamaytirib, motorning aylanish tezligini ikki marta oshiradi.

1 va 2, 3 va 4-g'altaklarning parallel ulanishi qutblar sonini ikki marta kamaytirib, motorning aylanish chastotasini ikki marta oshiradi.

Agarda motorning aylanish tezligini uch yoki to'rt karra oshirish lozim bo'lsa, u holda statorga qo'shimcha yana bitta chulg'am joylashtiriladi.



9.7-rasm. Stator chulg'ami qutblar sonini o'zgartirish sxemalari:

a)  $2p=4$  b)  $2p=2$  qayta ulash sxemalari hamda d)  $M=\text{const}$

Qutblar soni o'zgartirilib, aylanish chastotasi boshqariladigan asinxron motorlarni ko'ptezlikli motorlar deyiladi. Bunday motor rotor qisqa tutashgan bo'ladi. 9.7-rasmda stator chulg'ami qutblari soni 2:1 va 8:4 nisbatlarga o'zgaradigan sxemalar ko'rsatilgan. Bu rasmdagi «c» sxema  $M_2=const$ , «d» sxema esa  $P_2 = const$  hollar uchun qutblar sonini o'zgartiradi va motorning shu rejimlarga mos bo'lgan mexanik tavsiflari ko'rsatilgan.

Katta gabaritli va narxi balandligi ko'p tezlikli asinxron motorlarning asosiy kamchiliklari hisoblanadi.

Bundan tashqari tarmoq kuchlanishi chastotasi o'zgarmas  $f=50\text{Hz}$  bo'lganda, motorning aylanish tezligini boshqarish ravon bo'lmay, pog'onali bo'ladi va juft qutblar soni  $p = 1; 2; 3; 4$  bo'lganda stator chulg'ami hosil qilgan aylanuvchi magnit maydon aylanish tezligi ham o'zgarmas  $n_1 = 3000; 1500; 1000; 750$  bo'ladi. Rotor aylanish tezligi esa yuksiz ishlash rejimida ushbu to'rtta miqdorga yaqin bo'lib, motorning yuklanishi ortishi bilan nishabli (pasayuvchi) bo'ladi (9.6-rasm). Demak, bu usul bilan asinxron motorning rotor aylanish tezligini ravon boshqarib bo'lmaydi.

Usulning yana bir kamchiligi shundaki, ko'p tezlikli asinxron motorning nominal quvvati eng katta aylanish tezligiga mos bo'lib, boshqarish natijasida rotor aylanish tezligining 2, 3 va 4 marta kamayishi, motorning valdagi foydali quvvati shuncha marta kamayishini anglatadi. Demak, bunday asinxron mashinalar o'zining nominal quvvatiga doimo ham erishmas ekan.

B) Qisqa tutashgan rotorli asinxron motorning aylanish tezligini boshqarish usullaridan eng katta diapazonli (10:1 va undan kattaroq) va ravon bo'lishini ta'minlaydigani usul bu chastotaviy boshqarish usuli, ya'ni stator chulg'amiga keltirilgan kuchlanish chastotasini boshqarish hisoblanadi. Buni amalga oshirish uchun o'zgaruvchan chastotali elektr manbi, masalan, sinxron generator yoki tiristorli (tranzistorli) statik chastota o'zgartigichlardan (CHO') foydalaniladi (9.5-rasm). Yuqorida keltirilganidek, CHO' sifatida mikro- va nanoelektronikaning oxirgi yutuqlaridan foydalanish asosida, tiristorli (tranzistorli) to'g'rilagichlar va inverterlar ishlab chiqilmoqdaki, ularning narxi kun sayin pasayib bormoqda. Bu esa CHO'larning sanoatda keng qo'llanishiga qulay vaziyatlar tug'dirmoqda.



Chastotali boshqarishning asosiy shartlaridan biri shundaki, mexanik tavsifga qo'yiladigan talablarga qarab, stator tokining chastotasi o'zgarishi bilan birga, kuchlanish amplitudasi ham ma'lum bir qonuniyat asosida o'zgartirilishi shart.

Chastotali boshqarishning asosiy qonuniyatini birinchi marta akademik M.P. Kostenko ta'riflab bergan.

Motorning maksimal momenti taxminan ( $r_1$  qarshilik e'tiborga olinmayapti) quyidagicha bo'ladi:

$$M_{\max} \approx \frac{m_1 U_1}{2\omega_1(x_1 + x_2'^2)} \quad (9.6)$$

Bunda  $\omega = 2\pi f_1 / p$  va  $x_1 = 2\pi f_1 L_1$ ,  $x_2' = 2\pi f_1 L_2'$ , quyidagini hosil qilamiz.

$$M_{\max} = k_1 \frac{U_1}{f_1^2}, \quad (9.7)$$

bunda  $k_1$  – doimiy koeffitsiyent.

Chastota  $f_1$  ning ikki qiymatlaridagi maksimal momentlar nisbati

$$\frac{M_{\max(1)}}{M_{\max(2)}} = \left[ \frac{U_{1(1)} f_{1(2)}}{U_{1(2)} f_{1(1)}} \right]^2, \quad (9.8)$$

bunda (1) va (2) indekslar har xil burcha tezliklariga mos keladi.

Ifoda (9.8) ga muvofiq, umumiy hol uchun  $f_1$  chastota o'zgarganda  $U_1$  ning o'zgarish qonuniyatini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}} = \frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}} \sqrt{\frac{M_{\max(2)}}{M_{\max(1)}}}. \quad (9.9)$$

Agar aylanish tezligini boshqarishda ixtiyoriy  $f_1$  uchun mexanik tavsifning  $M_{\max}$  qiymati o'zgarmas bo'lishi (o'zgarmas momentli boshqarish) lozim bo'lsa, u holda (9.9) dan quyidagini hosil qilamiz:

$$\frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}} = \frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}} = \text{const}, \quad (9.10)$$

yoki

$$\frac{U_{1(1)}}{f_{1(1)}} = \frac{U_{1(2)}}{f_{1(2)}} = \text{const}. \quad (9.11)$$

(9.9) - (9.11) ifodalarga muvofiq, motorning o'ta yuklanish qobiliyati, quvvat koeffitsiyenti, aylantiruvchi moment, foydali quvvat va F.I.K.lardan birini yoki birnechtasini talab qilingan qiymatda o'zgarmas holda saqlash zarur bo'lsa, chastota  $f_1$  ni o'zgartirish bilan birga stator chulg'amiga keltirilgan kuchlanish  $U_1$  amplitudasini ham o'zgartirish shart ekan.

Sanoat korxonalaridagi ko'plab elektr yuritmalarning asinxron motorlarini 9.5-rasmda keltirilgan sxema asosida, na faqat ishga tushirish rejimida, balki ishchi rejimlarida ham rotor aylanish tezligini chastotaviy boshqarish mumkin. Bunda har xil mexanizmlar va texnologik jarayonlar uchun (9.9) - (9.11) chastotaviy boshqarish qonuniyatlarini o'zgacha va o'ziga xosligi bilan ajralib turadi.

#### 9.4. Faza rotorli asinxron motor aylanish tezligini boshqarish

Faza rotorli asinxron motorining har xil rotor qarshiliklaridagi mexanik tavsiflari 9.2-rasmda keltirilgan. Unga ko'ra yuklanish statik momenti  $M_{CT} = \text{const}$  bo'lganda rotor elektr zanjirining  $r'_{2I}$  qiymatiga mexanik tavsifning 1 nuqtasi, sirpanishning  $s_I$  qiymati va rotor aylanish tezligining  $n_{(I)} = n_1(1-s)$  miqdori mos keladi. Rotor qarshiligining  $r'_{2II}$  quymatida, mos ravishda, 2 nuqta,  $s_{II}$  sirpanish va  $n_{(II)}$  rotor aylanish tezligi to'g'ri keladi. Demak,  $r'_2$  ning qiymatlari o'zgarishi bilan sirpanish  $s = s_I \div 0$  gacha va rotor aylanish tezligi  $n = n_{(I)}$  dan  $n = 0$  gacha o'zgarar ekan.

Bu usuldan aylanish tezligi kichik  $n < n_1$  bulgan diapazonda foydalanish mumkin. Rotor zanjiri qo'shimcha qarshilik oshirilgandi, shu qarshilikdagi elektr isroflar ortadi. Shu bilan birga, rotor

chulg'amida elektr isroflar sinpanishga proporsional bo'lganligi uchun ( $P_{\Sigma} = s \cdot P_{EM}$ ), rotor aylanish tezligining kamayishi rotor chulg'ami elektr quvvat isroflarini oshiradi va motorning F.I.K.ni pasaytiradi. Masalan, motor validagi yuklanish momentining o'zgarmas qiymati uchun, sirpanishning 0,02 dan 0,5gacha ortishi natijasida, aylanish tezligini boshqarib, ikki marta kamayadi, rotor zanjiridagi elektr isroflar esa motor elektromagnit quvvatining taxminan yarmisiga mos keladi. Bundan tashqari, yana rotor aylanish tezligining pasayishi bilan rotor ventilyasiyasi yomonlashib, motor qizib ketishini ko'rish mumkin.

## IV QISM

### SINXRON MASHINALAR

Sinxron mashinalar – o‘zgaruvchan tokli mashinalar turkumiga kiradi. O‘zining tuzilishiga ko‘ra, ular faqat rotorining ayon qutbli yoki noayon qutbli shaklda bajarilishi bilan asinxron mashinalardan farq qiladilar. Xususiyatlariga ko‘ra esa, sinxron mashinalar ixtiyoriy yuklanish darajasida bo‘lishiga qaramay, rotorning aylanish tezligi doimo sinxron ( $n_2 = n_1 = \text{const}$ ) bo‘lishi, hamda sinxron mashinasining samarali ishlashini ta‘minlovchi quvvat koeffitsiyentining qiymatini boshqarish imkoniyati borligi bilan asinxron mashinasidan farq qiladi. Sinxron mashinalar, barcha boshqa elektr mashinalari kabi qaytuvchanlik xususiyatiga ega bo‘lib, generator rejimida ham, motor rejimida ham ishlashi mumkin. Sinxron generatorlar elektr stansiyalarning asosiy elektrotexnik jihozi hisoblanadi, ya‘ni ishlab chiqarilayotgan elektr energiya ning taxminan barchasini sinxron generatorlar yordamida olinadi.

Hozirgi zamon sinxron generatorlari quvvati birnecha yuz ming kilovattni tashkil etadi. Sinxron motorlar, aksariyat katta quvvatli mexanizmlarni harakatga keltirishda (masalan, ruda maydalovi tegirmonlar, sug‘orish kanallari nasoslari, katta quvvatli ventilyatorlar va h.k.) ishlatiladi. Bunday motorlar o‘zlarining texnik-iqtisodiy ko‘rsatkichlari bilan boshqa turdagi motorlardan afzaldir. Yirik elektr energetik qurilmalarda sinxron mashinalar kompensator sifatida ham ishlatiladi. Bunda kompensator reaktiv energiya manbai vazifasini bajarib, barcha qurilmaning quvvat koeffitsiyentini oshirish imkonimi beradi.

Darslikning ushbu qismida asosan uch fazali sinxron generator, motor va kompensator tuzilishi, rejimlari, tavsiflari va ularni boshqarish usullari o‘rganiladi.

## 10-bob. QO'ZG'ATISH MAGNIT OQIMINI HOSIL QILISH VA SINXRON MASHINALARNI TUZILISHI

### 10.1. Qo'zg'atish magnit oqimini hosil qilish

Sinxron generatorning (SG) ishiash prinsipi ko'rilganda uning rotorida MYK manbai (induktor) joylashgan va u generatorning magnit maydonini hosil qiladi, deb aytilgan edi. Birlamchi motor (BM) yordamida generator rotori sinxron tezlik  $n_1$  bilan aylantiriladi. Bunda rotor magnit maydoni rotor bilan birga aylantiriladi va stator chulg'amlarini kesib o'tib, unda EYK induktivlaydi.

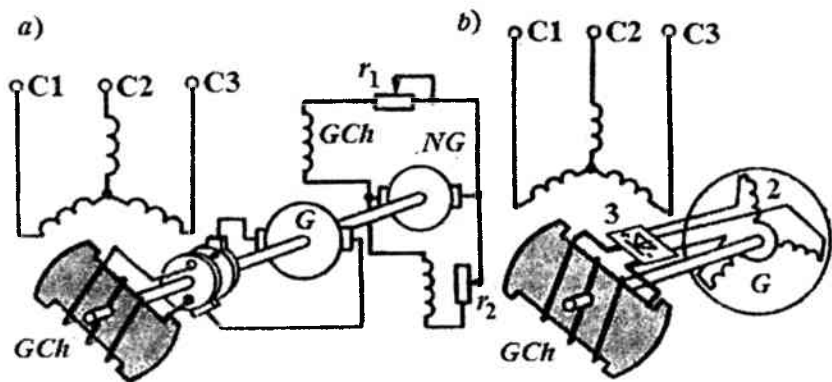
Tuzilishiga ko'ra sinxron motorlar sinxron generatorlardan sezilarli farq qilmaydi. Ularda stator chulg'ami va rotorda qo'zg'atish chulg'ami mavjud. Shuning uchun, ishlash rejimidan qat'iy nazar, har qanday sinxron mashinasi magnit maydon qo'zg'atish - magnit maydon hosil qilishga ehtiyoji bor.

Sinxron mashinalarda magnit maydon qo'zg'atishning asosiy usuli elektromagnit qo'zg'atishdir. Uning mohiyati shundaki, rotor qutblarida qo'zg'atish chulg'amlari joylashtiriladi. Bu chulg'amdan o'zgarimas tok oqib o'tganda qo'zg'atish MYK hosil bo'ladi, u o'z navbatida mashinaning magnit tizimida magnit maydon hosil qiladi.

Hozirgi kunga qadar qo'zg'atish chulg'amini o'zgarimas tok bilan ta'minlash vazifasini maxsus mustaqil qo'zg'atish chulg'ami bo'lgan qo'zg'atkich (Q) deb nomlangan o'zgarimas tok generatorlari bajarib kelgan (10.1,*a*-rasm). Uning mustaqil qo'zg'atish chulg'amini (QCH) esa o'zgarimas tok bilan parallel qo'zg'atkichli, nimqo'zg'atkich (NQ) deb nomlangan boshqa maxsus generator ta'minlaydi. Sinxron mashina rotori va qo'zg'atkich hamda nimqo'zg'atkichning yakorlari umumiy valda mahkamlangan va bir vaqtda aylanadi. Bunda SG qo'zg'atish chulg'amiga tok kontakt halqalar va cho'tkalar orqali qoladi. Qo'zg'atish tokini boshqarish uchun qo'zg'atkichning ( $r_1$ ) va nimqo'zg'atkichning ( $r_2$ ) qo'zg'atish chulg'amlariga ulangan boshqaruvchi reostatlar qo'llaniladi. O'rta va katta quvvatli SGLarda qo'zg'atish chulg'ami tokini boshqarish

avtomatlashtirilgan. Katta quvvatli sinxron generatorlarda – turbogeneratorlarda – qo‘zg‘atkich o‘rni ba‘zan induktor turdagi o‘zgaruvchan tok generatorlari ishlatiladi. Bunday generator chiqish klemmalarida yarim o‘tkazgichli to‘g‘rilagich o‘rnatiladi. Kontaktsiz elektromagnit qo‘zg‘atkichli sinxron generatorlar ham ishlatilmoqda.

Bunday SGLar rotorida kontakt halqalar bo‘lmaydi. Bu holatda ham, qo‘zg‘atkich sifatida o‘zgaruvchan tok generatori ishlatiladi (10.1, b-rasm).

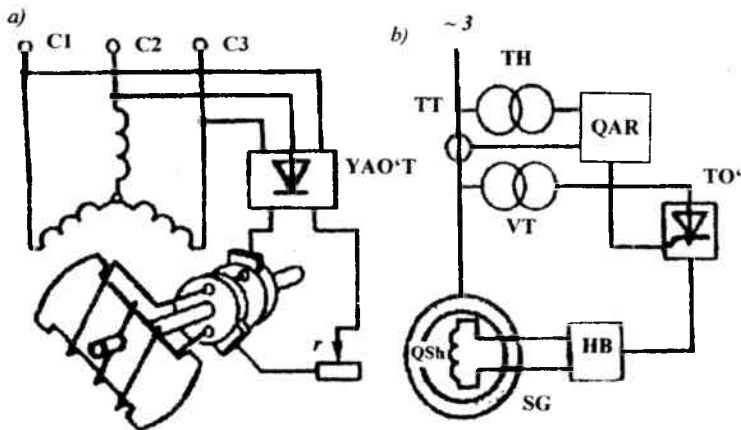


10.1-rasm. Sinxron generator elektromagnit qo‘zg‘atish kontaktli (a) va kontaktsiz (b) tizimlari

Uning EYK induktivlanadigan yakor 2 chulg‘ami rotorda joylashgan, qo‘zg‘atish chulg‘ami 1 esa statorida joylashgan. Natijada qo‘zg‘atkichning yakor chulg‘ami ham, SGning qo‘zg‘atish chulg‘ami ham aylanuvchi qismda bo‘lib, ularning elektrik ulanishi bevosita – kontakt halqa va cho‘tkalarsiz amalga oshiriladi.

Ammo, qo‘zg‘atkich o‘zgaruvchan tok generatori va SGning qo‘zg‘atish chulg‘amini esa o‘zgarmas tok bilan ta‘minlash zarur bo‘lgani uchun, qo‘zg‘atkich yakor chulg‘amining chiqish klemmalariga valga mahkamlangan yarim o‘tkazgichli to‘g‘rilagiya 3 ulanadi va u SG qo‘zg‘atish chulg‘ami va qo‘zg‘atkichning yakor chulg‘ami bilan birga aylanadi. Qo‘zg‘atkichning 1 qo‘zg‘atish chulg‘ami o‘zgarmas tok bilan ta‘minlanishi nimqo‘zg‘atkich (NQ) – o‘zgarmas tok generatori yordamida amalga oshiriladi.

Sinxron mashinaning qo'zg'atish zanjirida sirpanish kontaktlari-ning yo'qligi uning ekspluatatsion ishonchligini va FIKni oshiradi.



10.2-rasm. Sinxron generatorning o'z-o'zini qo'zg'atish tizimi

Sinxron generatorlarda, shu jumladan, gidrogeneratorlarda o'z-o'zini qo'zg'atish prinsipi tarqalgan (10.2,a-rasm). Unga ko'ra, qo'zg'atish tizimi uchun zarur bo'lgan o'zgaruvchan tok energiyasi stator chulg'amidan olinib, pasaytiruvchi transformator (PT) va yarim o'tkazgichli (YAO') to'g'rilagich (T) yordamida o'zgarmas tokka aylantiriladi. O'z-o'zini qo'zg'atish prinsipi generatorning birlamchi qo'zg'atilishi mashinadagi qoldiq magnetizmga asoslangandir.

10.2,b-rasmda to'g'rilagichli transformatori (TT) va tiristorli o'zgartkichi (TO') bo'lgan avtomatik o'z-o'zini qo'zg'atuvchi tizimli sinxron generatorning struktura sxemasi ko'rsatilgan. VT va TPlar orqali SG stator zanjiridan o'zgaruvchan tok energiyasi o'zgarmas tokka aylantirilib, SGning qo'zg'atish chulg'amiga beriladi. Tiristorli o'zgartkichni boshqarish qo'zg'atishning avtomatik rostlagichi (QAR) yordamida amalga oshiriladi. QARning kirish klemmasiga SG stator chulg'amidan kuchlanish transformatori KT va tok transformatori (TT) orqali SG kuchlanishi va yuklanish tokiga proporsional bo'lgan signallar keltiriladi. Sxema tarkibida qo'zg'atish chulg'ami va tiristorli qo'zgartkich (TO') ni o'takuchianish va tok

bo'yicha o'ta yuklanishdan himoya qiluvchi himoya bloki (HB) mavjud.

Hozirgi zamon sinxron motorlarida qo'zg'atish tizimi uchun, o'zgaruvchan tok manbaiga ulangan va motorning har qanday rejimlarida ham, shu jumladan, o'tkinchi jarayonlarda qo'zg'atish tokini avtomatik boshqaradigan tiristorli qo'zg'atish qurilmalari qo'llanilmoqdi. Qo'zg'atishning bunday usuli ishonchli va iqtisodiy samarali hisoblanadi, chunki tiristorli qo'zg'atish tizimlarida FIK o'zgarmas tok generatorga nisbatan yuqoridir.

Sanoat korxonalaridan tomonidan har xil qo'zg'atish kuchlanishlari va o'zgarmas tokli 320A gacha har xil yuklanish toklari uchun tiristorli qo'zg'atishlar ishlab chiqarilmoqda.

Hozirgi zamon sinxron motorlari seriyalarida TE8-320/48 (qo'zg'atish kuchlanishi 48V) va TE8-320/75 (qo'zg'atish kuchlanishi 48V) tiristorli qo'zg'atichlar keng qo'llanilmoqda. Qo'zg'atish uchun sarflanadigan quvvat, aksariyat, mashina foydali quvvatining 0,2-5% gacha tashkil etadi.

Kichik quvvatli sinxron mashinalarda rotordagi magnit o'zak va qo'zg'atish chulg'ami o'rmida o'zgarmas magnit ishlatida. Bunday qo'zg'atish usuli mashina konstruksiyasini soddalashtiradi, samarali va ishonchli bo'ladi.

## **10.2. Sinxron mashinalar turlari va tuzilishi**

Sinxron mashina qo'zg'almas qism - stator va aylanuvchi qism - rotordan tarkib topgan. Sinxron mashina statori, aslida, asinxron mashina statoridan farq qilmaydi, ya'ni korpus (stanina), magnit o'zak va chulg'andan iborat.

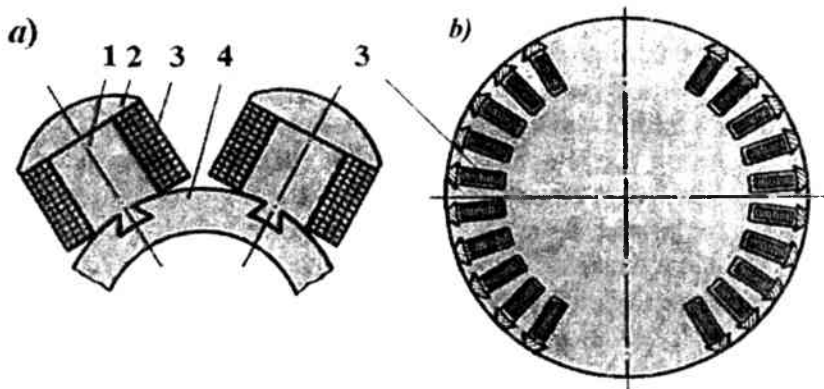
Mashinaning vazifasi va gabaritiga ko'ra sinxron mashina statori konstruksiyasining bajarilishi har xil bo'lishi mumkin. Masalan, katta quvvatli, ko'p qutbli mashinalarda stator magnit o'zagining tashqi diametri 900 mm va undan katta bo'lganda, magnit o'zak plastinalarini alohida segmentlardan yasaladi va yig'ilgandan keyin magnit o'zak silindrini hosil qiladi. Tashish va montaj qilishda qulaylik bo'lishi uchun, katta gabaritli mashinalar statorining korpuslari yig'ma shaklda quriladi.



Sinxron mashinalar qutblari bir-biridan tubdan farq qiluvchi ikki xil konstruksiyali bo'ladi: ayon qutbli va noayon qutbli.

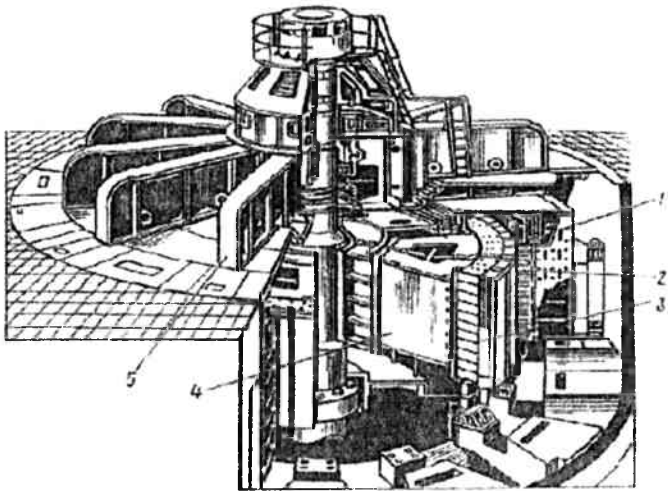
Energetik qurilmalar (elektr stansiyalar)da sinxron generatorni harakatga keltiruvchi birlamchi motorlarda asosan uch xil motorlar ishlatiladi: bug' turbinalari, gidravlik turbinalar yoki ichki yonar motorlar (dizellar). Ular har biri generatorning yuritmasi bo'lishi bilan, generator konstruksiyasiga o'zining hal qiluvchi ta'sirini o'tkazadi. Yurituvchi motor gidravlik turbina bo'lsa, sinxron generator gidrogenerator deyiladi.

Aksariyat, gidravlik turbinalar katta bo'lmagan aylanish tezliklarida (60-500 ay/min) ishlaydilar. Shu sababli, tokning sanoat chastotasi ( $f_1=50\text{Hz}$ ) ni hosil qilish uchun, gidrogeneratorda katta qutblar soniga ega bo'lgan rotor qo'llaniladi. Gidrogenerator rotorlari ayon qutbli shaklga ega, ya'ni yaqqol qutb shaklida yasalgan bo'ladi. Bunda har bir qutb alohida bo'linma shaklida yasalib, magnit o'zak 1, uchlik 2 va qutb g'altigidan iborat bo'ladi (10.3,a-rasm). Rotorning barcha qutblari to'g'in 4 (obod)ga mahkamlanadi; to'g'in yana mashina qutblarining magnit oqimlari tutashadigan yarmo vazifasini ham bajaradi. Gidrogeneratorlar, aksariyat, vali vertikal joylashgan holatda yasaladi (10.4-rasm).



**10.3-rasm.** Sinxron mashina rotori tuzilishi:

- a) ayon qutbli rotor;
- b) noayon qutbli rotor.



**10.4-rasm. Hidrogenerator.**

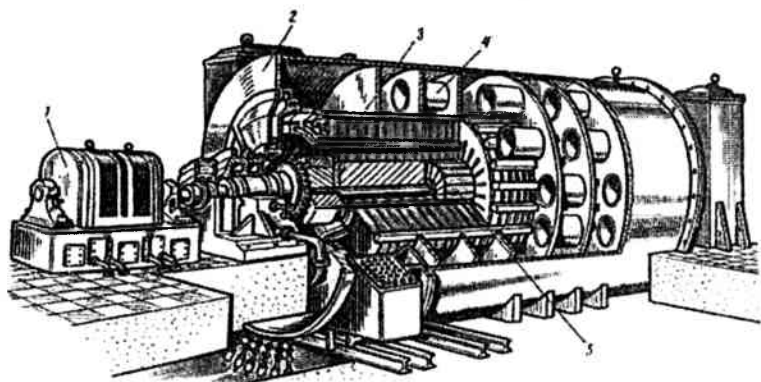
Bugʻ turbinasining samarali ishlash rejimlari yuqori aylanish tezliklarida namoyon boʻladi. Shu sababli, u harakatga keltiradigan turbogenerator deb nomlangan generator, tezyurar sinxron mashinasi hisoblanib, uning rotori yokki ikki qutbli ( $n_1=3000$  ay/min), yoki toʻrt qutbli ( $n_1=1500$  ay/min) bajariladi.

Katta aylanish tezligiga ega boʻlgan turbogeneratorning ishlash jarayonida rotorda juda katta markazdan qochmi kuch hosil boʻladi. Shuning uchun, mexanik mustahkamlik shartlariga koʻra, turbogeneratorda noayon qutbli rotor ishlatiladi. Uning koʻrinishi uzun silindr shaklida boʻlib, frezer stanogida boʻylama pazlar qirqiladi va ularga qoʻzgʻatish chulgʻamlari oʻrnatiladi (10.3,b-rasm).

Ayon qutbli rotorning qoʻzgʻatish chulgʻami rotor perimetrining  $2/3$  qismni (pazlar joylashgan qismi) egallaydi. Qolgan yuzaning  $1/3$  qismini qutblar tashkil etadi. Rotor chulgʻami tirsak qismini markazdan qosma kuchning buzuvchi taʼsiridan himoya qilish uchun, ikki yon yuzasidan nomagnit poʻlar halqalar bilan mahkamlanadi.

Togʻ-kon sanoatida ishlaydigan tegirmonlar, turbokompressorlar va turbobosim xaydagichlarda SDS-19-56-40, 4000, 2500, 1250 KWt li, STD-1250, STD-3200 1250 va 3200 KWt li sinxron

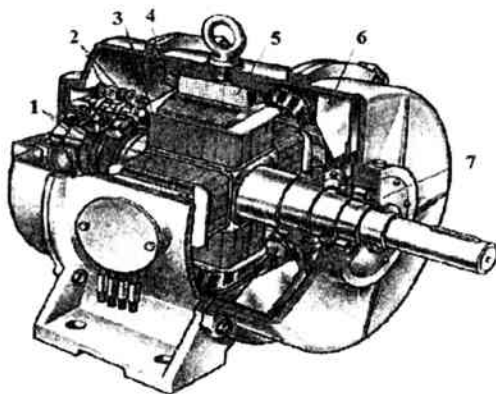
motorlari ham kichik aylanish tezligiga ega bo'lib, rotorlari ayon qutbli shaklda bo'ladi. Ammo ushbu sinxron motorlar vali gorizontol holatda joylashtirilgan.



**10.5-rasm.** Turbogenerator:

1- qo'zg'atkich; 2-korpus; 3-stator magnet o'zagi; 4-vodorodli sovutish seksiyalari; 5-rotor.

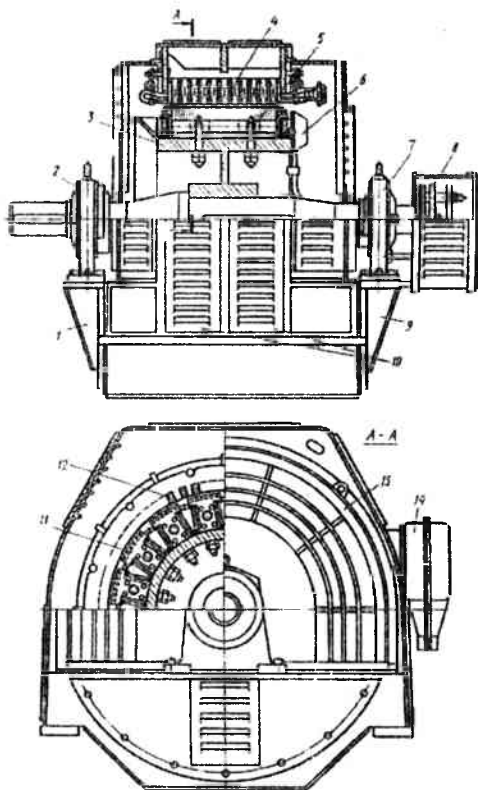
Dizelgeneratorlar rotorlari 600-1500 ay/min aylanish tezligiga ega bo'lib, ayon qutbli rotorlar ishlatiladi (10.6-rasm).



**10.6-rasm.** Sinxron generator (dizel-generator):

1-kontakt halqalari; 2-shyotka ushlagich; 3-rotorning qutb g'altagi; 4-qutb uchi; 5-stator magnet o'zagi; 6-ventilyator; 7-val.

Tog'-kon sanoati korxonalarining sinxron mashinalari katta guruxini quvvati birnecha MWtgacha bo'lgan ventilyatorlar, tegirmonlar, nasoslar va aylanish tezligini boshqarish talab etilmaydigan boshqa sinxron motorlari tashkil etadi. Misol tariqasida, SDN2 seriyadagi motorni ko'raylik. Bu seriyadagi motorlarni rotor aylanishi tezligi 300 dan 1000 ay/min gacha va quvvati 315 dan 4000 K Wtgacha, stator chulg'ami kuchlanishi 6 yoki 10 kV, chastotasi 50 Hz bo'lgan motorlar tashkil etadi (10.7-rasm).



10.7-rasm. SDN-2 turdagi sinxron motor tuzilishi

Po'lat korpusga presslangan stator 1 magnit o'zagi, 0,5 mm qalinlikdagi elektrotexnik po'lat tutikachalardan shtamplab yig'ilgan

paket-segmentlardan iborat. Motorni jadal sovitish uchun motor magnit o'zagi paketlari kengligi 10 mm bo'lgan radial ventilyatsiya kanal bilan ajratilgan. Stator 12 chulg'ami ikki qatlamli, qisqartirilgan qadamli qilib yasalgan. Rotor qutblari magnit 11 o'zagi 3 to'g'inga 5 shpilkalar yordamida mahkamlanadi. Rotor chulg'ami qutb g'altaklaridan iborat. Qo'zg'atish chulg'amlariga o'zgarmas tok yetkazuvchi kontakt halqalar 8 valning uchiga mahkamlanadi. Rotorda markazdan qochmi ventilyatorning parraklari 6 mavjud.

Ustunsimon podshipniklar 2 va 7 podshipnik qalqonlari 1 va 9 da o'rnatilgan. Motor yon tomonlarida po'lat 13 qalqon bilan berkitilgan. 10 korpusda ventilyatsion darchalar mavjud bo'lib, jalyuzi bilan berkitilgan. Korpusning yon tomonida chiqish klemmalarining qutisi joylashgan. Motorning qo'zg'atkichi tiristorli o'zgartkichdan iborat bo'lib, motor ishga tushirilishi va to'xtatilishda qo'zg'atish toki avtomatik boshqariladi. Qutb uchliklarining pazlarida ishga tushirish (so'ndirish) chulg'amining jez yoki mis o'tkazgichli 6 sterjenlar joylashgan. Sterjenlarning ikki uchlarida qisqa tutashtiruvchi 7 segmentlar ulangan.

Qutb uchlarining tashqi silindrik yuzasi va stator magnit o'zagining ichki silindrik yuzasi orasida ishchi havo  $\delta$  oralig'i mavjud. Qutb o'qiga mos kelgan bu oralig'  $\delta$  ning qiymati minimal, qutb uchliklarining chekkasida  $\delta_{max}$ . Qutb uchligining bunday shakl tuzilishi havo oralig'ida magnit induksiyasining sinusoidal taqsimlanishini ta'minlash uchun qabul qilingan.

### 10.3. Yirik sinxron mashinalarni sovutish

Yirik sinxron mashinalarni sovutish uchun berk konturli sovutish tizimlari qo'llaniladi. Bunda sovutivchi gaz sifatida vodorod qo'llaniladi. Vodorodning o'ziga xos xususiyatlari vodorodli sovutish tizimiga bir qator afzalliklar beradi:

1. Texnik vodorod havodan o'n martadan ko'proq engil bo'lganligi sababli, ventilyatsiyaga sarflanadigan quvvat isrofi kamayadi va, demak, mashinaning F.I.K.ortadi. Masalan, quvvati 150 MW bo'lgan turbogenerator havo bilan sovutilganda, ventilyatsiyaga sarflanuvchi quvvat isrofi 1000 KWt ni tashkil etadi. Shunday

quvvatli turbogeneratorni vodorodli sovutishda quvvat isroflari 140 K Wt gacha pasayadi, ya'ni ventilyasiya isrofi yetti marta kamaydi.

2. Vodorodning issiqlik o'tkazuvchanligi havonikiga nisbatan 6-7 marta katta bo'lgani sababli vodorod mashinani jadallik bilan sovutadi. Demak, berilgan gabarit qiymatlarda vodorod sovutishli mashinani yaratib, havo bilan sovutishga nisbatan mashina nominal quvvatini 20-25% ga oshirishimiz mumkin.

3. Vodorod bilan sovutish mashinada yong'in chiqish ehtimolini pasaytiradi, chunki vodorod yonmaydi va yong'in davom etishiga sharoit yaratmaydi.

4. Vodorodli sovutish chulg'amlar izolyasiyasining ishlash mud-datini oshiradi, chunki yo'lyi razryad bo'lganda, mashinada azotning yo'qligi sababli nitratlar (izolyatsion materiallarning organik tashkil etuvchilari emiruvchi mo'ddalar) hosil bo'lmaydi.

Mashinada vodorod bosimining ortishi vodorodli sovutishning samarasini oshiradi. Biroq, vodorodli sovutishning yuqoridagi keltirilgan yaxshi tomonlaridan tashqari, uning kamchiliklari ham mavjud. Uning mohiyati shundaki, vodorodli sovutish mashinaning o'zini ham, uning ekspluatatsiyasini ham murakkablashtiradi va qimmatlashtiradi. Bu, birinchi galda, mashinani sovutish tizimida vodorodni yetkazib berish, vodorodning zaruriy bosimini ta'minlovchi vodorod xo'jaligi kompleksini saqlab turish zaruratini tug'diradi. Ammo, katta quvvatli sinxron generatorlarida (turbogeneratorlar, gidrogeneratorlar, sinxron kompensatorlar) vodorodli sovutish o'zini oqlaydi va katta iqtisodiy samara beradi.

Ko'rilgan sovutish usullari bilvosita bo'lib, sovutish inoddasi mashinaning eng qizigan qismi – chulg'amlar bilan bevosita kontakt-siz amalga oshiriladi. Chulg'amlardan issiqlikning olinishi ushbu usullarda bevosita elektr izolyatsiyasi (chulg'am tirsak qismida) va magnit o'zak po'lati orqali bajariladi. Bu esa sovutish jarayonining samarasini pasaytiradi. Shuning uchun, chulg'amlarni va boshqa qizigan qismlarni bevosita sovutish samaraliroq hisoblanadi. Bu sovutish usulini tatbiq etishda chulg'am o'tkazgichlari va magnit o'zaklarda ichki kanallar ochiladi, ular orqali sovutuvchi modda (vodorod, suv, moy) yuboriladi. Sovutuvchi moddaning chulg'am o'tkazgichlari va magnit o'zakning ichki qatlanlari bilan bevosita kontakti, mashina elementlarini sovutishning jadalligini oshiradi va

mashinaning solishtirma elektromagnit yuklanishlarini (tok zichligi, magnit induksiyasining maksimalligi) oshirishga olib keladi. Aksariyat, bevosita sovutish usullarini katta quvvatli mashinalarda – turbo va gidrogeneratorlarda qo‘llaniladi, natijada mashina o‘rnatilgan quvvatini oshiradi.

### **Nazorat savollari**

1. Sinxron mashinasini qo‘zhotishning qanday usullari mavjud?
2. Sinxron generator o‘z-o‘zini qo‘zg‘atish tizimida tiristorli o‘zgartkichning vazifasini tushuntiring.
3. Ayon va noayon qutbli rotorlarning tuzilishini tushuntiring.
4. SD112 turdagi sinxron motori tuzilishini tushuntiring.
5. Sinxron ayon qutbli mashinalarda qutblarni mahkamlash usullarini keltiring.
6. Sinxron mashmadagi havo oralig‘i ravon emasligining sababi nimada?

## 11-bob. SINXRON GENERATORLARNING MAGNIT MAYDONI VA TAVSIFLARI

### 11.1. Sinxron mashinani magnit zanjiri

Sinxron mashinasining yuksiz ishlash rejimida, ya'ni stator chulg'ami toki  $I_1$  bo'lmaganda, magnit maydon faqat qo'zg'atish chulg'ami MYK  $F_{\nu 0}$  tomonidan hosil qilinadi. Bunday holatda ayon qutbli mashinaning havo oralg'idagi induksiya taqsimlanishi rotorning qutb uchliklari shakliga bog'liq bo'ladi. Bu egrri chiziqqa sinusoidal funksiyaga yaqin bo'lgan shakl berish maqsadida havo oralg'ini bir xil – o'zgarmas qilmasdan, qutb uchliklarining chekka qismlarida uni oshiriladi.

Ayon qutbli sinxron mashina asosiy magnit oqimi, mashina magnit tizimida berk kontur hosil qilib, stator chulg'amini ham kesib o'tadi. Noayon qutbli asinxron mashinalardagi kabi, noayon qutbli sinxron mashinalar magnit tizimi  $2r$  parallel shaxobchadan iborat tarqoq simmetrik magnit tizimni hosil qiladi (11.1-rasm). Ularning har bir shaxobchasi bir juft qutblari bo'lgan mujassam magnit zanjirni tashkil etadi (11.1,b-rasm). Asosiy magnit oqim  $F$  magnit zanjirida berk kontur hosil qilib, bir necha zonalaridan o'tadi (11.2-rasm): havo orlig'i  $\delta$ , statorning tish qatlami  $h_{z1}$ , rotorning tish qatlami  $h_{z2}$ , rotor qutbi  $h_m$ , stator yarmosi  $L_1$  i rotor yarmosi  $L_{ob}$ .

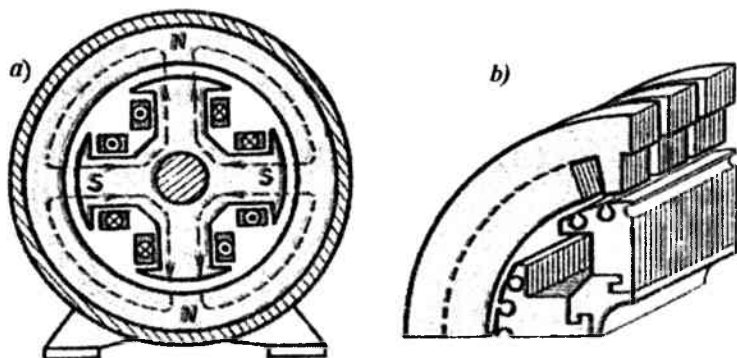
Magnit zanjirdagi nomlari keltirilgan zonalarining magnit kuchlanishlari yig'indisi YU.i.rejimida bir juft qutblar qo'zg'atish chulg'amlari uchun MYKmi aniqlaydi (A)

$$F_{\nu 0} = \sum F = 2F_{\delta} + 2F_{z1} + 2F_{z2} + 2F_m + F_{c1} + F_{ob}, \quad (11.1)$$

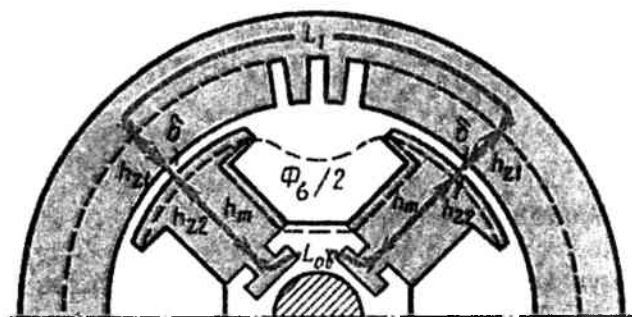
bunda  $F_{\delta}$ ,  $F_{z1}$ ,  $F_{z2}$ ,  $F_m$ ,  $F_{s1}$  i  $F_{ob}$  – mos ravishda, havo orlig'i, stator va rotor tish qatrlari, qutblar, stator va rotor yarmolari magnit kuchlanganliklari.



Magnit zanjir zonalaridagi magnit kuchlanganliklarni hisoblash tartibi, asinxron mashinasi magnit zanjirini hisoblagandagidek. Qutblar va rotor yarmosi magnit kuchlanganligini shuni nazarda tutish zaruki, bu zonalarda magnit oqim asosiy magnit oqim  $F$  ga nisbatan tarqoq magnit  $F_{\sigma}$  oqimlari hisobga kattaroq bo'ladi. Tarqoq magnit oqimlar  $F_{\sigma}$  umumiy magnit oqim  $F_M$  ning bir kichik qismini tashkil etib, havo oralig'i  $\delta$  orqali o'maydigan va qutblar aro oraliqda berk kontur hosil qiladi



11.1-rasm. Ayon qutbli sinxron mashina magnit tizimi



11.2-rasm. Ayon qutbli sinxron mashina magnit zanjiri

$$F_m = F + F_{\sigma} = F(1 + F/F_{\sigma}) = F_{\sigma m}, \quad (11.2)$$

bunda  $\sigma_m$  – rotor qutblarining tarqoq magnit koeffitsiyenti.  
 Ayon qutbli sinxron mashinasi uchun koeffitsiyent

$$\sigma_m = 1 + 0,2 k_{\mu 1} \quad (11.3)$$

bunda

$$k_{\mu 1} = F_{10} / (2F_{\delta}) \quad (11.4)$$

- sinxron mashina stator magnit o'zaginging magnit to'yinishi koeffitsiyenti;

$$F_{10} = 2 F_{\delta} + 2F_{z1} + F_{c1}$$

- stator magnit o'zagi va havo oraliq'i magnit kuchlanganligi yig'indisi, A.

Sinxron ayon qutbli mashinalar uchun rotor magnit o'zaginging to'yinganlik darajasiga va qutblar soniga bog'ligi ravishda ( $2r$  qutblar soni ortishi bilan mashinaning qutblar aro havo orlig'i kamayadi va magnit tarqoqlik ortadi) rotor qutblari tarqoq magnit koeffitsiyenti  $\sigma_m = 1,1 \div 1,4$  bo'ladi. Sinxron mashinaning magnit zanjiri hisoblangandan keyin mashina magnit tavsifi quriladi. YUksiz ishlash rejimidagi qo'zg'atish chulg'ami MYK  $\sum F$  dan foydalanib, qo'shimcha hisoblashlar natijasida, qo'zg'atish chulg'amining yuklanishdagi MYK  $F_{QYU}$  aniqlanadi. Aksariyat,  $F_{QYU} = (2,0 \div 2,2) \sum F$  bo'ladi.

Yuklanishdagi MYKning aniqlangan  $F_{QYU}$  qiymati rotor qutbidagi g'altakning o'ramlar sonini hisoblash imkonini beradi

$$w_{G \cdot Q} = F_{QYU} / (2I_Q), \quad (11.5)$$

bunda  $I_Q$  – sinxron mashina qo'zg'atish chulg'amidagi tok, A.

## 11.2. Sinxron mashina magnit maydoni

Ushbu bobda simmetrik yuklanishga ulangan, chulg'amning barcha fazalari bir hil ravon yuklangan, ya'ni fazalarida bir biridan  $120^0$  ga siljigan bir hil qiymatdagi induktivlanuvchi EYK va toklar oqadi, deb hisoblaymiz. Bunday sharoitda statorning uch fazali

chulg'ami rotor bilan sinxron aylanuvchi MYKni hosil qiladi, uning maksimal qiymati quyidagicha ifodalanadi.

$$F_1 = 0,45m_1 I_1 w_1 k_{obl} / p. \quad (11.6)$$

Quyida shunday fikrga kelamizki, MYKning vektori rotor qutblari o'qlariga nisbatan har hil fazoviy holatda bo'lishi mumkin ekan.

Noayon qutbli sinxron mashinada havo orlig'i ravon va bir hil, shu sababli stator MYK vektorining rotor qutblari o'qlariga nisbatan fazoviy holati, stator magnit maydoni qiymati va taqsimlanish grafigiga ta'sir etmaydi.

Ayon qutbli sinxron mashinada po'lat bilan to'ldirilmagan katta qutblar aro bo'shliq mavjudligi sababli, havo oralg'i ravon emas (11.3-rasm), stator magnit oqimining tashkil etuvchisi  $F_d$  ga nisbatan  $d-d$  o'q bo'yicha magnit qarshilik,  $F_q$  magnit oqimga ko'ndalang o'q  $q-q$  bo'ylab ko'rsatiladigan magnit qarshilikdan ancha kichik bo'ladi. Shuning uchun, ayon qutbli sinxron mashinalarda havo oralg'ida magnit induksiyaning taqsimlanishi va grafigi stator chulg'ami MYK  $G_1$  vektori yoki uning tashkil etuvchilarining fazodagi joylashishiga bog'liq.

Shu sababli, bo'ylama o'q bo'yicha stator magnit maydoni induksiya asosiy garmonikasining amplitudasi  $B_{1d1}$  ko'ndalang o'q bo'yicha stator magnit maydoni asosiy garmonikasi amplitudasi  $V_{1q1}$  dan katta:

$$B_{1d1} = B_1 k_d; \quad B_{1q1} = B_1 k_q \quad (11.7)$$

bunda  $V_1$  - ravon havo oralg'i bo'lgandagi stator magnit induksiya qiymati;  $k_d$  va  $k_q$  - bo'ylama va ko'ndalang o'qlar bo'ylab magnit maydo shakli koeffitsiyenti.

Koeffitsiyentlar  $k_d$  va  $k_q$  ayon qutbli sinxron mashina havo oralg'ining ravon bo'lmaganligi sababli, bo'ylama va ko'ndalang o'qlar bo'ylab yakor magnit oqimi asosiy garmonikalarining kamayish darajasini ko'rsatadi.

Koeffitsiyentlar  $k_d$  va  $k_q$  qiymatlari maksimal va minimal havo orlig'i qiymatlari nisbatiga  $\delta_{\max}/\delta$ , havo oralg'ining nisbiy kattaligi  $\delta/\tau$  ga, hamda qutb nisbiy kengligi  $\alpha_r$  ga bog'liq. Ravon havo oralg'i ( $\delta=const$ ) bo'lganda, ushbu nisbat  $\delta_{\max}/\delta = 1$ . Qutb bo'limi  $\tau$  (2.1) dan

aniqlanadi. Qutbni qoplash koeffitsiyenti  $\alpha_i = b_r/\tau$ , bunda  $b_r$  – qutb uchligining kengligi.

Havo oralig‘i ravon ( $\delta_{\max}/\delta=1$ ) bo‘lsa va uning nisbiy qiymati ( $\delta/\tau \approx 0$ ) kichik bo‘lsa, magnit maydon shakli koeffitsiyenti quyidagi ifoda bilan aniqlanadi.

$$k_d = [\pi\alpha_i + \sin(\alpha_i 180^\circ)] / \pi, \quad (11.8)$$

$$k_q = [\pi\alpha_i - \sin(\alpha_i 180^\circ)] / \pi. \quad (11.9)$$

Ifodalardan (11.8) va (11.9) shu ma‘lumki,  $\alpha_i = 1$ , ya‘ni noayon qutbli rotor bo‘lganda,  $k_d = k_q = 1$ .

Sinxron mashinaning qo‘zg‘atish chulg‘ami orqali  $I_v$  toki oqib o‘tganda, juft qutblar uchun quyidagi MYK hosil bo‘ladi, (A):

$$F_{v_n} = I_v 2w_{k_v}. \quad (11.10)$$

Bunda mashina havo oralig‘idagi magnit maydon shakli rotorning tuzilishiga bog‘liq. Bu magnit maydon asosiy garmonikasining amplitudasi  $V_{v1}$  magnit maydon shakli koeffitsiyenti bilan ifodalanadi

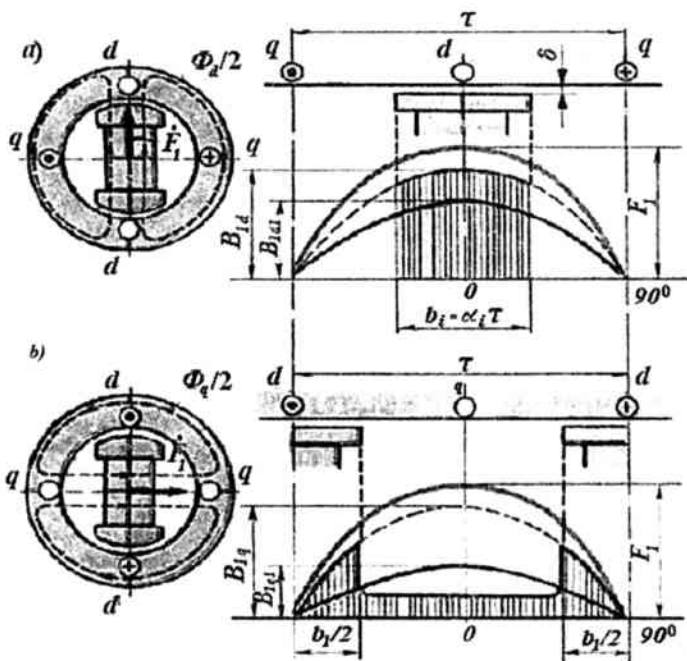
$$k_f = B_{v1} / V_v, \quad (11.11)$$

bunda  $V_v$  – qo‘zg‘atishi magnit maydoni induksiyasining maksimal qiymati (11.4-rasm).

Noayon qutbli rotor uchun magnit maydon shakli koeffitsiyenti quyidagicha bo‘ladi (11.4,a-rasm):

$$k_f = 8\sin \gamma 90^\circ / (\pi^2 \gamma), \quad (11.12)$$

bunda  $\gamma=2\alpha/\tau$  – rotor qutbi chulg‘am o‘ralgan qismining qutb bo‘limiga nisbati. Aksariyat,  $\gamma=0,67 \div 0,80$ . Magnit maydoni tarkibida eng kam yuqori garmonik tashkil etuvchisi mavjudligi  $\gamma=0,75$  ga mos keladi.



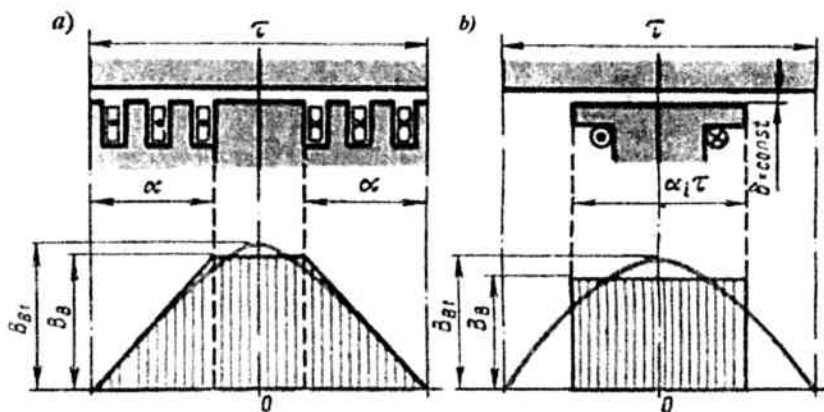
11.3-rasm. Ayon qutbli sinxron mashina magnet maydoni  
 a) bo'ylama o'q va b) ko'ndalang o'q bo'ylab

Ayon qutbli rotor uchun ravon havo oralig'i bo'lganda va  $\delta/\tau \approx 0$  bo'lganda qo'zg'atish chulg'ami magnet maydoni shakli koeffitsiyenti (11.4,b-rasm).

$$k_f = 4 \sin \alpha_i 90^\circ / \pi . \quad (11.13)$$

Qutblar qirralarida havo oralig'ining oshirilishi koeffitsiyent  $k_f$  ning birga yaqinlashishiga sabab bo'ladi, ya'ni induksiyaning shakli sinusoidaga yaqinlashtiradi.

Havo oralig'i noravon bo'lganda magnet maydon shakli koeffitsiyenti sinxron mashinani hisoblash bo'yicha uslubiy ko'rsatmalarda keltirilgan grafiklar yordamida aniqlanadi [5, 15].



11.4-rasm. Noayon (a) va ayon qutbli (b) mashina magnet maydoni

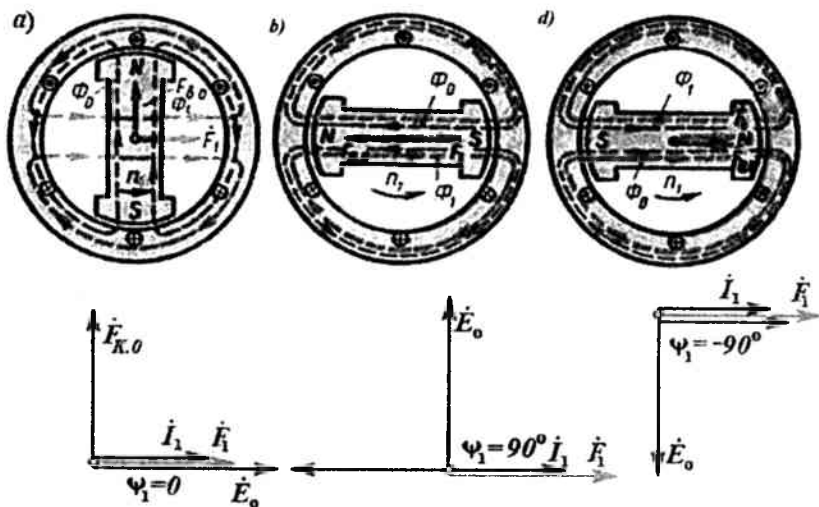
### 11.3. Sinxron mashinani yakor reaksiyasi

Stator chulg'amlariga yuklanish ulangan sinxron generatorning ish jarayonida qo'zg'atish chulg'ami hosil qilgan qo'zg'atish MYK  $F_{v0}$  [(11.1)ga qarang] va stator (yakor) chulg'ami MYK  $F_1$  (11.6) birgalikda ta'sir etadi, bunda yakor MYK qo'zg'atish MYKga ta'sir etib, uni susaytiradi, yoki kuchaytiradi, yoki uning shaklini o'zgartiradi. Yakor MYKning qo'zg'atish MYKga ta'siri yakor reaksiyasi deyiladi. Yakor reaksiyasi sinxron mashinaning ishchi xususiyatlariga ta'sir etadi, chunki magnet maydonning o'zgarishi stator chulg'amida induktivlangan EYK o'zgarishiga va, demak, EYK bilan bog'liq bo'lgan bir qator qiymatlarning o'zgarishiga olib keladi. Yakor reaksiyasining sinxron mashina ishlashiga ta'siri yuklanishning qiymati va xarakteriga bog'liq.

Sinxron generatorlar, aksariyat, aralash yuklanish bilan ishlaydi (aktiv-induktiv yoki aktiv-sig'im). Ammo, yakor reaksiyasining sinxron mashina ishiga ta'sirini aniqlashdan avval, yuklanishning aktiv, induktiv va sig'im tashkil etuvchilarining har biri alohida sinxron generatorga ta'sirini o'rganish maqsadga muvofiq. Buning uchun MYK vektorlar diagrammasidan foydalanamiz. Ushbu diagrammalarni qurishda e'tiborda saqlash kerakki, qo'zg'atish magnet oqimi stator chulg'amida EYK induktivlaydi, uning vektori

shu magnit oqim (va, demak, MYK) vektoridan  $90^\circ$ ga kechikadi. Stator chulg'amidagi  $I_1$  tok vektori esa,  $E_0$  vektoriga nisbatan yuklanish xarakteriga bog'liq ravishda joylashadi.

**Aktiv yuklanish ( $\psi=0$ ).** 11.5.a-rasmda ikki qutbli generatorning stator va rotorlari ko'rsatilgan. Stator va rotor faza chulg'amining bir qismi ko'rsatilgan. Rotor ayon qutbli bo'lib, soat miliga teskari yo'nalishda aylanadi. Vaqtning ko'rilayotgan onida rotor vertikal holatda bo'lib, faza chulg'ami EYKning maksimumiga mos keladi. Aktiv xarakterdagi yuklanishda tok vektorining yo'nalishi EYK vektori yo'nalishiga mos bo'lganligi uchun, rotorning ko'rsatilgan holati ham tokning maksimumiga mos keladi.



11.5-rasm. Simxron generatorning aktiv (a), reaktiv (b) va sig'im (d) xarakterdagi yuklanishda yakor reaksiyasi

Qo'zg'atish (rotor) magnit induksiyasi liniyalari va stator chulg'ami magnit maydoni induksiyasi liniyalarini chizgandan so'ng ko'ramizki, stator MYK qo'zg'atish MYKga perpendikulyar yo'nalgan ekan.

Ushbu xulosa, mazkur rejim uchun qurilgan vektor diagrammasida ham o'z tasdiqini topadi. Diagrammani qurish tartibi quyidagicha:

generator rotorining fazoda joylanishiga qarab, qo'zg'atish MYK  $F_{K_0}$   $\vec{E}_0$  vektorini quramiz; shu vektorga  $90^\circ$  burchak ostida kechikish yo'nalishida, stator chulg'amida qo'zg'atish magnit maydoni induktivlagan  $\vec{E}_0$  EYK vektorini quramiz; stator chulg'amiga toza aktiv xarakterdagi yuklanish ulanganda, undagi tok  $i_1$  EYK  $\vec{E}_0$  yo'nalishi bilan mos bo'ladi, shu sababli, ushbu tok hosil qilayotgan  $F_{K_0}$  MYK vektori fazoda  $90^\circ$  ga siljigan bo'ladi.

Yakor MYKning qo'zg'atish MYKga ta'siridan natijaviy magnit maydon shakl buzilishiga olib keladi: mashinaning magnit maydoni qutb uchligining bir chekkasi ostida kuchayadi, boshqa chekkasi ostida susayadi (11.6-rasm). Magnit zanjir to'yinmagan bo'lsa, asosiy manit maydonning shakl buzilishi uning qiymatini o'zgartirmaydi. Magnit tizim to'yinishi natijasida esa, natijaviy magnit maydon biroz susayadi. Chunki yakor reaksiyasining magnitsizlovchi ta'siri qutb uchligining chekkasini va uning ostidagi statorning tish zonasini oson magnitsizlaydi; qutb ikkichi uchligi va uning ostidagi statorning tish zonasini magnitlash magnit to'yinish bilan cheklanadi. Shu sababli, mashinaning natijadaviy magnit maydoni susayadi, ya'ni magnit tizim birmuncha magnitsizlanadi. Bu hodisa mashina EYK  $\vec{E}_1$  ning kamayishiga olib keladi.

**Induktiv yuklama.** Sof induktiv yuklanish ( $\psi = 90^\circ$ ) bo'lganda generator toki fazasi bo'yicha EYKdan  $90^\circ$  burchakka kechikadi. Shu sababli, tok maksimal qiymatiga faqat EYK maksimal qiymatiga erishgan holatga nisbatan rotor  $90^\circ$  burchakka oldinga burilganda erishadi (11.5,b-rasm). Bunda yakor MYK rotor qutbining o'qi bo'ylab, qo'zg'atish MYK ga qrama-qarshi ta'sir etadi. Bunga biz yana vektor diagramma qurib iqrор bo'lamiz.

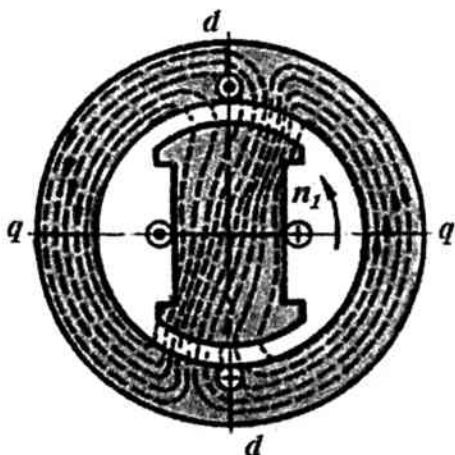
Stator MYKning bunday ta'siri mashinaning magnit maydonini kuchsizlantiradi. Demak, sinxron generatorda sof induktiv yuklanish bo'lganda, yakor reaksiyasi bo'ylama-magnitsizlovchi ta'sir etar ekan.

Aktiv yuklanishdagi yakor reaksiyasiga nisbatan, ko'rilyotgan holatda magnit maydon shakli buzilmaydi.

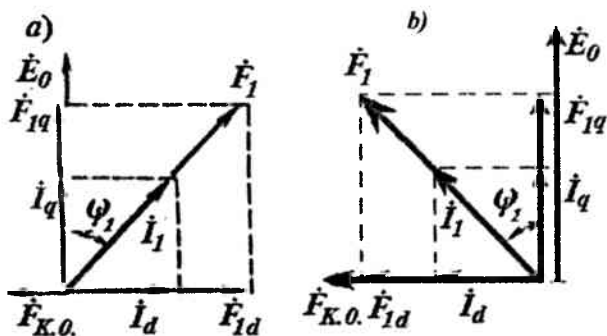
**Sig'imli yuklanish ( $\psi = -90^\circ$ ).** Sig'im yuklanishda stator toki  $i_1$  fazasi bo'yicha EYK  $\vec{E}_0$  dan  $90^\circ$  ildamlab ketishi sababli, o'zining maksimal qiymatiga EYKdan avval erishadi, ya'ni rotor 11.5,v-



rasmda keltirilgan holatga kelganda erishadi. Stator MYK, ilgari holatga o'xshash qutb o'qi bo'ylab yo'naltirilgan bo'lib, biroq endi qo'zg'atish MYK bilan mos yo'nalgan. Bunda qo'zg'atish MYKning kuchayishini ko'ramiz. Shunday qilib, sof sig'im yuklanishda sinxron generator yakor reaksiyasi bo'ylama-magnitlovchi bo'ladi. Bunda magnet maydon shakli buzilmaydi.



11.6-rasm. Aktiv yuklamali sinxron generatorning magnet maydoni



11.7-rasm. Aralash yuklanishdagi yakor reaksiyasi

**Aralash yuklanish.** Sinxron generator aralash yuklanganda stator toki  $i_1$  EYK  $\vec{E}_0$  ga nisbatan fazasi bo'yicha  $\psi_1$  burchakka siljigan bo'ladi. Siljish burchagi  $\psi_1$   $0 < \psi_1 < 90^\circ$  yoki  $-90^\circ < \psi_1 < 0$  bo'lishi mumkin. Aralash yuklanishda yakor reaksiyasining ta'sirini aniqlash uchun 11.7-rasmda keltirilgan diagrammadan foydalanamiz.

Aktiv-induktiv yuklanishda (11.7,a-rasm) MYK  $\cdot \vec{F}_1$  vektori  $\vec{E}_0$  vektoridan  $\psi_1$   $0 < \psi_1 < 90^\circ$  orqada qoladi. Vektor  $\vec{F}_1$  ni ikki tashkil etuvchiga ajratamiz: MYKning bo'ylama tashkil etuvchisi,  $F_{1d} = F_1 \sin \psi_1$  va MYKning ko'ndalang tashkil etuvchisi,  $F_{1q} = F_1 \cos \psi_1$ .

Shunga o'xshash MYKlarni aktiv-sig'im bo'lganda ham tashkil etuvchilarga ajratish mumkin (11.7,b-rasm). Stator MYKning ko'ndalang tashkil etuvchisi  $F_{1q}$ , ko'ndalang o'q bo'ylab yo'nalgan yakor reaksiyasi MYK, yuklanish tokining aktiv tashkil etuvchisiga proporsional  $I_q = I_1 \cos \psi$ , ya'ni

$$F_{1q} = F_1 \cos \psi_1, \quad (11.13)$$

stator MYKning bo'ylama tashkil etuvchisi  $F_{1d}$  esa bo'ylama o'q yakor reaksiyasini tasvirlaydi, uning miqdori yuklanish tokining reaktiv tashkil etuvchisiga proporsionaldir  $I_d = I_1 \sin \psi_1$ , ya'ni

$$F_{1d} = F_1 \sin \psi_1 \quad (11.14)$$

Bunda, agar yuklanish tokining reaktiv tashkil etuvchisi fazasi bo'yicha EYKdan orqada qolsa (yuklanish aktiv-induktiv), u holda MYK  $F_{1d}$  yakor reaksiyasi generatorni magnitsizlaydi, agar reaktiv tashkil etuvchi EYKdan ildamlab ketsa (aktiv-sig'im yuklanish), u holda MYK  $F_{1d}$  generatorni magnitlaydi.

MYK  $\vec{F}_{1d}$  vektorining yo'nalishi MYK  $\vec{F}_{K0}$  vektori yo'nalishiga nisbatan yakor reaksiyasi xarakteri bilan aniqlanadi. Bunda yakor reaksiyasi xarakteri esa yuklanish toki  $\vec{i}_1$  EYK  $\vec{E}_0$  dan fazasi bo'yicha orqada qoluvchi bo'lsa, magnitsizlovchi bo'ladi;  $\vec{i}_1$  EYK  $\vec{E}_0$  dan ilgari ketuvchi bo'lma, yakor reaksiyasi magnitlovchi bo'ladi.

**Misol 11.1.** Nominal quvvati 150 KВт, kuchlanishi 6,3 kV bo'lgan uch fazali sinxron generatorda statorming to'rt qutbli chulg'am ko'effitsiyenti  $k_{obl}=0,92$ , har bir fazada  $w_1 = 312$  ketma-ket ulangan o'ramlari bo'lganda, stator MYKning bo'ylama va ko'ndalang tashkil etuvchilarini aniqlang. Generator yuklanishi  $\cos \psi_1 = 0,8$  bo'lganda nominaldir.

**Yechish.** Yuklamishning nominal toki (11.6)dan

$$I_{1NOM} = S_{nom} / (U_{1nom}) = 150 / 6,3 = 13,76 \text{ A.}$$

Stator uch fazali chulg'ami MYKning maksimal qiymati (11.6)

$$F_1 = 1,35 I_1 w_1 k_{obl} / p = 1,35 \cdot 13,76 \cdot 312 \cdot 0,92 / 2 = 2666 \text{ A.}$$

Stator MYK ko'ndalang tashkil etuvchisi (11.13) dan

$$F_{1q} = F_1 \cos \psi_1 = 2666 \cdot 0,8 = 2133 \text{ A.}$$

Stator MYKning bo'ylama tashkil etuvchisi (11.14) dan

$$F_{1d} = F_1 \sin \psi_1 = 2666 \cdot 0,6 = 1600 \text{ A.}$$

Yakor reaksiyasi MYKning bo'ylama  $F_{1d}$  va ko'ndalang  $F_{1q}$  o'qlar bo'yicha tashkil etuvchilari sinxron mashina magnit o'zagida yakor reaksiyasi magnit oqimlarini hosil qiladi. Bu magnit oqimlar asosiy garmonikalari: bo'ylama o'qda

$$F_{1d} = F_{1d} / R_{md} = F_1 \sin \psi_1 / R_{md}; \quad (11.15)$$

ko'ndalang o'qda

$$F_{1q} = F_{1q} / R_{mq} = F_1 \cos \psi_1 / R_{mq}, \quad (11.16)$$

bunda  $R_{md}$  va  $R_{mq}$  – bo'ylama va ko'ndalang o'qlardagi asosiy garmonika magnit oqimlariga magnit qarshiliklar.

Noayon qutbli mashina stator magnit o'zagining ichki silindrik yuzasi uzunligida havo oralig'i ravon va o'zgarmas, shu sababli bo'ylama va ko'ndalang o'qlardagi magnit qarshiliklar teng ( $R_{md} = R_{mq} = R_m$ ).

Yakor reaksiyasi magnit oqimlari stator chulg'amlarini kesib o'tib, shu chulg'amda yakor reaksiyasi EYKni induktivlaydi

$$\text{bo'ylama o'qda} \quad \dot{E}_{1d} = -j\dot{I}_d x_a = -j\dot{I}_1 x_a \cdot \sin \psi_1; \quad (11.17)$$

$$\text{ko'ndalang o'qda} \quad \dot{E}_{1q} = -j\dot{I}_q x_a = -j\dot{I}_1 x_a \cdot \cos \psi_1, \quad (11.18)$$

bunda  $x_a$  – yakor reaksiyasi induktivlik qarshiligi. U stator chulg'amining bosh induktiv qarshiligini aniqlaydi va Om bilan o'lchanadi.

$$x_a = 2,5 \cdot 10^{-6} m_1 f_1 \frac{D_1 l_1}{\delta \cdot k_s \cdot k_\mu} \cdot \left( \frac{w_1 \cdot k_{o\phi 1}}{p} \right)^2. \quad (11.19)$$

bunda  $D_1$  - stator magnit o'zagining ichki diametri, m;  $l_1$  - stator magnit o'zagining hisobiy uzunligi, m;  $\delta$  - havo oralig'i, m.

Ayon qutbli sinxron mashinalarda bo'ylama va ko'ndalang o'qlardagi yakor reaksiyasi magnit maydonlarining asosiy garmonikalariga bo'lgan magnit qarshiligi bir xil bo'lmaydi ( $R_{mq} > R_{md}$ )

$$R_{md} = R_m / k_d, \quad (11.20)$$

$$R_{mq} = R_m / k_q, \quad (11.21)$$

bunda  $R_m$  – stator magnit o'zagi perimetri bo'ylab havo oralig'i o'zgarmas bo'lgandagi mashinaning magnit qarshiligi.

Ushbu vaziyat yakor reaksiyasi magnit oqimlari qiymatlariga ta'sir etadi, demak, yakor reaksiyasi EYKga ham ta'sir etadi. Bunday ta'sir miqdori shakl koeffitsiyentlari orqali ifodalanadi.

$$\dot{E}_{1d} = -j\dot{I}_d \cdot x_a \cdot k_d = -j\dot{I}_1 \cdot x_{ad} \cdot \sin \psi_1; \quad (11.22)$$

$$\dot{E}_{1q} = -j\dot{I}_q \cdot x_a \cdot k_q = -j\dot{I}_1 x_{aq} \cdot \cos \psi_1. \quad (11.23)$$

bunda  $x_{ad}$  va  $x_{aq}$  – ayon qutbli mashinaning yakor reaksiyasi induktiv qarshiligi:

$$\text{bo'ylama o'qda} \quad x_{ad} = x_a k_d \quad (11-24)$$

$$\text{ko'ndalang o'qda} \quad x_{aq} = x_a k_q. \quad (11.25)$$

#### 11.4. Sinxron generator kuchlanishlar tenglamalari

Yuklanish bilan ishlayotgan generatorning chiqish klemmalaridagi kuchlanish, uning yuksiz ishlash rejimidagi kuchlanishdan farqlidir. Bu birnecha sabablarga ega: kuchlanishning qiymatiga yakor reaksiyasi ta'siri, tarqoq magnit maydonlari, stator chulg'ami aktiv qarshiliklaridagi kuchlanishlar pasayuvi.

Yuqorida keltirganimizdek, yuklangan sinxron mashinasi ishlaganda, unda birnecha MYKlar hosil bo'ladi. ular o'zaro ta'sir etib, natijaviy magnit maydon hosil qiladilar. Biroq, sinxron generator kuchlanishiga ta'sir etuvchi omillarni tahlil qilishda, shartli ravishda shunday faraz qabul qilamizki, unga ko'ra, generatorning har bir MYKlari alohida o'zining xususiy magnit maydonlarini hosil qiladi.

Ammo, shuni ta'kidlash zarurki, qabul qilingan bunday faraz, mashinadagi jarayonlarning fizik mohiyati mos kelmaydi, chunki berilgan bitta magnit tizimda faqatgini bitta - natijaviy magnit maydon hosil bo'ladi. Biroq, ushbu holatda, magnit maydonlarining mustaqilligi haqidagi faraz, sinxron generatori ishiga barcha omillarning ta'sirlarini tushunishga yordam beradi.

Shunday qilib, ayon qutbli sinxron generator ishlash rejimiga magnit yurituvchi kuchlarning ta'siri qanday ekanligini aniqlaymiz.

1. Qo'zg'atish chulg'ami MYK  $F_{k0}$  qo'zg'atish magnit oqimi  $\Phi_0$  ni hosil qiladi. U, o'z navbatida, stator chulg'ami bilan ilashib, unda generatorning asosiy EYK  $E_0$  ni induktivlaydi.

2. Yakor reaksiyasining bo'ylama o'qdagi  $F_{1d}$  MYKi magnit maydon  $F_{1d}$  ni hosil qiladi, u o'z navbatida, stator chulg'amida yakor reaksiyasi EYK  $E_{1d}$  ni induktivlaydi (11.22). Uning qiymati yakor reaksiyasining bo'ylama o'q induktiv qarshiligi  $x_{ad}$  ga proporsional. Bu qarshilik bo'ylama o'q yakor reaksiyasining sinxron generator ishiga ta'siri darajasini xarakterlaydi. Masalan, mashinaning magnit tizimi to'yinganda yakor reaksiyasi magnit oqimi  $F_{1d}$ , to'yinmagan

magnit tizimdagiga nisbatan kichik bo'lad. Bu holat shunday tushuniladi,  $F_{1d}$  magnit oqim, ko'proq magnit o'zakning po'latli qismidan o'tib, nisbatan kichik havo oralig'ini (11.3,*a*-rasm) ham kechib o'tadi, shu sababli magnit to'yinishida bu oqimga qarshilik sezilarli ortadi. Bunda,  $x_{1d}$  induktiv qarshilik kamayadi.

3. Yakor reaksiyasining ko'ndalang o'qdagi  $F_{1q}$  MYKi magnit maydon  $F_{1q}$  ni hosil qiladi, u o'z navbatida, stator chulg'amida yakor reaksiyasi EYK  $E_{1q}$  ni induktivlaydi (11.23). Uning qiymati yakor reaksiyasining ko'ndalang o'q induktiv qarshiligi  $x_{aq}$  ga proporsional.

Qarshilik  $x_{aq}$  mashina magnit tizimining to'yinishiga bog'liq emas, chunki ayon qutbli rotorda magnit oqim  $F_{1q}$  asosan qutblar aro havo oralig'idan o'tadi (11.3,*b*-rasm).

4. Stator chulg'amining tarqoq magnit oqimi  $F_{\sigma 1}$  (11.4-rasm) stator chulg'amida tarqoq  $E_{\sigma 1}$  EYK induktivlaydi, uning qiymati induktiv qarshilik  $x_1$  ga proporsional.

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 \cdot x_1. \quad (11.26)$$

5. Stator chulg'amidagi tok  $I_1$  stator faza chulg'ami aktiv qarshiligi  $r_1$  da aktiv kuchlanishlar pasayuvini hosil qiladi

$$\dot{U}_{a1} = \dot{I}_1 \cdot r_1. \quad (11.27)$$

Stator chulg'amida hosil qilingan barcha EYKlarning geometrik yig'indisi, sinxron generatori chiqish klemmalaridagi kuchlanishni ifodalaydi.

$$\dot{U}_1 = \sum \dot{E} - \dot{I}_1 \cdot r_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{1q} + \dot{E}_{\sigma 1} - \dot{I}_1 r_1. \quad (11-28)$$

Bunda  $\sum \dot{E}$ -barcha MYKlar ( $F_{k0}$ ,  $F_{1d}$ ,  $F_{1q}$ ) ta'sirlari natijasida hosil qilingan magnit maydonlari va stator tarqoq magnit  $F_{\sigma 1}$  maydoni hosil qilgan natijaviy magnit maydon induktivlagan barcha EYKlar geometrik yig'indisi.

O'rta va katta quvvatli sinxron mashinalari faza chulg'amlarining aktiv qarshiliklari kichik miqdor, shu sababli, nominal yuklanishda ham kuchlanishlar pasayuvi  $I_1 r_1$  juda kichik miqdorni tashkil etadi va

uni nolga  $I_1 r_1 = 0$  teng, deb faraz qilish mumkin. Bunday holatda (11.28) ifodani quyidagicha yozish mumkin.

$$\dot{U}_1 \approx \sum \dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{1q} + \dot{E}_{\sigma 1}. \quad (11.29)$$

Ifodalar (11.28) va (11.29) ayon qutbli sinxron generatorning kuchlanishlar tenglamalari deyiladi.

Noayon qutbli sinxron generatorlarda yakor reaksiyasi statorning to'liq MYK  $F_1$  bilan xarakterlanadi. Statorning to'liq MYK  $F_1$  tashkil etuvchilarga ajratilmaydi, chunki bunday mashinalarda bo'ylama va ko'ndalang o'qlar bo'yicha magnit qarshiliklar teng. Shu sababli, noayon qutbli sinxron mashinada stator EYK  $E_1$  stator chulg'amidagi induktiv kuchlanishlar pasayuviga teng va yakor reaksiyasi induktiv qarshiligi  $x_a$  ga proporsional bo'ladi [(11.19)ga qarang], ya'ni

$$\dot{E}_1 = -jI_1 x_a. \quad (11.30)$$

Yakor reaksiyasi magnit oqimi  $F_1$  va statorning tarqoq magnit oqimi  $F_{\sigma 1}$  bir tok  $I_1$  bilan hosil qilinadi [(11.26) va (11.30) larni solishtiring], shu sababli induktiv qarshiliklar  $x_a$  va  $x_l$  ni noayon qutbli sinxron mashinaning induktiv qarshiligi sifatida ko'rish mumkin

$$x_s = x_a + x_l.$$

Bularni e'tiborga olib, yakor reaksiyasi EYK va tarqoq EYK  $E_{\sigma 1}$  larni ayon qutbli sinxron mashinasining EYKlar yig'indisi, deb qarash mumkin

$$\dot{E}_c = \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = -jI_1 x_a + (-jI_1 x_l) = -jI_1 x_c, \quad (11.31)$$

Yuqoridagilarni e'tiborga olib, noayon qutbli sinxron generatorning kuchlanishlar tenglamasini quyidagicha yozish mumkin.

$$\dot{U}_1 = \sum \dot{E} - \dot{I}_1 \cdot r_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_c - \dot{I}_1 r_1 \quad (11.32)$$

yoki

$$\dot{U} \approx \sum \dot{E}_0 = \dot{E}_0 + \dot{E}_c. \quad (11.33)$$

### 11.5. Sinxron generator vektor diagrammalari

Yuqorida keltirib chiqarilgan tenglama (11.28)dan foydalanib, aktiv-induktiv yuklanishga ishlayotgan ayon qutbli sinxron generatorning vektor diagrammasini quramiz (stator toki EYK  $\dot{E}_0$  dan kechikayapti). Vektor diagrammani quyida berilgan qiymatlar asosida quramiz: generator YU.i.rejimidagi EYK  $\dot{E}_0$ ; yuklanish toki  $\dot{I}_1$  va uning EYK  $\dot{E}_0$  ga nisbatan faza siljishi burchagi  $\psi_1$ ; yakor reaksiyasi bo'ylama  $x_{ad}$  va ko'ndalang  $x_{aq}$  induktivlik qarshiliklari; stator chulg'ami fazasining aktiv qarshiligi  $r_1$ .

Generator simmetrik yuklanishli bo'lganda diagrammani faqat bir faza uchun quriladi.

Vektor diagrammani qurish tartibini ko'raylik (11.8,*a*-rasm). Ixtiyoriy yo'nalishda EYK  $\dot{E}_0$  vektorini quramiz va unga  $\psi_1$  burchak ostida tok vektori  $\dot{I}_1$  ni quramiz. Tok  $\dot{I}_1$  ni tashkil etuvchilarga ajratamiz: reaktiv  $\dot{I}_d = \dot{I}_1 \sin \psi_1$  va aktiv  $\dot{I}_q = \dot{I}_1 \cos \psi_1$ . EYK  $\dot{E}_0$  vektorining uchidan quyidagi EYK vektorlarini chizamiz  $\dot{E}_{1d} = -j\dot{I}_d x_{ad}$ ,  $\dot{E}_{1q} = -j\dot{I}_q x_{aq}$ ,  $\dot{E}_{s1} = -j\dot{I}_1 x_1$ ,  $\dot{U}_{a1} = -\dot{I}_1 r_1$ .

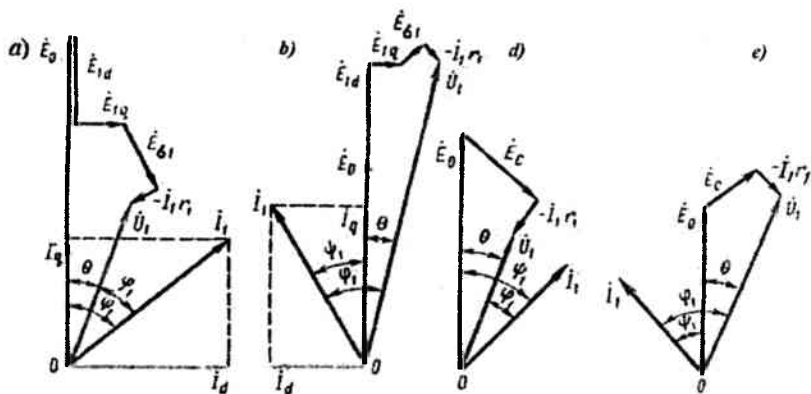
Vektor  $\dot{U}_{a1}$  ning uchini koordinata boshi O nuqtasi bilan birlashtirib, stator kuchlanishi  $\dot{U}_1$  vektorini hosil qilamiz. Uning qiymati EYKlar vektorlarining geometrik yig'indisiga teng (11.28).

Aktiv-sig'im yuklanish (stator chulg'ami toki  $\dot{I}_1$  EYK  $E_0$  vektoridan ilgarilab ketadi) bilan ishlayotgan generatorning diagrammasini chizishda  $\dot{I}_1$  vektorni  $E_0$  vektorning chap tomoniga  $\psi_1$  burchak ostida quriladi (11.8,*b*-rasm),  $\dot{E}_{1d}$  vektorning yo'nalishi esa  $E_0$  vektori yo'nalishi bo'ylab quriladi, chunki sig'im xarakterli yuklama bo'lganda yakor reaksiyasi magnitlovchi bo'ladi. Vektor diagramma qurishdagi qolgan barcha tartib ilgarigidek qoladi.

Noayon qutbli sinxron generator vektor diagrammasini qurishda (11.32) tenglamadan foydalanamiz, bunda  $\dot{E}_0$  vektorini tok vektori  $\dot{I}_1$  ga nisbatan  $\psi_1$  burchak ostida chiziladi (11.8,*d*-rasm).



Shuni ta'kidlash zarurki, qurilgan vektor diagrammalar magnit zanjir to'yinganligini inobatga olmaydi, shu sababli hodisalarning sifat jihatlari aks ettiriladi. Biroq, bu diagrammalar quyidagi xulosalar qilish imkonini beradi: yuklangan generator kuchlanishining o'zgarishiga ta'sir etuvchi asosiy omil, EYK  $\dot{E}_{ad}$  ni induktivlovchi yakor magnit oqimining bo'ylama tashkil etuvchisidir; generator aktiv-induktiv yuklash bilan ishlaganda, ya'ni EYK  $\dot{E}_0$  dan kechikuvchi  $\dot{I}_1$  tok bilan ishlaganda, stator chulg'ami klemmalaridagi kuchlanish  $\dot{U}_1$ , yuklanish ortishi bilan kamayadi, bu yakor reaksiyasining magnitsizlovchi ta'siri bilan tushuntiriladi.



**11.8-rasm.** Ayon (*a,b*) va noayon (*d,e*) qutbli sinxron generatorlar vektor diagrammalari: (*a,b*) - aktiv-induktiv yuklama; (*b,d*) aktiv-sig'im

Generator aktiv-sig'im yuklanish bilan ishlaganda (stator toki  $\dot{I}_1$  EDS  $\dot{E}_0$  dan fazasi bilan oldinda) yuklanish ortishi bilan yakor reaksiyasining magnitlovchi xususiyati sababli, kuchlanish  $\dot{U}_1$  ortadi (11.8.g-rasm).

### 11.6. Sinxron generator tavsiflari

Sinxron generator xususiyatlari yuksiz ishlash, qisqa tutashuv, tashqi va rostlovchi tavsiflari bilan ifodalanadi.

**Yuksiz ishlash tavsifi.** YU.i. rejimidagi generator  $n_1=const$  bo'lganda chiqish klemmalari kuchlanishining  $U_1 = E_0$  qo'zg'atish toki  $I_{V.0}$  ga bog'liqligini ifodalaydi. Sinxron generator YU.i.tavsifini olish uchun bajariladigan tajriba sxemasi 11.9,*a*-rasmda keltirilgan. Agar har hil sinxron generatorlarning YU.i.tavsiflarini nisbiy birlikda ifodalansa  $E^*=f(I_V^*)$ , u holda bu tavsiflar bir-biridan juda kam farqlanadilar va sinxron mashinalarni hisoblashda qo'llaniladigan YU.i.normal tavsifi (11.9,*b*-rasm) bilan juda o'xshash bo'ladi.

### Yuksiz ishlash normal tavsifi

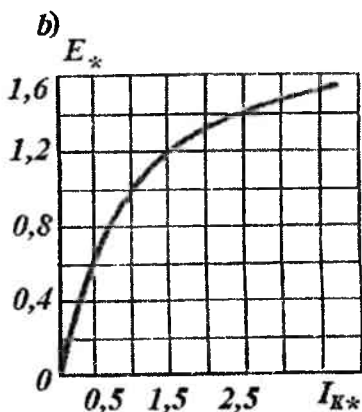
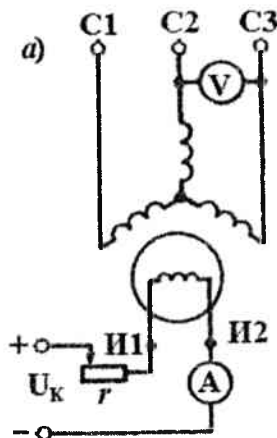
11.1-jadval

$E_0$	0,58	1,0	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51
$I_V$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5

bunda  $E^*=E_0/U_{1nom}$  – stator chulg'ami fazasining nisbiy EYKi;

$I_V^*=I_{K.0}/I_{K.0nom}$  – nisbiy qo'zg'atish toki;  $I_{V.0nom}$  – YU.i.rejimidagi

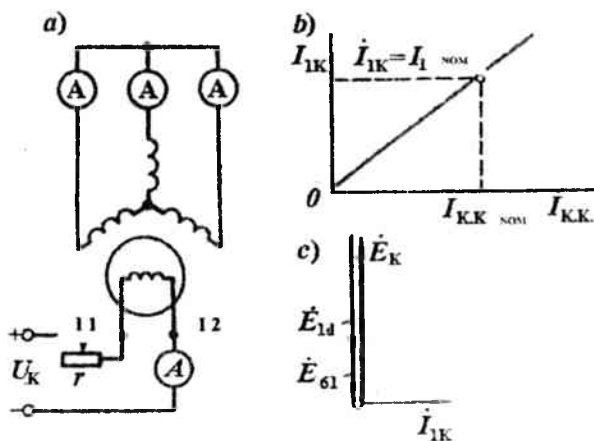
$E_0=U_{1nom}$  ga mos keluvchi qo'zg'atish toki.



11.9-rasm. Sinxron generatori yuksiz ishlash tajribasi

**Qisqa tutashuv tavsifi.** Uch fazali q.t. tavsifini quyidagi tartibda olinadi: stator chulg'amlari klemmalari qisqa tutashtiriladi (11.10,*a*-

rasm) va rotor  $n_1$  tezlik bilan aylanganda qo'zg'atish toki stator nominal  $I_{1nom}$  toki miqdorining 25% ( $I_{1k} = 1.25 I_{1nom}$ ) gacha asta oshiriladi.



11.10-rasm. Sinxron generator qisqa tutashuv tajribasi

Bunda stator EYK miqdori nominal rejimdagi EYKdan bir necha marta kichik bo'lganligi sababli va, demak, asosiy magnit oqimi kichikligi uchun, mashinaning magnit zanjiri to'yinmagan bo'ladi. Shu sababli q.t. tavsifi to'g'ri chiziqni tasvirlaydi (ris. 11.10,*b*-rasm).

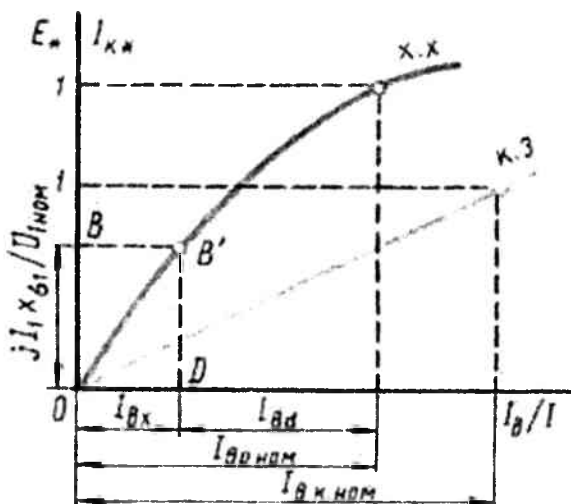
Stator chulg'aming aktiv qarshiligi induktiv qarshilikka nisbatan kichik, shu sababli,  $r_1 \approx 0$  deb qabul qilib, q.t. tajribasida sinxron generator yuklanish xarakteri (o'zining chulg'amlari hisobiga) sof induktiv, deb hisoblash mumkin. Bundan shunday xulosa chiqadiki, sinxron generatorining q.t. tajribasida yakor reaksiyasi bo'yлама-magnitsizlovchi xarakterga ega ekan.

Generator uchun uch fazali q.t. tajribasi vektor diagrammasi 11.10,*d*-rasmda keltirilgan. Diagrammadan ko'rinadiki, stator chulg'amida induktivlanayotgan EYK  $\dot{E}_k$ , yakor reaksiyasining bo'yлама EYK  $\dot{E}_{1d} = -j\dot{I}_d x_{od}$  ni va tarqoq EYK  $\dot{E}_{\sigma l} = -j\dot{I}_l x_l$  ni butkul muvozanatlaydi

$$\dot{E}_k = \dot{E}_d + \dot{E}_{\sigma l}$$

Bunda, hayolan, qo'zg'atish chulg'amining MYK ikki tashkil etuvchiga ega deb hisoblaymiz: bir tashkil etuvchisi kuchlanishlar pasayuqini kompensatsiyalaydi, ikkinchisi yakor reaksiyasining magnitsizlovchi ta'sirini kompensatsiyalaydi.

Q.t. va YU.i.tavsiflari qo'zg'atish MYKning ushbu ikki tashkil etuvchilarini aniqlash imkonini beradi. Shu maqsadda, q.t. va YU.i.tavsiflari bir koordinata tekisligida quriladi (11.11-rasm), bunda ordinata o'qiga YU.i.kuchlanishi  $E^* = E_0 / U_{1nom}$  va q.t. toklarining nisbiy qiymatlarini qo'yamiz. Buning uchun ordinata o'qida kuchlanish masshtabda tarqoq EYK  $\dot{E}_{\sigma 1^*} = -j\dot{I}_1 x_1 / U_{1nom}$  ni ifodalovchi *OV* kesmani qo'yamiz.



11.11-rasm. Q.t. toki tashkil etuvchilarini aniqlash

So'ngra *V* nuqtani YU.i.tavsiflga tushiramiz (*B'* nuqta) va absissa o'qiga *B'D* perpendikulyarni tushiramiz. Hosil qilingan *D* nuqta qo'zg'atish toki  $I_{Q.0.NOM}$  ni ikki qismga ajratadi:  $j\dot{I}_1 x_1$  -kuchlanish pasayuqini kompensatsiyalash uchun zarur bo'lgan qo'zg'atish  $\dot{I}_{\infty}$  toki va yakor reaksiyasining bo'ylama-magnitsizlovchi tashkil etuvchisini kompensatsiyalovchi qo'zg'atish  $\dot{I}_{K.d}$  toki.

Sinxron mashinaning asosiy parametrlaridan hiri – qisqa tutashuv nisbati (QTN) hisoblanadi. QTN deb, YU.i.rejimida nominal kuchlanishga mos kelgan qo‘zg‘atish  $I_{K 0.NOM}$  tokining, stator toki nominal qiymatining q.t. tajribasida mos kelgan qo‘zg‘atish tokiga nisbatiga aytiladi (11.10-rasm).

$$QTT = I_{K 0.NOM} / I_{K.K.NOM} . \quad (11.34)$$

Turbogeneratorlar uchun  $QTN = 0,4 - 0,7$ ; gidrogeneratorlar uchun  $QTN = 1,0 - 1,4$ .

QTN sinxron generatorlarning xususiyatlarini baholashda katta amaliy ahamiyatga ega: kichik QTNli mashinalar generator parallel ishlash rejimida turg‘unligi kam bo‘ladi, yuklanish darajasi o‘zgarganda, kuchlanish tebranishi katta bo‘ladi, ammo bunday mashinalarning gabarit o‘lchamlari kichik, demak, katta QTNli mashinalardan arzonroq bo‘ladi.

**Tashqi tavsif.** Tashqi tavsif deb, stator chulg‘amlari klemmalaridagi kuchlanishning, o‘zgarmas qo‘zg‘atish toki  $I_K = \text{const}$ ; quvvat koeffitsiyenti  $\text{sos}\varphi_1 = \text{const}$  va aylanish tezligi  $n_1 = n_{\text{nom}} = \text{const}$  bo‘lgandagi yuklanish (stator) tokiga  $U_1 = f(I_1)$  bilan bog‘liqligiga aytiladi.

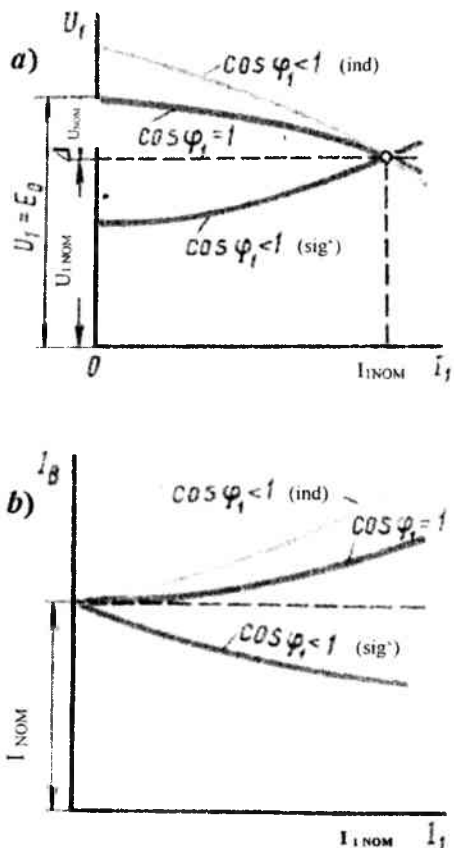
Quyida 11.12,*a*-rasmدا sinxron generatori har xil xarakterdagi yuklamalari uchun tashqi tavsiflari keltirilgan.

Aktiv yuklanish ( $\text{sos}\varphi_1 = 1,0$ ) bo‘lganda yuklanish  $I_1$  tokining kamayishi natijasida kuchlanish  $U_1$  ning ortishini ko‘rish mumkin; bu hodisa stator chulg‘amida kuchlanishlar pasayuvi kamayishi va yakor reaksiyasi ko‘ndalang o‘q bo‘ylab magnitsizlovchi ta’siri susayishidandir. Induktiv yuklanish qiymati ( $\text{cos}\varphi_1 < 1$ ; ind.) kamayganda kuchlanish  $U_1$  ortishining jadalligi seziladi, chunki tok  $I_1$  kamayishi bilan yakor reaksiyasi bo‘ylama o‘q tashkil etuvchisi magnitsizlovchi ta’siri susayadi.

Biroq, generatorda sig‘imli yuklanish ( $\text{cos}\varphi_1 < 1$ ; sig‘im) bo‘lgan holatda  $I_1$  ning kamayishi, kuchlanish  $U_1$  ning kamayishi bilan kuza-tiladi. Bunga sabab, yakor reaksiyasi bo‘ylama tashkil etuvchisining ta’siri susayishi bilan tushuntiriladi.

Sinxron generatori qo'zg'atish toki  $I_k = const$  va rotor aylanish tezligi  $n_1 = const$  o'zgarmas bo'lganda nominal "yuklanish tashlanishi" (yuklanishni nolgacha tushirilishi), kuchlanishning nominal o'zgarishi deyiladi (%):

$$\Delta U_{NOM} = \frac{E_0 - U_{1NOM}}{U_{1NOM}} \cdot 100. \quad (11.35)$$



11.12-rasm. Tashqi (a) va rostlovchi (b) tavsiflari

Generator yuklanishi sig'ım xarakterli bo'lsa, "yuklanish tashlanishi" kuchlanishning kamayishiga olib keladi, shu sababli  $\Delta U_{1nom}$  ning qiymati manfiy bo'ladi.

Sinxron generatorni ekspluatatsiya qilish jarayonida yuklanishning tebranishi bilan  $U_1$  kuchlanishning qiymati tez ta'sir etuvchi avtomatik rostlagichlar yordamida o'zgarmas holatida ushlab turiladi. Biroq, chulg'amlar izolyatsiyasining buzilishini oldini olib,  $\Delta U_{nom}$  ning qiymatini 50% dan oshirish tavsiya etilmaydi.

**Rostlash tavsifi.** Ushbu tavsif generator yuklanishi o'zgarish jarayonida stator chulg'ami kuchlanishini o'zgarmas (nominalga teng) saqlash uchun qo'zg'atish chulg'ami tokini qanday o'zgartirish lozim ekanligini ko'rsatadi

$$I_k = f(I_1),$$

bunda  $U_1 = U_{1nom} = const$ ;  $n_1 = n_{nom} = const$  va  $\cos\varphi_1 = const$ . 11.12, b-rasmda ginxron generatorning rostlash tavsiflari keltirilgan. Aktiv yuklanish bo'lganda ( $\cos\varphi_1 = 1$ ), yuklanish toki  $I_1$  ning ortishi kuchlanish  $U_1$  ning kamayishiga olib keladi, shuning uchun yuklanish toki  $I_1$  ortishi bilan kuchlanishni o'zgarmas holatda saqlash uchun, qo'zg'atish tokini oshirish zarur. Yuklanishning induktiv xarakteri ( $\cos\varphi_1 < 1$ , ind.) kuchlanish  $U_1$  ning yanada keskin pasayishiga olib keladi (11.12, a-rasm), shu sababli  $U_1 = U_{1nom}$  saqlash uchun, qo'zg'atish tokini  $I_k$  yanada keskin oshirish zarur bo'ladi. Sig'ım yuklanishi bo'lganda ( $\cos\varphi_1 < 1$ , sig'ım) yuklanishning ortishli kuchlanish  $U_1$  ning ortishiga olib keladi, shuning uchun  $U_1 = U_{1nom}$  saqlash uchun qo'zg'atish tokini kamaytirish zarur.

## 11.7. Sinxron generator EYKning amaliy diagrammasi

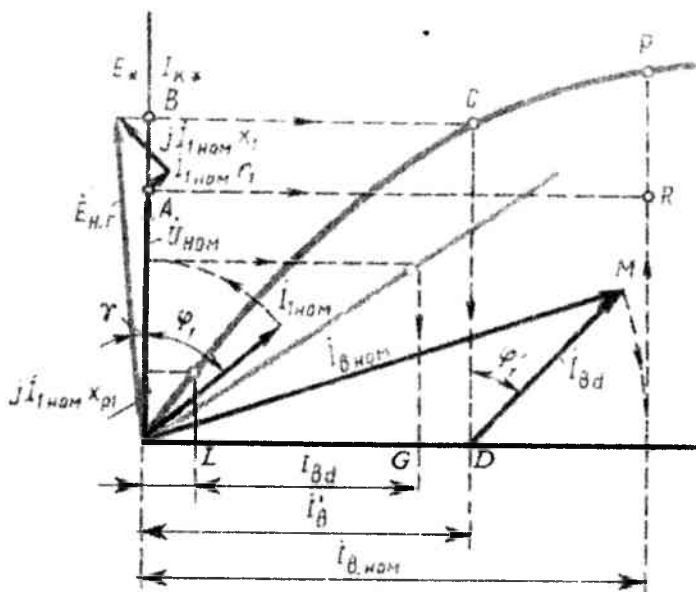
Sinxron generatorning nominal yuklanish tashlanishidagi kuchlanish o'zgarishi  $\Delta U_{nom}$  ni grafik yordamida – EYKning amaliy diagrammasini qurib aniqlash mumkin. Faraz qilaylik, sinxron generator nominal rejimda ishlayapti, so'ngra yuklanish butkul tashlandi, ammo rotor aylanish tezligi va qo'zg'atish toki o'zgarmadi, deb.

Yuklanish tashlanishidan so'ng generator kuchlanishi  $\Delta U_{nom}$  qiymatga ortadi. Bu qiymatni aniqlash uchun quyidagilarni bajaramiz

(11.13-rasm): bitta koordinata tizimida yuksiz ishlash va qisqa tutashuv tavsiflarini quramiz.

So'ngra ordinata o'qida  $\varphi_1$  burchak ostida  $OA = \dot{U}_{1NOM}$  vektorni quramiz, OA vektoriga esa  $I_{1NOM}$  tok vektorini chizamiz. Kuchlanish vektori  $U_{1nom}$  ga kuchlanishlar pasayuvi  $\dot{I}_{1NOM} \cdot r_1$  va  $j\dot{I}_{1NOM} \cdot x_1$  ni qo'shib, yuklanish bilan ishlayotgan generatorning EYKni aniqlaymiz.

$$\dot{E}_{n.g} = \dot{U}_{1NOM} + \dot{I}_{1NOM} \cdot r_1 + j\dot{I}_{1NOM} \cdot x_1. \quad (11.36)$$



11.13-rasm. EYKning amaliy diagrammasi

$V$  nuqtani YU.i.tavsifiga o'tkazib ( $S$  nuqtasi),  $SD$  ordinatani o'tkazamiz. Absissa o'qida hosil bo'lgan  $OD$  kesma yuklangan generatorning EYK  $\dot{E}_{n.g}$  hosil qilish uchun zarur bo'lgan qo'zg'atish toki  $I'_b$  ni ifodalaydi. Ammo, generator yuklanishsiz ishlaganda uning EYK  $E_0$  ning miqdori EYK  $E_{n.g}$  dan bo'ylama yakor reaksiyasi EYK  $E_{1d}$  miqdorida kattaroqdir, ya'ni



$$\dot{E}_0 = \dot{E}_{NG} + \dot{E}_{1d}.$$

EYK  $\dot{E}_{1d}$  hisoblash uchun yakor reaksiyasi bo'ylama-magnitsizlovchi ta'siriga mos bo'lgan qo'zg'atish tokimi  $i_{Bd}$  aniqlaymiz.

Zaruriy grafik qurishlarni bajarib,  $i_{Bd} = LG$  ni aniqlaymiz (11.13-rasm). So'ngra  $D$  nuqtadan  $CD$  kusmaga nisbatan  $\varphi'_1 = \varphi_1 + \gamma$  burchak ostida  $DM = i_{Bd}$  vektorni o'tkazamiz.  $O$  markazdan  $OM$  radius bilan absissa o'qi bilan  $N$  nuqtada kesishguncha yoy chizamiz. Bunda  $ON = i_{B.NOM}$  - EYK  $\dot{E}_0 = NP$  ga mos keluvchi qo'zg'atish toki.  $A$  nuqtadan absissa o'qiga parallel  $AR$  chiziq o'tkazib, quyidagini hosil qilamiz

$$\Delta U_{NOM} = \frac{NP - NR}{NR} \cdot 100 = \frac{E_0 - U_{1NOM}}{U_{1NOM}} \cdot 100.$$

**11.2-Misol.** Uch fazali sinxron generator uchun amaliy diagramma quring va yuklanish tashlanishida kuchlanish o'zgarishini aniqlang. Generator quyidagi qiymatlari berilgan:

$P_{nom} = 500$  KWt;  $U_{nom} = 230$  V;  $\cos\varphi_1 = 0,8$ ;  $x_1 = 0,04$  Om;  $r_1 = 0,0015$  Om; KTN - 1,4; YU.i.tavsifi (§11.6ga qarang), stator chulg'am yulduzcha ulangan.

**Yechish.** Q.t. tavsifini qurish uchun yuklanishning nominal tokiga mos kelgan qo'zg'atish tokining  $I^*_{K.K.NOM}$  nisbiy qiymatini aniqlaymiz. Ifoda (11.34)dan quyidagini hisoblaymiz  $I_{K.K.NOM} / I_{K.O.NOM} = 1 / QTN = 1 / 1,4 = 0,715$

Generator nominal toki  $I_{1nom} = 905$  A.

Aktiv kuchlanishlar pasayuvi

$$I_{1nom} \cdot r_1 = 905 \cdot 0,0015 = 1,36$$
 V

Induktiv kuchlanishlar pasayuvi

$$I_{1nom} \cdot j x_1 = 905 \cdot j 0,04 = j36,2$$
 V

Hisoblangan qiymatlarni nisbiy birlikda ifodalaymiz:

$$I_{1nom} \cdot r_1 / U_{1nom} = 1,36 / 230 = 0,0059; I_{1nom} \cdot j x_1 / U_{1nom} = 36,2 / 230 = j0,157$$

Induktiv kuchlanishlar pasayuvi aktiv kuchlanishlar pasayuidan  $0,157/0,0059=26$  marta katta bo'lgani uchun, aktiv kuchlanishlar pasayuvini e'tiborga olmay hisoblaymiz. Kuchlanish va tok orasidagi faza siljish burchagi  $\varphi_1 = \arccos 0,8 = 37^\circ$ .

Yuqorida keltirilgan tartibda qurib, amaliy EYK diagrammasini hosil qilamiz (11.14-rasm). Undan yuklanish tashlanishida kuchlanishning o'zgarishi quyidagicha bo'ladi:

$$\Delta U_{\text{nom}} = 28\%$$

Diagrammadagi (11-14-rasm) barcha qurilishlar nisbiy birlikda bajarilgan.

### 11.8. Sinxron mashinalar quvvat isroflari

Sinxron mashinada energiya o'zgartirilishi uning o'zida ham energiya isrof bilan kechadi. Sinxron mashinadagi barcha energiya isroflari asosiy va qo'shimcha isroflarga ajratiladi.

Sinxron mashinadagi asosiy isroflar stator chulg'amidagi elektr isroflari, qo'zg'atish isroflari, magnit isroflari va mexanik isroflardan iborat.

Stator chulg'amidagi elektr isroflari (Wt)

$$P_{el} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1, \quad (11.37)$$

bunda  $r_1$  – chulg'amning hisobiy haroratida, stator chulg'ami bir fazasining aktiv qarshiligi, Om.

Qo'zg'otish isroflari (Wt):

a) alohida qo'zg'atkich uskunasi bo'lganda

$$P_K = I_K^2 \cdot r_K + \Delta U_{sh} \cdot I_K \quad (11.38)$$

bunda  $r_K$  – chulg'amning ishchi haroratida, qo'zg'atish chulg'amining aktiv qarshiligi, Om;  $\Delta U_{sh} = 2$  V – cho'tkalardagi elektr quvvat isroflari;

b) qo'zg'atish chulg'ami sinxron mashinaning vali bilan ulangan o'zgarimas tok generatoridan (qo'zg'atkich) energiya olsa,

$$P_v = (I_v^2 \cdot r_v + \Delta U_{\text{um}} \cdot I_v) / \eta_v. \quad (11.39)$$

bunda  $\eta_v = 0,80 \div 0,85$  - qo'zg'atkich F.I.K.

Sinxron mashinaning magnit isroflari stator chulg'amlarida sodir bo'ladi va aylanuvchi magnit maydon bilan qayta magnitlanadi. Bu isroflar gisterezis  $r_g$  va uyurma tok  $r_{u1}$  isroflaridan iborat.

$$p_m = p_g + p_{v.1}. \quad (11.40)$$

Mexanik isroflar (Wt) podshipniklardagi ishqalanish va ventilyatsiya (o'z-o'zini ventilyatsiyalashda) isroflaridan iborat

$$P_{Mex} \approx 3,68 p \frac{v_2}{40} \sqrt[3]{10^3 l_1} \quad (11.41)$$

bunda

$$v_2 = \pi(D_1 - 2\delta)n_1 / 60 \quad (11.42)$$

- rotor qutblari uchliklarining yuzasi aylanish tezligi, m/s;  $l_1$  - stator magnit o'zagining konstruktiv uzunligi, mm.

Sinxron mashinalarida qo'shimcha isroflar ikki turga bo'linadi: rotor qutb uchliklaridagi pulslanuvchi isroflar va yuklanishdagi isroflar.

Rotor qutb uchliklaridagi pulslanuvchi isroflar  $p_p$  stator ichki silindrik yuzasining tishli bo'lishi tufayli havo oralig'idagi induksiya pulslanishidan hosil bo'ladi. Bu isroflaning qiymatlari (Wt)

$$p_{II} = k_{II} p b_p l_1 (10^{-4} Z_1 n_1)^{1,5} [B_{\delta} (k_{\delta} - 1) l_1]^2 \cdot 10^{-6}, \quad (11.43)$$

bunda  $k_p$  - rotor qutblari tunikachalarining qalinligiga bog'liq bo'lgan koeffitsiyent (tunikacha qalinligi  $\Delta = 1_{MM}$  bo'lganda  $k_p = 4,6$ ;  $\Delta = 2_{MM}$  bo'lganda  $k_p = 8,6$ ; qutb uchligi yaxlit bo'lganda  $k_p = 23,3$ );  $b_r$  - qutb uchligining kengligi, mm;  $Z_1$  - stator pazlari soni;  $B_{\delta}$  - havo oraliqdagi induksiya, Tl;  $k_{\delta 1}$  - stator havo oralig'i koeffitsiyenti;  $l_1$  - statorning tish oralig'i, mm.

Sinxron mashinalarda yuklanishdagi qo‘shimcha isroflar  $p_{dob}$  motorga keltirilgan quvvatning yoki generator foydali quvvatining foizi sifatida hisoblanadi. Quvvati 1000 KWt gacha bo‘lgan sinxron mashinalarda yuklanishdagi qo‘shimcha quvvat 0,5%, quvvati 1000 KWtdan katta bo‘lganda - 0,25-0,4% qabul qilinadi. Sinxron mashinalarda umumiy quvvat isroflari ( KWt)

$$\sum p = (p_{e1} + p_v + p_{m1} + p_{mex} + p_p + p_{dob}) \cdot 10^{-3}. \quad (11.44)$$

Sinxron mashina foydali ish koeffitsiyenti:

a) sinxron generator uchun

$$\eta_g = 1 - \frac{\sum p}{P_{НОМ} + \sum p} \quad (11.45)$$

bunda

$$p_{nom} = m_1 U_{1nom} I_{1nom} \cos \varphi_1 \cdot 10^{-3} \quad (11.46)$$

- nominal yuklanish bo‘lganda generatordan olinayotgan aktiv quvvat, KWt;

b) sinxron motor uchun

$$\eta_d = 1 - \sum r / R_{1nom}. \quad (11.47)$$

bunda  $U_{1nom}$  va  $I_{1nom}$  – stator kuchlanishi va tokining faza qiymatlari.

Sinxron mashina F.I.K.yuklanishning qiymati ( $\beta = p_2/p_{nom}$ ) va xarakteri ( $\cos \varphi_1$ )ga bog‘liq. Ularning grafiklari

KPD sinxronnoy mashinay zavisit ot velichinay nagruzki ( $\beta = p_2 / R_{nom}$ ) i ot ee xarakteru ( $\cos \varphi_1$ ). Bu bog‘lanish grafigi 1.41-rasmda tasvirlangan bog‘lanishdan farq qilmaydi. Quvvati 100 KWtgacha bo‘lgan sinxron mashinlar F.I.K.lari 80—90%, undan kattaroq quvvatli mashinalarda F.I.K.92-99% gacha bo‘ladi. Qiymati katta F.I.K.lari quvvatlari birnecha o‘nlab va yuzlab MW quvvatli bo‘lgan turbogenerator va gidrogeneratorlarga xos.

## Nazorat savollari

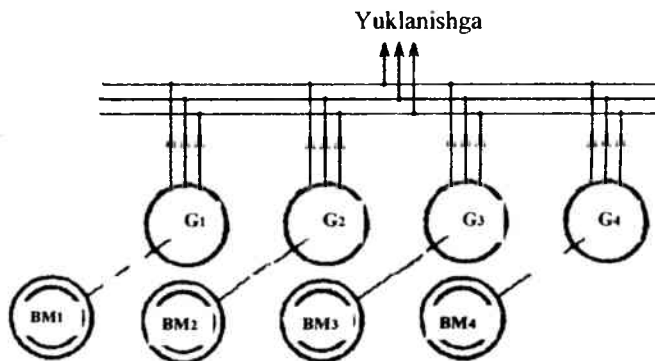
1. Ayon qutbli sinxron mashinalar magnit zanjirlari qanday zonalardan iborat?
2. Yakor reaksiyasi hodisasi nimani anglatadi?
3. Sinxron generator yakor reaksiyasi aktiv, induktiv va sig'im yuklanishlarida qanday ta'sir etadi?
4. Yakor reaksiyasi ayon qutbli sinxron generator stator chulg'amlarida qanday EYKlarni induktivlaydi va bu EYKlan qanday induktiv qarshiliklarga ekvivalent?
5. Nima uchun sinxron mashina q.t. tavsifi to'g'ri chiziq shakliga ega?
6. KTN nima va bu parametr sinxron generator xususiyatlariga qanday ta'sir etadi?
7. "Yuklanish tashlanishi"da kuchlanishning nominal o'zgarishl deb nimaga aytiladi va nima uchun sig'im yuklanishida uning qiymati manfiy?
8. 11.2-misolda, agar generator yarim nominal qiymatli yuklangan bo'lsa, "yuklanish tashlanishi"da kuchlanishning o'zgarishini hisoblang.
9. Sinxron mashinada qanday quvvat isroflari mavjud?

## 12-bob. SINXRON GENERATORLARNI PALALLEL ISHLASHI

### 12.1 Generatorlarni parallel ishga tushirish

Elektr stansiyalarda, aksariyat, birnecha sinxron generatorlar o'rnatilib, birgalikda ishlashi uchun parallel ulanadi (12.1-rasm). Shu bilan birga, barcha yirik elektr stansiyalar 110, 220 va 500 MV li elektr uzatish liniyalariga transformatorlar orqali ulanib, yagona elektro-energetik tizimni hosil qiladilar.

Sinxron generatorlarni tarmoq bilan parallel ishlash uchun ulashda quyidagi shartlarni bajarish shart: generatorning EYK  $E_r$  ning amplitudasi tarmoq kuchlanishi  $U_T$  ning amplitudasiga teng  $E_r = U_T$  va albatta ularning fazalari mos bo'lishi shart; generator EYKning chastota  $f_r$  si tarmoq kuchlanishi chastotasi  $f_T$  ga teng ( $f_r = f_T$ ); generator stator chulg'ami klemmalaridagi fazalar ketma-ketligi ulanayotgan tarmoq fazalari ketma-ketligi bilan bir xil bo'lish. Bundan tashqari, generatorni tarmoqqa ulayotgan uch fazali ulagichning har bir faza klemmalari orasidagi potentsiallar farqi ulanayotgan onda minimal bo'lishi shart.

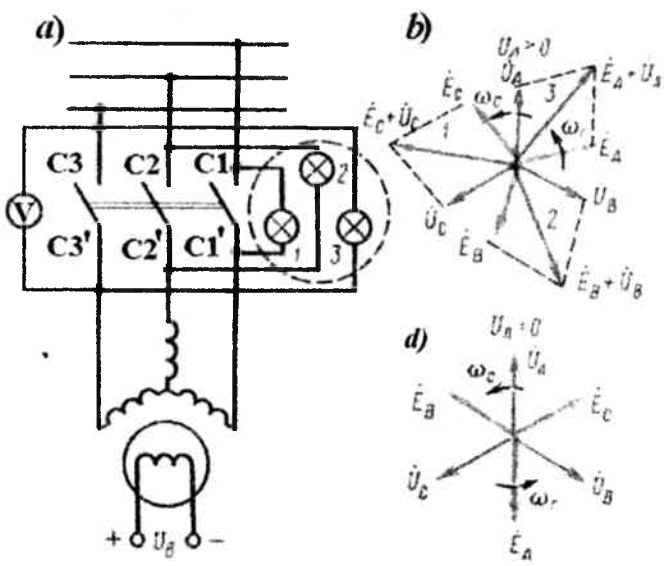


12.1-rasm. Sinxron generatorning parallel ishlashga ulash

Generatorni ushbu talablar qondirilish holatiga olib kelish sinxronizatsiyalash deyiladi. Ushbu shartlardan birortasini bajar-maslik, stator chulg'amida katta inuvozanatlovchi tok hosil bo'lishiga sabab bo'ladi. Bu toklarning haddan ziyod katta qiymatlari avariya holatiga olib kelishi mumkin.

Sinxron generatorni parallel ishlash uchun tarmoqqa ulash yoki aniq sinxronizatsiyalash yoki o'z-o'zini sinxronizatsiyalash usullari bilan bajarilishi mumkin.

**Aniq sinxronizatsiyalash usuli.** Bu usulning mohiyati shundaki, generatorni tarmoqqa ulashdan avval, uni yuqorida keltirilgan barcha talablarga mutloq javob beradigan holatga olib kelinadi. Ushbu talablar bajarilgan onni, ya'ni sinxronizatsiyalash onini sinxronos-kop, deb nomlangan asbob yordamida aniqlanadi. Tuzilishiga ko'ra, sinxronoskoplar strelkali (milli) va lampalilarga bo'linadi. Teng tomonli uchburchak uchlariga joylashtirilgan, uch lampadan 1, 2, 3 (12.2-rasm) iborat bo'lgan lampali sinxronoskop yordamida sinxron generatorni sinxronizatsiyalash jarayonini ko'raylik.



12.2-rasm. Lampali sinxronoskop

Lampalarni 12.2,*a*-rasmda keltirilgan sxema bo'yicha ulasak, sinxronizatsiyalash barcha shartlari uchchala lampalarning bir onda o'chgan holatiga mos keladi. Bu onda ulamishi mo'ljallanayotgan  $C1$  va  $C1'$ ,  $C2$  va  $C2'$  hamda  $C3$  va  $C3'$  juft klemmlar orasidagi potentsiallar farqi juda kichik bo'ladi. Aynan shu onda generatorni tarmoqqa ulash mumkin. Biroq, lampalarning o'chganligi juft klemmlar orasida potentsiallar farqi nolga teng, degani emas. Cho'g'lanuvchi lampalar kuchlamishi nominal qiymatining 30% gacha bo'lganda, lampa cho'g'lanmaydi. Shu onda, ya'ni shu kuchlanishlar farqida juft klemmlar ulansa, nisbatan katta muvozanatlovchi tok hosil bo'ladi. buning oldini olish uchun, juft klemmalardan biriga voltmetr ulanadi. Sinxronizatsiyalash barcha shartlari bajarilib, voltmetr nolga yaqinlashganda, juft klemmlar ulamishi mumkin.

**O'z-o'zini sinxronizatsiyalash.** Qo'zg'atish chulg'ami qo'zg'atkichga ulanmagan (qo'zg'atish toki  $I_k = 0$ ) generatorning rotorini yordamchi motordan foydalanib sinxron tezlikka yaqin (95-98%)  $p_1$  tezlikkacha aylantiriladi. So'ngra generatorning stator chulg'ami tarmoqqa ulanadi. Rotor (qo'zg'atish) chulg'amida o'ta kuchlanishning oldini olish uchun, uni biror aktiv qarshilikka tutashtiriladi. Generator tarmoqqa ulanish onida uning EYK nolga teng bo'lgani uchun (generator qo'zg'atishsiz), tarmoq kuchlanishi ta'sirida stator chulg'amida generator nominal tokidan katta bo'lgan tokning keskin ortishi ko'rmadi. Stator chulg'ami tarmoqqa ulanishi onida qo'zg'atish chulg'ami ham o'zgarimas tok manbaiga ulanadi. Sinxron generator, rotorga ta'sir etuvchi elektroinagnit momenti ta'sirida, sinxronizmga tortiladi, ya'ni rotor aylanish tezligi sinxron tezlikka erishadi.

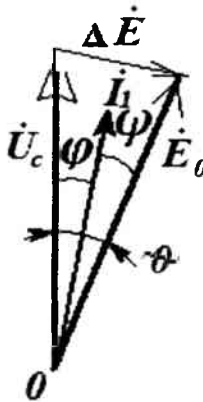
Sinxronizatsiyalash jarayonida generatorda murakkab elektromexanik o'tkinchi jarayonlar sodir bo'ladi. Ular natijalida chulg'amlar, podshipniklar va generatorni turbina bilan bog'lovchi muftalarga katta mexanik ta'sirlar sodir etiladi. Bu tug'yonlarning generator ishonchililigiga ta'siri masalalari sinxron generatorni loyihalash ishlari bajarilishida e'tiborga olinadi. O'z-o'zini sinxronizatsiyalash usuli tez-tez ulanadigan generatorlarda qo'llaniladi. Ushbu usul oddiy va umi avtomatlashtirish oson.



## 12.2. Parallel ishlashga ulangan generatorlarni yuklanishi

Aksariyat, bir tarmoqqa parallel ishlash uchun birnecha sinxron generatorlari ulanadi va ular har birining quvvati barcha parallel ulangan generatorlar quvvatlari yig'indisidan anchagina kichik bo'ladi. Parallel ulangan generatorlar yuklanish jarayonini ko'rish uchun quyidagi farazni qabul qilamiz. Sinxron generator parallel ulanayotgan tarmoqdagi boshqa generatorlar umumiy quvvati ulanayotgan generator quvvatidan shunchalar kattaki, generator parametrlarining ixtiyoriy o'zgarishida, tarmoq kuchlanishi  $U_c$  va uning chastotasi  $f_c$  o'zgarmay qoladi.

Sinxronizatsiyalashning barcha shartlari bajarib generator tarmoqqa ulangandan so'ng, uning EYK  $E_0$  tarmoq kuchlanishiga teng bo'ladi, shu sababli generator stator chulg'amidagi tok nolga teng, generator yuklanishsiz ishlaydi. Bunda, turbinadan generator valiga kelayotgan mexanik quvvat  $R_1$  to'laligicha generator YU.i.isrofini qoplash uchun sarflanadi  $P_0 = P_{\text{mex}} + P_{\text{ml}} + P_K + P_{\text{II}}$ .



### 12.3-rasm. Parallel ulangan generator vektor diagrammasi

Stator chulg'amida tokning nolga  $I_1 = 0$  tengligi shunga olib keladiki, stator chulg'ami aylantiruvchi magnit maydon hosil qilmaydi va generatorda faqat qo'zg'atish toki hosil qilgan va rotor

bilan birga  $\omega_1$  tezlikda aylanayotgan asosiy magnit maydon mavjud bo'ladi. Bunda elektromagnit moment ham bo'lmaydi.

Agar turbinaning aylantiruvchi momenti  $M_1$  ortsa, generator rotorini biroz tezlanish olib, o'zining birlamchi holatiga nisbatan aylanish yo'nali-shiga mos  $\theta$  burchakka buriladi. Generator EYK ham o'zining YU.i.rejimidagi EYK  $\dot{E}_0$  ga nisbatan shunday burchakka  $\theta$  ga buriladi (12.3, b-rasm). Natija-da stator zanjirida EYKlar farqi  $\Delta \dot{E} = \dot{E}_0 - \dot{U}_c$  hosil bo'ladi va stator toki  $I_1$  ni hosil qiladi. Tok  $I_1$  rotor bilan sinxror tezlikda aylanuvchi magnit maydoni hosil qiladi va rotorning qo'zg'atish oqimi bilan birga sinxron mashinaning natijaviy magnit maydonini hosil qiladi. Bu natijaviy maydonning o'qi  $d''-d'$  rotor bo'ylama o'qi  $d-d'$  bilan mos bo'lmaydi: *sinxron generatorda rotor qutbi o'qlari  $d-d'$  natijaviy magnit maydon o'qi  $d-d'$  dan  $\theta$  burchakka oldinda bo'ladi* (12.4, a-rasm).

Ma'lumki, teskari nomlangan magnit qutblar o'z-aro tortilishadi, shu sababli, magnitlangan rotor qutblari va statorning aylanuvchi magnit maydonlari orasida magnit tortilish kuchlari  $F_M$  hosil bo'ladi (12.4, b-rasm). Bu kuch vektori har bir rotor qutbda shu qutb o'qiga  $\theta$  burchakda joylashgan va ikki tashkil etuvchilariga ega: qutb o'qlari bo'ylab yo'nalgan normal tashkil etuvchi  $F_n = F_M \cos\theta$  va rotor qutblari o'qiga perpendikulyar yo'nalgan - tangensial tashkil etuvchi  $F_t = F_M \sin\theta$ .

Barcha rotordagi qutblar tangensial tashkil etuvchilarining yig'indisi  $F_t$  sinxron generator rotorida, aylantiruvchi momentga teskari yo'nalganelektromagnit momentini hosil qiladi:

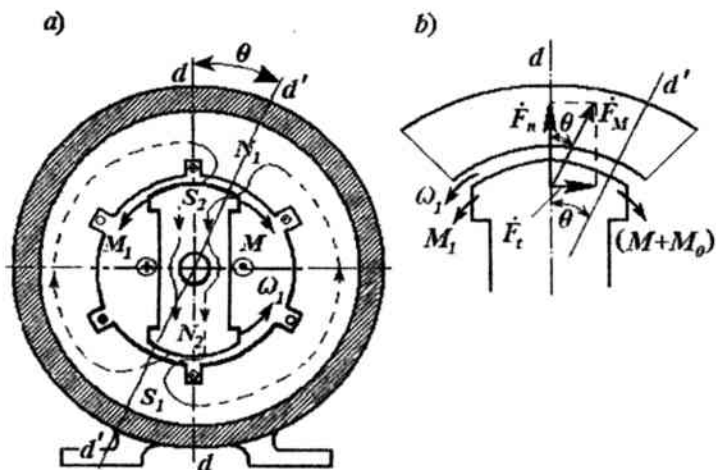
$$M = F_t 2p(D_2/2) = F_M D_2 p \sin\theta, \quad (12.1)$$

bunda  $D_2$  - rotor diametri.

Hosil qilingan ifoda shuni anglatadiki, sinxron mashina elektromagnit momenti burchak  $\theta$  ning sinusoidal funksiyasi ekan va quyidagicha ifodalanishi mumkin

$$M = M_{\max} \sin\theta, \quad (12.2)$$

bunda  $M_{\max}$  - elektromagnit momentning maksimal qiymati.



12.4-rasm. Sinhron generator elektromagnit momenti haqida tushuncha

Generator rotorida hosil bo‘luvchi elektromagnit moment  $M$  birlamchi motor aylantiruvchi momentiga qarama-qarshi yo‘nalga, ya’ni u tormozlovchi momentdir. Bu qarshilik momentini engish uchun birlamchi motor quvvatining bir qismi sarf bo‘ladi, bu quvvat elektromagnit quvvati deyiladi

$$P_{EM} = M\omega_1, \quad (21.3)$$

bunda  $\omega_1$  - rotorning burchak aylanish tezligi.

Shunday qilib, tarmoq bilan parallel ishlayotgan sinxron generator stator chulg‘amida tok  $I_1$  paydo bo‘lishi bilan generatorga elektr yuklanish ulanadi, birlamchi motor (turbina, dizel motori va h.k.) qo‘shimcha mexanik yuklanish oladi. Bunda birlamchi motor mexanik quvvati  $P_1$ , na faqat YU.i.rejimi quvvat isroflariga sarflanadi, qisman generatorning elektromagnit quvvati  $P_{em}$  ni hosil qilish uchun ham sarf bo‘lar ekan.

$$P_1 = P_0 + P_{EM}. \quad (12.4)$$

Demak, sinxron generatorning elektromagnit quvvati, bu birlamchi motor mexanik quvvatining bir qismidan o'zgartirib olingan elektr aktiv quvvat ekan:

$$P_{EM} = P_1 - P_0$$

Sinxron generator chiqish qismidan tarmoqqa uzatiladigan  $P_2$  aktiv quvvatga kelsak, ya'ni

$$P_2 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 \cdot 10^{-1},$$

elektromagnit quvvat  $P_{em}$  dan stator chulg'amidagi elektr quvvat isroflari  $P_{E1} = m_1 I_1^2 r_1$  va yuklanishdagi qo'shimcha isrof  $P_{\text{ob}}$  yig'indilariga kichik, ya'ni

$$P_2 = P_{EM} - (P_{E1} + P_{\text{ob}}). \quad (12.5)$$

Demak, tarmoq bilan parallel ishlovchi sinxron generatorning statoridan tarmoqqa uzatilayotgan  $P_2$  aktiv quvvat birlamchi motor (turbina) aylantiruvchi momenti  $M_1$  ni o'zgartirib boshqariladi.

$$P_2 = P_1 - \Sigma P = M_1 \omega_1 - \Sigma P,$$

bunda  $\omega_1 = 2\pi f_1 / p = \text{const}$  - sinxron mashina rotorining sinxron aylanish burchak tezligi, rad/s.

Agar (12.4) tenglamaning barcha qo'shiluvchilarini burchak tezligiga bo'lsak  $P_1 / \omega_1 = P_0 / \omega_1 + P_{EM} / \omega_1$ , momentlar tenglamasini hosil qilamiz.

$$M_1 = M_0 + M. \quad (12.6)$$

Bu tenglamadan shu ma'lum bo'ladiki, birlamchi motor (turbina) generator valida hosil qilgan aylantiruvchi moment  $M_1$  aks ta'sir etuvchi momentlar: YU.i.quvvat isroflari  $P_0$  dan hosil bo'lgan YU.i.momenti  $M_0$  va generator yuklanishi hosil qilgan elektromagnit momentlari yig'indisiga teng ekan.

Ushbu generator uchun YU.i.momenti  $M_0$  o'zgarimas ( $M_0 = \text{sonst}$ ), shuning uchun sinxron generatori yuklanishi  $M_1 > M_0$  sharti bilan,

faqat birlamchi motorning aylantiruvchi momenti hisobiga o'zgarishi mumkin.

### 12.3. Sinxron generator burchak tavsiflari

Noayon qutbli sinxron generator tarmoq bilan parallel ishiaganda elektromagnit quvvat quyidagiga teng bo'ladi.

$$P_{EMH} = \frac{m_1 U_1 E_0}{x_c} \sin \theta, \quad (12.7)$$

bunda  $\theta$  - rotor bo'ylama o'qi natijaviy magnit oqim bo'ylama o'qiga nisbatan siljigan burchagi (12.4).

Ayon qutbli sinxron generator elektromagnit quvvat

$$P_{EMH} = \frac{m_1 U_1 E_0}{x_d} \sin \theta + \frac{m_1 U_1^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta, \quad (12.8)$$

bunda  $x_d = x_{ad} + x_1$  va  $x_q = x_{aq} + x_1$  - ayon qutbli sinxron mashina, mos ravishda, bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'ylab sinxron induktiv qarshiliklar, Om.

Ifodalar (12.7) va (12.8) ni sinxron aylanish tezligi  $\omega_1$  ga bo'lib, elektromagnit moment ifodasini aniqlaymiz:

noayon qutbli sinxron mashina uchun

$$M_n = \frac{P_{EM}}{\omega_1} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 x_c} \sin \theta; \quad (12.9)$$

Ayon qutbli sinxron mashina

$$M_{ya} = \frac{P_{EM}}{\omega_1} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{m_1 U_1^2}{2 \omega_1} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta \quad (12.10)$$

bunda  $M$  - elektromagnit moment, Nm.

Ifoda (12.10) ning tahlili shuni ko'rsatadiki, ayon qutbli sinxron mashina elektromagnit momenti ikki tashkil etuvchidan iborat:

ulardan biri elektromagnet momentning asosiy tashkil etuvchisini ifodalaydi.

$$M_{\text{asosiy}} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 x_d} \sin \theta. \quad (12.11)$$

ikkinchisi - momentning reaktiv tashkil etuvchisi

$$M_{\text{reaktiv}} = \frac{m_1 U_1^2}{2 \omega_1} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta. \quad (12.12)$$

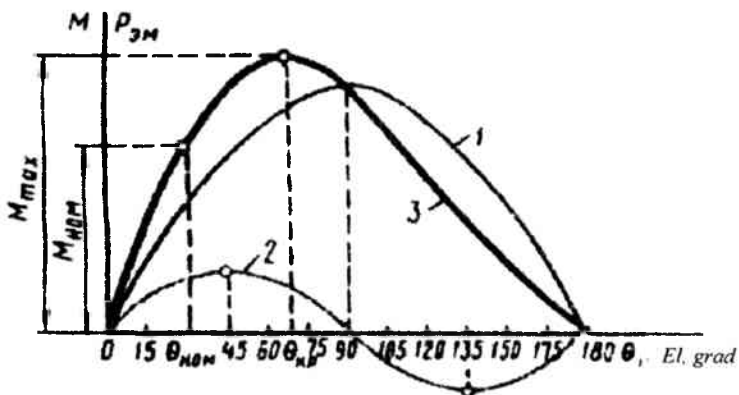
Ayon qutbli sinxron mashinasi elektromagnet momentining asosiy tashkil etuvchisi  $M_{\text{asosiy}}$  na faqat kuchlanishga ( $M_{\text{asosiy}} = U_1$ ), balki aylanuvchi rotorning magnet maydoni  $\Phi$  stator chulg'amida induktivlagan EYK  $E_0$  ga ham bog'liq:

$$E_0 = 4,44 f_1 \Phi w_1 k_{o61}. \quad (12.13)$$

Ifodalar (12.11) va (12.13) dan shunday xulosa chiqarish mumkinki, elektromagnet momentning asosiy tashkil etuvchisi  $M_{\text{asosiy}}$  rotor magnet oqimiga bog'liq ekan:  $M_{\text{asosiy}} \equiv \Phi$ . demak, qo'zg'atish chulg'ami toki (magnet maydoni) bo'lmagan mashinada ( $\Phi=0$ ) elektromagnet momentning asosiy tashkil etuvchisi  $M_{\text{asosiy}} = 0$ .

Elektromagnet momentning reaktiv tashkil etuvchisi  $M_{\text{reaktiv}}$  rotor qutblari magnet maydoniga bog'liq emas. Bu tashkil etuvchining paydo bo'lishi uchun ikki shartning bajarilishi kifoya: birinchidan, mashina rotor ayon qutbli bo'lishi zarur ( $x_q \neq x_d$ ) va, ikkinchi, stator chulg'amiga tarmoq kuchlanishi ulangan bo'lishi zarur ( $M_p \equiv U_1^2$ ).

Sinxron generator yuklanishi ortganda, ya'ni tok  $I_1$  otrishi bilan burchak  $\theta$  ortadi, bu mashinaning elektromagnet quvvati va elektromagnet momenti ortishiga olib keladi. Mashinaning elektromagnet quvvati va elektromagnet momenti  $\theta$  ga bog'liqligi  $P_{EM} = f(\theta)$  va  $M = f(\theta)$  sinxron mashina burchak tavsifi deb ataladi.



12.5-rasm. Sinxron generatorning burchak tavsifi

Ayon qutbli sinxron generatorning burchak tavsiflari —elektromagnit quvvati  $P_{EM} = f(\theta)$  va elektromagnit momenti  $M = f(\theta)$  tahlil qilaylik (12.5-rasm). Bu tavsiflar tarmoq kuchlanishi ( $U_c = const$ ) va magnit maydoni, ya'ni  $E_0 = const$ ) o'zgarmas, deyilgan faraz bilan qurilgan. Ifodalar (12.8) va (12.11) dan ko'ramizki, elektromagnit momentning asosiy tashkil etuvchisi  $M_{asosiy}$  va unga mos keluvchi elektromagnit quvvat burchak  $\theta$  ning sinusiga proporsional (12.5-rasmda 1-egri chiziq), momentning reaktiv tashkil etuvchisi esa (12.12) va unga mos kelgan elektromagnit quvvat burchak  $2\theta$  sinusiga proporsional ekan (2-egri chiziq). Natijaviy momentning  $M_{\theta} = M_{asosiy} + M_p$  va elektromagnit quvvatning  $P_{EM}$  burchak  $\theta$  ga bog'liqligi tashkil etuvchilarning algebraik yig'indisi grafi (3-egri chiziq) bilan aniqlanadi.

Elektromagnit momentning maksimal qiymati  $M_{max}$  burchak kritik  $\theta_{sp}$  qiymatiga mos keladi.

Natijaviy burchak tavsifidan (3) ko'rinadiki, sinxron mashina yuklanishi burchakning  $\theta \leq \theta_{sp}$  qiymatigacha ortsa, sinxron mashina turg'un rejimda ishlaydi. Bu shunday tushuntiriladiki, generatorda burchak  $\theta \leq \theta_{sp}$  bo'lganda yuklanish ortganda ( $\theta$  ortishida) elektromagnit momentning ortishini ko'rish mumkin. Bunday vaziyatda ixtiyoriy barqaror yuklanishga birlamchi motor aylantiruvchi

momenti  $M_1$  va aks ta'sir etuvchi momentlar yig'indisi mos keladi, ya'ni  $M_1 = M_{\omega} + M_0$ . Natijada rotor aylanish tezligi o'zgarmas va sinxron tezlikka teng bo'ladi.

Yuklanish ortishi bilan kritik burchakdan o'tilsa ( $\theta > \theta_{sp}$ ), elektromanit moment  $M_{ya}$  kamayadi. Bu esa aylantiruvchi va aks ta'sir etuvchi momentlar tengligining buzilishiga olib keladi. Birlamchi motor aylantiruvchi momentining ortiqcha (muvozanatlanmagan) qismi  $\Delta M = M_1 - (M_{\omega} + M_0)$  rotor aylanish tezligini oshirishga qaratilgan bo'ladi, bu esa sinxronizatsiyalash shartini buzadi (mashina sinxronizmdan chiqadi).

Kritik burchak ( $\theta_{sp}$ )ga mos bo'lgan elektromagnit moment, maksimal moment bo'ladi  $M_{max}$ .

Ayon qutbli sinxron mashina uchun  $\theta_{sp} = 60 \div 80$  el. grad. Burchak  $\theta_{sp}$  qiymatini quyidagi ifodadan aniqlash mumkin

$$\cos \theta_{sp} = \sqrt{\beta^2 + 0,5 - \beta} \quad (12.14)$$

$$\text{bunda,} \quad \beta = E_0 / [4U_1(x_d / x_q - 1)]. \quad (12.15)$$

Noayon qutbli sinxron mashinalar uchun  $M_{sp} = 0$ , shu sababli burchak tavsifi sinusoida shaklida bo'ladi va kritik burchak  $\theta_{sp} = 90^\circ$ .

Maksimal elektromagnit momentning  $M_{max}$  nominal momentga  $M_{nom}$  nisbati o'ta yuklanuvchanlik xususiyati yoki statik o'ta yuklanish koeffitsienti deyiladi:

$$\lambda = M_{max} / M_{nom} = 1,4 \div 3. \quad (12.16)$$

Momentning reaktiv tashkil etuvchisini e'tiborga olmasak, quyidagilarni yozish mumkin

$$\lambda \approx 1 / \sin \theta_{nom}, \quad (12.17)$$

ya'ni, sinxron mashinaning nominal yuklanishiga mos bo'lgan burchak  $\theta_{nom}$  qanchalar kichik bo'lsa, uning o'ta yuklanuvchanlik



xususiyati shunchalar katta bo'ladi. Masalan, turbogeneratorda  $\theta_{\text{nom}} = 25 \div 30^\circ$ , bunga o'ta yuklanganlik  $\lambda = 2,35 \div 2,0$  mos keladi.

**Misol 12.1.** Rotori ayon qutbli ( $2p = 10$ ) bo'lgan uch fazali sinxron generatori kuchlanishi 6000 V., chastotasi 50Hz. bo'lgan tarmoqqa parallel ishlash uchun ulangan. CHulg'ami yulduzcha ulangan va har bir fazada ketma-ket ulangan  $w_1 = 310$  o'ramlari bo'lgan stator chulg'am ko'effitsiyenti  $k_{\text{og1}} = 0,92$ , induktiv qarshiligi  $x_1 = 10$  Om. Stator ichki silindrik yuzasi diametri  $D_1 = 0,8$  m, magnit o'zak uzunligi  $l_i = 0,28$  m, havo oralig'i ravon bir xil  $\delta = 2$  mm, qutbni qoplash ko'effitsiyenti  $a_p = 0,7$ , g'avo oralig'i ko'effitsiyenti  $k_\delta = 1,3$ , magnit to'yinish ko'effitsiyenti  $k_n = 1,1$ . Rotorning magnit oqimi  $F = 0,058$  Vb.

Elektromagnit momentlar qiymatlari hisoblash va  $M_{\text{anotiy}}$ ,  $M_{\text{reaktiv}}$  i  $M = f(\theta)$  tavsiflar qurish talab etiladi.

**Yechish.** Yakor reaksiyasi to'la induktiv qarshiligini (11.19) dan hisoblaymiz:

$$x_d = 2,5 \cdot 10^{-6} m_1 f_1 \frac{D_1 l_i}{\delta k_\delta k_\mu} \left( \frac{w_1 k_{\text{og1}}}{p} \right)^2 = 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 50 \frac{0,8 \cdot 0,28}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,3 \cdot 1,1} \times \left( \frac{310 \cdot 0,92}{5} \right)^2 = 96 \text{ Om.}$$

Berilgan  $\alpha = 0,7$  va ravon havo oralig'ida magnit oqim shakl ko'effitsiyenti (11.7) va (11.8) dan:  $k_d = 0,958$  va  $k_q = 0,442$ .

**Bo'ylama o'q yakor reaksiyasining induktiv qarshiligi [(11.24)ga qarang]**

$$x_{\text{ad}} = x_d k_d = 96 \cdot 0,958 = 91,5 \text{ Om,}$$

Ko'ndalang o'q bo'yicha [(11.25)ga qarang]

$$x_{\text{aq}} = x_d k_q = 96 \cdot 0,442 = 42,2 \text{ Om.}$$

**Bo'ylama va ko'ndalang o'qlar bo'yicha sinxron induktiv qarshiliklari**

$$x_d = x_{\text{ad}} + x_1 = 104,4 + 10 = 114,4 \text{ Om,}$$

$$x_q = x_{\text{aq}} + x_1 = 48,2 + 10 = 58,2 \text{ Om.}$$

Yu.i. rejimida stator chulg'ami EYKi (12.13) dan

$$E_0 = 4,44 f_1 \Phi W_1 k_{\omega 1} = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,058 \cdot 310 \cdot 0,92 = 3659 \text{ V}.$$

Stator chulg'ami qaza kuchlanishi

$$U_{1\text{noq}} = 6000 / \sqrt{3} = 3468 \text{ V}.$$

Rotoring burchak aylanish tezligi

$$\omega_1 = 2\pi f_1 / p = 2\pi 50 / 5 = 62,8 \text{ s}^{-1}.$$

Generator elektromagnit momenti asosiy tashkil etuvchisining maksimal qiymati (12.11) dan aniqlaymiz

$$M_{\text{ocnmax}} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 x_{st}} = \frac{3 \cdot 3468 \cdot 3659}{62,8 \cdot 104,4} = 5954 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Elektromagnit momenti reaktiv tashkil etuvchisining maksimal qiymati (12.12)

$$M_{p\text{max}} = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) = \frac{3 \cdot 3468^2}{2 \cdot 62,8} \left( \frac{1}{58,2} - \frac{1}{144,4} \right) = 2642 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Momentlarni hisoblash natijalari

$M_{\text{asosiy}} = M_{\text{ocnmax}} \sin \theta$ ,  $M_{\text{reaktiv}} = M_{p\text{max}} \sin \theta$ ,  $M_{\text{M}} = M_{\text{asosiy}} + M_{\text{reaktiv}}$  burchak  $\theta$  ning birnecha qiymatlari uchun quyida keltirilgan:

$\theta, \text{grad}$	20	30	45	60	70	90
$\sin \theta$	0,342	0,500	0,707	0,866	0,940	1,0
$M_{\text{ocn}}, \text{Nm}$	2036	2977	4209	5156	5596	5954
$\sin 2\theta$	0,643	0,866	1,0	0,866	0,643	0
$M_p, \text{Nm}$	1698	2287	2642	2287	1698	0
$M, \text{Nm}$	3734	5264	6851	7443	7294	5954

Momentning maksimal  $M_{\max}$  qiymatiga mos keluvchi kritik burchak  $\theta_{sp}$ , (12.14)dan

$$\cos \theta_{sp} = \sqrt{\beta^2 + 0,5} - \beta = \sqrt{0,28^2 + 0,5} - 0,28 = 0,48,$$

bunda

$$\beta = E_0 / [4U_1(x_d / x_q - 1)] = 3659 / [4 \cdot 3468(114,4 / 58,2 - 1)] = 0,28 ;$$

$$\text{arkkos } 0,48 = 61,3^\circ.$$

Kritik burchak  $\theta_{sp} = 61,3^\circ$  uchun mos keluvchi momentlar:

$$M'_{\text{asosiy}} = M_{\text{asos,max}} \sin \theta_{sp} = 5954 \cdot 0,877 = 5222 \text{ N}\cdot\text{m};$$

$$M'_{\text{reaktiv}} = M_{\text{reak,max}} \sin 2\theta_{sp} = 2642 \cdot 0,842 = 2254 \text{ N}\cdot\text{m};$$

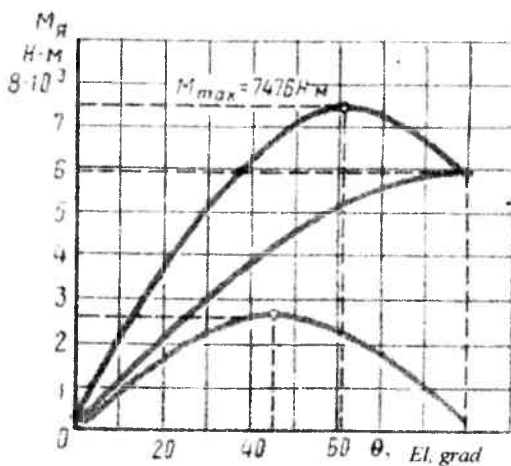
$$M_{\max} = M_{\text{asosiy}} + M_{\text{reaktiv}} = 5222 + 2254 = 7476 \text{ N}\cdot\text{m}.$$

Momentlar grafigi  $M_{\text{asosiy}}$ ,  $M_{\text{reaktiv}}$  va  $M_{ya} = f(\theta)$ , hisoblash natijalari bo'yicha 12.6-rasmda keltirilgan.

#### 12.4. Sinxron generatorning V-simon tavsiflari

Yuqorida qo'zg'atish chulg'amidagi toki o'zgarmas bo'lgan sinxron generatorning tarmoq bilan parallel ishlashini ko'rgan edik. Agar sinxron generator tarmoqqa parallel ulangandan so'ng uning birlamchi mexanik momentni o'zg'armas g'olatda qoldirib, qo'zg'atish tokini o'zgartirsak nima bo'ladi?

Faraz qilaylik, generator tarmoqqa parallel ulangandan so'ng yuklanishsiz ishlayotgan bo'lsin va uning EYK  $\dot{E}_0$  tarmoq kuchlanishi  $\dot{U}_0$  ga teng bo'lsin. Shundan so'ng qo'zg'atish tokini oshirsak, ya'ni mashinani o'ta qo'zg'atsak, unda EYK  $\dot{E}_0$  ortadi va generator zanjirida ortiqcha EYK  $\Delta \dot{E}$  hosil bo'lib, reaktiv quvvat va bo'yлама reaktiv tok  $i_d$  hosil bo'ladi, uning yo'nalishi EDS  $\Delta \dot{E}$  dan fazasi bo'yicha  $90^\circ$  ga kechikadi ( $r_1 \approx 0$  deb faraz qilganmiz). O'ta qo'zg'atish ortishi bilan reaktiv (induktiv) tokning qiymati ham ortadi.



12.6-rasm. Momentlar burchak tavsifi

Agar generator tarmoqqa parallel ulangandan so'ng qo'zg'atish tokini kamaytirsak, ya'ni mashina chala qo'zg'atilga, u holda EYK  $E_0$  kamayadi, generator zanjirida yana ortiqcha EYK va bo'ylama o'q reaktiv toki  $i_d$  hosil bo'ladi. Bu gal  $i_d$  toki EYKga nisbatan  $90^\circ$  ga ilgarilovchi (ya'ni sig'im xarakterida) bo'ladi.

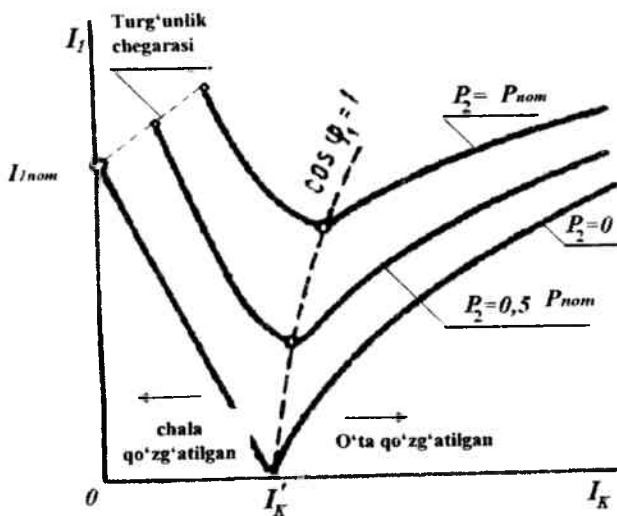
Bu shunday tushuntiriladi. Generator o'ta qo'zg'atilganda qo'zg'atish MYK  $F_0 = I_K w_K$  ortadi. Bunda stator chulg'amida EYKga nisbatan kechikuvchi reaktiv (induktiv) tok hosil bo'ladi. Bu tok hosil qilgan bo'ylama-magnitsizlovchi yakor reaksiyasi ortiqcha hosil bo'lgan MYKni kompensatsiyalaydi. Natijada generator EYK o'zgarmas bo'lib qoladi. Shunga o'xshash jarayon generator qo'zg'atish toki kamaytirilganda ham sodir bo'ladi, faqat shu farqi bo'ladiki, unda stator toki EYKga nisbatan fazasi bo'yicha ilgarilovchi bo'ladi.

Agar qo'zg'atish tokining barcha o'zgarishlarida birlamchi motorning momenti o'zgarmay qolsa, u holda generatoring tarmoqqa ulatayotgan aktiv quvvati g'am o'zgarishsiz qoladi.

$$P_2 = m_1 U_c I_1 \cos \varphi_1 = const$$

Bu ifodadan kelib chiqadiki,  $U_c = const$  bo'lganda tokning aktiv tashkil etuvchisi ham  $I_q = I_1 \cos \varphi_1 = const$  o'zg'armas bo'ladi.

Shunday qilib, generatorning qo'zg'atilganlik darajasi faqat stator tokining reaktiv tashkil etuvchisiga ta'sir etar ekan. Tokning aktiv tashkil etuvchisi esa  $I_q = I_1 \cos \varphi_1 = const$  o'zgarmas qolar ekan.



12.7-rasm. Sinxron generator V-simon tavsiflari

Generatorning o'zgarmas aktiv yuklanish quvvatida stator toki  $I_1$  ning qo'zg'atish toki  $I_K$  ga bog'liqligi sinxron generatorning V-simon tavsifi deyiladi. Tavsifning ushbu nomlanishi uning tashqi ko'rinish shakliga ko'ra qabul qilingan. 12.7-rasmda sinxron generatorning V-simon tavsiflari  $P_2 = const$  yuklanishning birnecha qiymatlari  $P_2 = 0$ ;  $P_2 = 0,5 P_{nom}$  va  $P_2 = P_{nom}$  uchun qurilgan. Sinxron generatorning V-simon tavsiflari shuni ko'rsatadiki, generatorning ixtiyoriy yuklamishlari uchun qo'zg'atish toki  $I_K$  ning shunday qiymatlari mos keladiki, unda stator toki  $I_1$  minimal qiymatiga erishib, o'zining aktiv tashkil etuvchisiga teng bo'ladi  $I_{1min} = I_1 \cos \varphi_1 = I_q$ . Bunday holatda generator quvvat koeffitsiyenti  $\cos \varphi_1 = 1$  bo'ladi. Qo'zg'otish tokining generator

har xil yuklanishlariga mos bo'lgan  $\cos \varphi_1 = 1$  dagi tavsifi 12.7-rasmda punktir chiziq bilan ko'rsatilgan.

Ushbu tavsiflarning  $\cos \varphi_1 = 1$  dagi biroz o'ng tomonga surilishi shuni ko'rsatadiki, yuklanish ortishi bilan  $\cos \varphi_1 = 1$  ga mos keluvchi qo'zg'atish toki biroz ortadi. Bunda yuklanish ortishi bilan aktiv kachlanish pasayuvini kompensatsiyalash uchun qo'shimcha qo'zg'atish toki talab etiladi.

Shuni e'tiborga olish zaruki, qo'zg'atish tokini asta kamaytirish natijasida, uning shunday minimal qiymatiga erishiladiki, qo'zg'atish toki hosil qilgan asosiy magnit oqim shunchalar susayadiki, sinxron generator sinxronizmdan chiqib ketadi - rotor qo'zg'atgan magnit qutblari bilan stator aylanuvchi magnit maydoni orasidagi magnit bog'lanish buziladi.

Generator isroflarini kamaytirish maqsadida, qo'zg'atish chulg'amining toki shunday qiymatga rostlanishi maqsadga muvofiqki, unda statorning tokini minimal, ya'ni  $\cos \varphi_1 = 1$  bo'lsin. Ammo, ko'pgina hollarda generator yuklanishi induktiv xarakterga ega bo'lib, ularni kompensatsiyalash maqsadida generatorni biroz o'taqo'zg'atish rejimida ushlab zarur bo'ladi. Bunda stator toki  $i_1$  tarmoq kuchlanishidan fazasi bo'yicha biroz ilgari ketishiga imkon yaratiladi.

### Nazorat savollari

1. Sinxron generatorni parallel ishlash uchun sinxronizatsiyalash degani nima?
2. Parallel ishlash uchun ulangan generatorna qanday yuklash mumkin?
3. Sinxron generator stator zanjirida yuklanish toki paydo bo'lishi bilan nima uchun birlamchi motor mexanik yuklanadi?
4. Statik o'ta yuklanganlik koeffitsiyenti nima?
5. V-simon tavsif deb nimaga aytiladi?
6. Nima uchun parallel ishlayotgan generator yuklanishi ortishi bilan  $\cos \varphi_1 = 1$  bo'lgan nuqta o'ng tomon siljiydi?

## 13-bob. SINXRON MOTOR VA SINXRON KOMPENSATOR

### 13.1. Sinxron motorning ishlash prinsipi

Elektr mashinalarning qaytuvchanlik prinsipi asosida sinxron mashina, na faqat generator rejimida, balki motor rejimida ham ishlashi mumkin, ya'ni tarmoqdan elektr energiya istemol qilib, uni mexanik energiyaga aylantiradi.

Sinxron motor ishlash prinsipini tushuntirish uchun, katta quvvatli tarmoq bilan parallel ishlash uchun ulangan sinxron generatorni tasavvur etaylik.

Faraz qilaylik, birlamchi motor generator rotorini soat miliga teskari yo'nalishda  $\omega_1$  burchak tezligida aylantirsin. Bunda generator yuklanishi shunday bo'lsinki, rotor qutblari bo'ylama o'qlari  $d-d'$  aylanuvchi magnit maydon o'qlari  $d'-d'$  dan rotor aylanish yo'nalishi bo'ylab  $\theta'$  burchakka siljisin (13.1-rasmda 1-kvadrant yoki o'ng tomon).

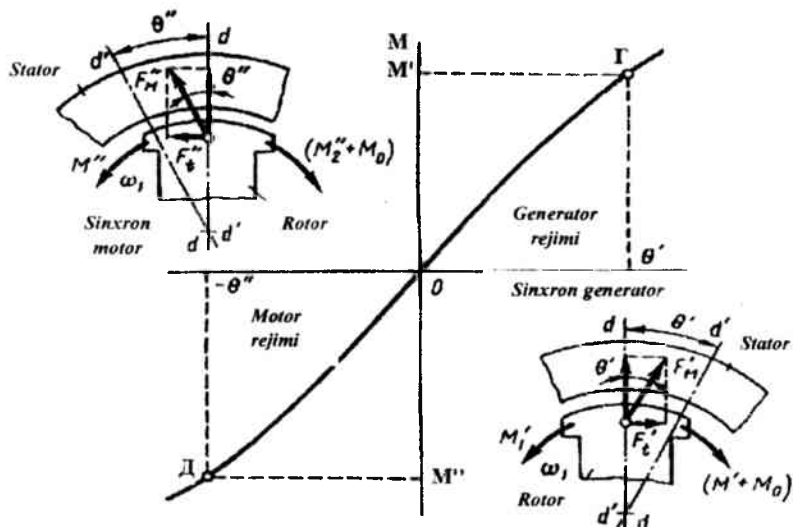
Birlamchi motorning aylantiruvchi momenti  $M'_1$  generatorning elektromagnit momenti  $M'$  va yuksiz ishlash momenti  $M_0$  bilan ( $M'_1 = M' + M_0$ ) muvozanatlanadi. Burchak tavsifida (13.1-rasm) ushbu rejimga  $G$  nuqtasi mos keladi.

Agar aylantiruvchi moment  $M'_1$ ni kamaytirsak, generator yuklanish ham kamayadi, bunda burchak  $\theta'$  ham kamayadi, natijada stator toki  $I_1$  kamayadi.

Natijada elektromagnit moment  $M'$  qiymati kamayadi va aylantiruvchi moment  $M'_1 = M_0$  bo'lganda burchak  $\theta = 0$ , ya'ni generator YU.i.rejimida ishlaydi ( $I_1 = 0$ ). Bu rejimga burchak tavsifida koordinata boshi mos keladi (13.1-rasmda  $\theta$  nuqtasi). Agar sinxron mashina valini birlamchi motor validan uzib qo'yilssa va valda tormozlovchi moment hosil qilinsa, ya'ni rotor aylanish yo'nalishiga qarama-qarshi yuklanish momenti  $M_2$  hosil qilinsa, u holda EYK  $\vec{E}_0$  vektori YU.i.rejimi holatiga nisbatan  $\theta$  burchakka

orqada qolish yoʻnalishida siljiydi (13.1-rasm, 3-kvadranti). Bunda stator chulgʻami zanjirida natijaviy EYK hosil boʻladi va u stator chulgʻamida  $i_1$  tokni hosil qiladi.

Stator toki  $I_1$  rotor bilan sinxron aylanuvchi,  $d'-d'$  qutblari rotor qutblari  $d-d$  ga nisbatan  $\theta$  burchakka siljigan magnit maydon hosil qiladi. Faraz qilaylik, motor burchak tavsifining  $D$  nuqtasida ishlasin (13.1-rasm, 3-kvadranti). Unga  $\theta'$  burchagi mos keladi.



13.1-rasm. Sinxron mashinaning generator rejimidan motor rejimiga oʻtishi

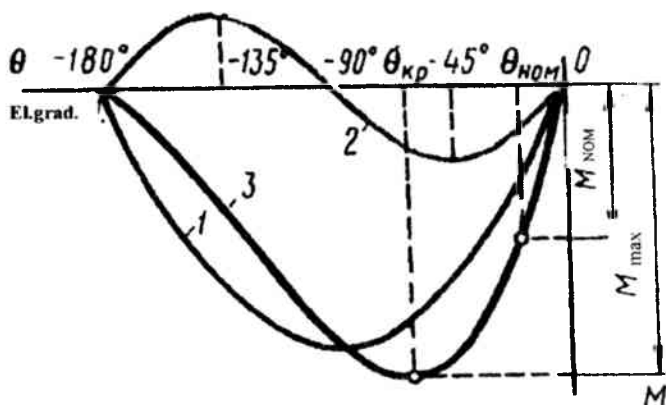
Bunda magnit qutblari taʼsiri natijasida hosil boʻlgan tangensial tashkil etuvchilar  $F_r'' = F_{s1}'' \sin \theta''$  motor rotorida aylanuvchi magnit maydon yoʻnalishi boʻyicha elektromagnit moment hosil qiladi va rotorni  $\omega_1$  burchak tezligi bilan aylantiradi. Bunda sinxron mashina tarmoqdan elektr energiyani isteʼmol qiladi va uni mexanik energiyaga aylantiradi. Aylantiruvchi elektromagnit moment  $M''$  valda YU.i.momenti  $M_0$  bilan foydali moment  $M_2''$  ni hosil qiladi va ijrochi mexanizm yoki motorning yuklanishi aylantiriladi.

$$M'' = M_0 + M_2''.$$



Sinxron motorning barcha qiymatlari burchak tavsifida koordinata o'qlarining manfiy yo'nalishlarida belgilanadi, chunki generator rejimidan motor rejimiga o'tishda elektromagnit moment o'z yo'nalishini o'zgartiradi. Sinxron generatorning tarmoqqa uzatayotgan musbat ishorali quvvati o'rnida sinxron motorning tarmoqdan olayotgan manfiy ishorali quvvati qo'yiladi. Motor rejimida manfiy ishoralari bilan belgilash qulaysizliklari o'rniga, sinxron motorlarni tahlil qilganimizda shartli ravishda barcha qiymatlarni musbat ishora bilan belgilashni qabul qilamiz.

Sinxron motorning elektromagnit quvvati quyidagi ifoda bilan aniqlanadi (12.7) va (12.8), elektromagnit moment esa - (12.9) va (12.10).



13.2-rasm. Sinxron motorning burchak tavsifi

Elektromagnit momentning burchak tavsiflari  $M = f(\theta)$  va uning tashkil etuvchilari  $M_{ocn} = f(\theta)$  va  $M_p = f(\theta)$  13.2-rasmida keltirilgan. Bu tavsiflar generator burchak tavsifidan (12.5-rasmga qarang) faqat shu bilan farq qiladilarki, ular koordinata o'qlarining uchinchi kvadrantida joylashgan, ya'ni burchak  $\theta$  va momentlar  $M$  va  $M_{ocn}$  ning manfiy ishoralari bilan ifodalangan  $\theta = 0 \div (-90^\circ)$ .

Shunday qilib, sinxron mashinaning burchak tavsifi natijaviy momentning ikki yarim to'liqini sifatida namoyon bo'ladi: musbat, generator rejimiga mos keluvchi (12.5-rasm), va manfiy, motor

rejimiga mos keluvchi (13.2-rasm). Mashinaning bir rejimdan ikkinchi rejimga o'tishi burchak  $\theta = 0$  orqali o'tishi bilan amalga oshiriladi.

Sinxron motor turg'un ishlashi burchak tavsifining  $\theta = 0 \div \theta_p$  qismiga mos keladi (13.2-rasm).

Maksimal elektromagnit momentning  $M_{\max}$  nominal inoment  $M_{\text{nom}}$  ga nisbati [(12.16) ga qarang] sinxron motorning o'ta yuklanganlik qobiliyati deyiladi

$$\lambda = M_{\max} / M_{\text{nom}} .$$

Aksariyat, sinxron motorning o'ta yuklanganlik qobiliyati  $\lambda = 2 \div 3$ , bu motorning nominal yuklanishida  $\theta_{\text{nom}} = 30 \div 20$  el. grad.ga mos keladi.

Sinxron motorning rotori faqat sinxron tezlikda  $n_1 = f_1 60 / p$  aylanishi mumkin. Bunga ishonch hosil qilish uchun quyidagini ko'rib chiqish etarlidir: faraz qilaylik, motor rotori  $n_2 < n_1$  tezlik bilan aylanayapti, deb. Biror vaqt o'tgandan so'ng magnitlangan rotor qutblari statorning aylanayotgan magnit maydomi bir xil qutblari ro'parasida bo'ladi. Shunda stator va rotor magnit qutblari orasidagi magnit bog'lanish buziladi, chunki ularning bir xil nomlangan qutblari o'z-aro itariladi va rotor, aylantiruvchi elektromagnit momentning turg'un ta'siridan maxrum bo'ladi va rotor to'xtaydi.

Sinxron motor rotorining faqat sinxron tezlik bilan aylanishi - bu motorlarning xarakterli xususiyatini tashkil etadi va, aksariyat, motorlarning tatbiq etish doirasini aniqlab beradi (masalan, stabil aylanish tezligi bo'lishini talab etuvchi yuritmalar).

Sinxron motor valida yuklanish o'zgariganda burchak  $\theta$  o'zgaradi. Bunda, agregatning aylanuvchi massalari inersiyasi ta'sirida, rotor bir onda yangi yuklanishga mos bo'lgan holatga o'ta olmaydi, balki, biror muddat tebranma harakatda bo'ladi.

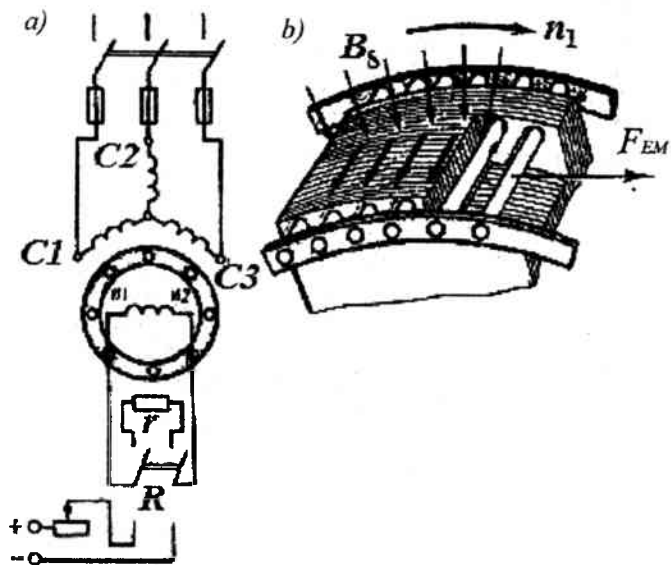
Tuzilishi bo'yicha sinxron motorlar, sinxron generatorlardan prinsipial farq qilmaydilar, ammo alohida xususiyatlari mavjud. Ular, aksariyat, ayon qutbli  $2p = 6 \div 24$  tarzda quriladi; havo orligi bir xil quvvatli motorlarda generatorlardagiga nisbatan kichik, bu bir qator parametrlarning yaxshilanishiga olib keladi (masalan, ishga tushirish

toki kamayishi). Dempfer (so'ndiruvchi) chulg'amm katta kesim yuzasiga ega bo'lgan sterjenlardan bajariladi, chunki ishga tushirish rejimida u ishga tushirish chulg'ami xizmatini bajaradi; qutb uchligining kengligi generatorlardagi  $0,7r$  o'rniga motorlarda  $0,9r$  qabul qilinadi. Shu sababli, sinxron mashinalar qaytuvchanlik xususiyatiga ega bo'lsalar ham, sanoat korxonalarida ishlab chiqarilayotgan sinxron mashinalar, lyoki motor sifatida, yoki generator sifatida maqsadli qo'llaniladi.

### 13.2. Sinxron motorlarni ishga tushirish

Sinxron motor, asinxron motordagidek, stator chulg'amini bevosita tarmoqqa ulab ishga tushirib bo'lmaydi. Chunki, stator chulg'amining aylanuvchi magnit maydoni sinxron aylanish tezligiga bir onda erishsa, rotor o'zining inersiyali ekanligi bilan bir onda sinxron aylanish tezligiga tortila olmaydi. Natijada, stator va rotor orasida turg'un magnit bog'lanish sodir bo'lmaydi. Sinxron motorni ishga tushirishda maxsus usullar qo'llaga to'g'ri keladi. Bu usullarning mohiyati shundaki, rotorni avvaldan sinxron yoki sinxronga yaqin tezlikda aylantirilib, stator va rotor orasida magnit bog'lanishni hosil qilmadi.

Hozirgi kunda "asinxron ishga tushirish" deb nomlangan usul ko'proq qo'llanmoqda. Bu ishga tushirish usuli rotorning uchligida joylashgan ishga tushirish chulg'ami mavjud bo'lganda qo'llanilishi mumkin. Bunday usulni qo'llash motorni ishga tushirilish sxemasi 13.3,*a*-rasmدا keltirilgan. Qo'zg'atish toki nolga teng bo'lgan sinxron motori stator chulg'ami tarmoqqa ulanadi. Magnit o'zakdagi aylanuvchi magnit maydoni ishga tushirish chulg'amining sterjenlarida EYK induktivlaydi va  $I_2$  tok hosil qiladi. Bu toklarning stator magnit maydoni bilan o'zaro ta'siri ishga tushirish chulg'ami sterjenlarida elektromagnit kuch  $F_{EM}$  hosil qiladi. Bu kuchlar ta'sirida rotor aylana boshlaydi (13.3,*b*-rasm). Rotor sinxron aylanish tezligi ( $n_2 \approx 0,95n_1$ )ga yaqin tezlikda aylanaboshlash bilan qo'zg'atish chulg'ami o'zg'armas tok manbaiga ulanadi. Bunda hosil bo'lgan sinxron moment (12.10) motor rotorini sinxronizmga tortadi.



**13.3-rasm.** Sinxron motorni asinxron ishga tushirish: *a*-ishga tushirish sxemasi; *b*-qutbdagi ishga tushirish chulg‘ami

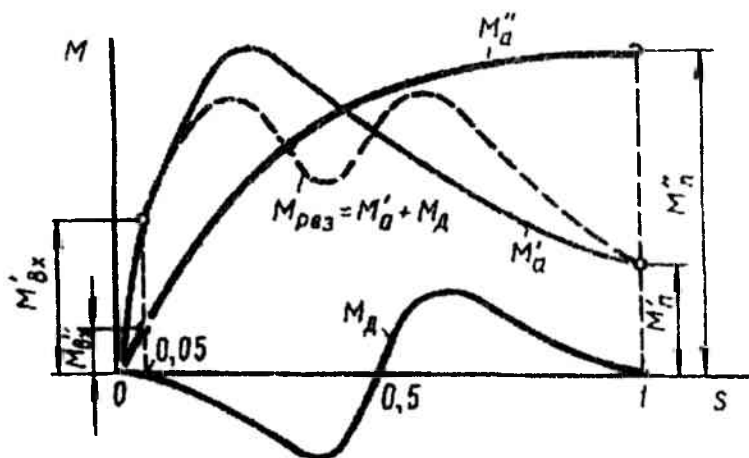
Motor validagi yuklanish qancha kichik bo‘lsa, shunchalar u sinxronizmga engil tortiladi. Ayon qutbli kichik quvvatli sinxron motorlar, yuklanishsiz ishga tushirilganda, ba‘zan faqat reaktiv moment hisobiga, ya‘ni qo‘zg‘atish chulg‘amini ulamasdan sinxronizmga tortiladi.

Valdagi yuklanish momentining ortishi bilan motorning sinxronizimga tortilishi qiyinlashadi. Sinxron motor rotori sinxronizmga tortilish imkoni bo‘lgan valdagi eng katta yuklanish momenti, motor kirish momenti  $M_{\text{kip}}$  deyiladi. Aylanish tezligi ( $n_2 \approx 0,95n_1$ )dagi asinxron moment  $M_a$  ishga tushirish chulg‘ami sterjenining aktiv qarshiligi, ya‘ni sterjen kesim yuzasi va sterjen yasalgan metallning solishtirma elektr qarshiligiga bog‘liq (13.3,*b*-rasm)

Shuni ta‘kidlash zarurki, katta ishga tushirish momenti ( $M^*$ )hosil qilish uchun ishga tushirish chulg‘ami sterjeni qarshiligi  $r_2'$ ni tanlash, sinxronizmga kirish momenti ( $M_{\text{kip}}^*$ )kamaytirishga va, aksincha, kichik

ishga tushirish momenti ( $M''_a$ )ga mos qarshilik  $r_2$  ni tanlashda, sinxronizmga kirish momentini kattalashtiradi ( $M''_{kr} > M''_{kr}$ ).

Asinxron ishga tushirish jarayonida qo'zg'atish chulg'amini ochiq qoldirib bo'lmaydi, chunki boshlang'ich chog'larida sinxron tezlik bilan aylanayotgan stator magnit maydoni qo'zg'atish chulg'amini kesib o'tib, unda EYK induktivlaydi. Katta o'ramlar soniga ega bo'lganlik uchun, ushbu EYK shunday katta qiymatli bo'ladiki, qo'zg'atish chulg'ami izolyatsiyasiga va xizmat qiluvchi personalga xavf soladi. Buni bartaraf etish uchun, qo'zg'atish chulg'ami rotor tezlik olgungacha bo'lgan davrga, kattaligi qo'zg'atish chulg'ami qarshiligidan taxminan 10 marta katta bo'lgan aktiv qarshilik  $r$  ga tutashtiriladi. Qo'zg'atish chulg'ami boshi va keti klemmalari II va I2 qarshilik  $r$  bilan qayta ulash R qayta ulagich yordamida amalga oshiriladi (13.3, a-rasmga qarang).



**13.4-rasm.** Sinxron motorni ishga tushirishda asinxron momentlar:  $M_a$ -asosiy moment;  $M_k$ -qo'shimcha moment;  $M_{kr}$ -sinxronizmga kirish momenti.

Sinxron motorni ishga tunirish vaqtida qo'zg'atish chulg'amini qisqa tutashtirish tavsiya etilmaydi, chunki rotor chulg'ami g'altagi bir fazali berk kontur hosil qiladi. Uning stator aylanuvchi magnit maydoni bilan o'zaro ta'siri qo'shimcha asinxron moment  $M_d$  hosil

qiladi. Biroq, sinxron tezlikning yarmida bu moment tormozlovchi momentga aylanadi va ishga tushiruvchi (asinxron) moment (13.4-rasmda punktir chiziq) tavsifida o'ralik (proval) hosil qiladi. Bu sinxron motorning ishga tushirish xususiyatlarini sezilarli darajada pasaytiradi.

Sinxron motorni asinxron ishga tushirishda katta ishga tushirish toki mavjud. Shu sababli sinxron motorni bevosita tarmoqqa ulash, nominal kuchlanish berish faqat tarmoq katta quvvatli bo'lganda, (nominal tokdan besh – etti marta katta) ishga tushirish toki sababli sezilarli kuchlanish pasayuviga chidamli bo'lgan tatbiq etish mumkin. Agar tarmoq quvvati etarli bo'lmasa, motorni kuchlanishni pasaytirib ishga tushirish mumkin (avtotransformatorli yoki reaktorli).

Yuqorida keltirilgan ishga tushirish usullar tahlilidan shuni ko'rish mumkinki, bu usullar kichik va o'rta quvvatli sinxron motorlar uchun taalluqlidir.

**Katta quvvatli sinxron motorlarni ishga tushirish.** Tog'-kon sanoati korxonalarida katta quvvatli boshqa turdagi (asinxron, o'zgarmas tok mashinalari) elektr motorlarini ishlatish imkoni bo'lmaganligi (rotor aylanish tezligga o'zgarmas bo'lishi), sababli sinxron mashinalar ishlatilmoqda. Ammo, sinxron motorning eng katta kamchiligi, uni ishga tushirish va zarur bo'lganda rotor aylanish tezligini boshqarishdir.

Katta quvvatli sinxron motorlarni ishga tushirishda, aksariyat, ular valida yuklanishning mavjudligi, kuchlanishni pasaytirish usuli qo'llashni cheklaydi. Bevosita stator chulg'amini nominal kuchlanishli tarmoqqa ulab ishga tushirishda katta stator tokining (nominal tokdan 5-7 marta katta) birnecha minut davomida oqishi; stator chulg'ami o'taqizib ketishi; atrofdagi parallel ta'minlanayotgan boshqa jihozlarning kuchlanishi pasayishiga olib keladi.

Oxirgi vafqtda yarim o'tkazgichli o'zgartkichlar texnikasi va kompyuter texnologiyalari fanining rivojlanishi natijasida sanoatda sinxron motor stator chulg'ami tokining chastotasini o'zgartirib ishga tushirish usul qo'llanila boshladi. Bunda stator toki chastotasi  $f_1$  va stator magnit maydoni aylanish chastotasi  $n_1$  orasidagi bog'lanish (9.4) asosida quyidagi takliflar kiritiladi. Stator chulg'amiga uzatilayotgan tokning chastotasini 0 dan  $f_{1,NOM}$  gacha ravon oshirib,

$n_1$  ni  $n_{NOM}$  gacha o'zgartiriladi. Buni amalga oshirish uchun yarim o'tkazgichli CHO'lari qo'llaniladi (9.5-rasm), ular stator chulg'ami kuchlanishining ham chastotasini, ham amplitudasini ma'lum qonuniyat asosidagi o'zgarishini ta'minlaydi.

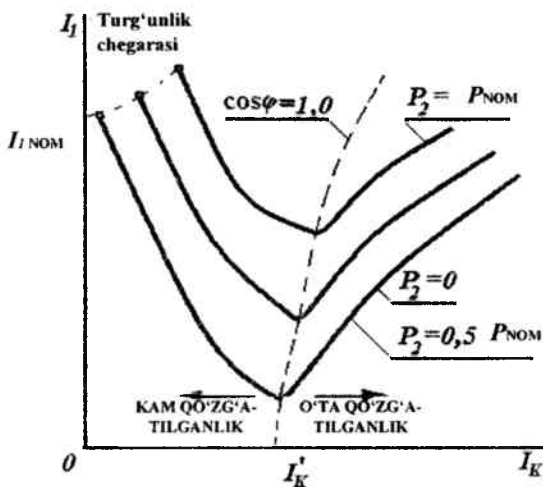
### 13.3. Sinxron motor tavsiflari

**Sinxron motor V-simon tavsifi.** Sinxron motor ishiash jarayonida stator chulg'amida EBK induktivlanadi, ularning yig'indisi  $\sum \dot{E}$  [(11.29)ga qarang] taxminan tarmoq kuchlanishi  $\dot{U}_c$  ga teng. Bu EYKlar yig'indisi ikki MYK qo'zg'atish chulg'ami  $F_B \equiv I_B$  va stator chulg'ami  $F_1 \equiv I_1$  o'zaro ta'siri natijasida hosil bo'lgan natijaviy magnit oqimga ekvivalentdir.

Tarmoq kuchlanishi o'zgarimas bo'lsa  $\dot{U}_{Tarmoq} \approx -\sum \dot{E}$  natijaviy manit maydon o'zgarimas bo'ladi. Shu sababli qo'zg'atish MYK  $F_k$  (qo'zg'atish toki  $I_k$ ) o'zgarganda stator MYK  $F_1$  shunday o'zgaradiki, ularning o'zaro ta'siri o'zgarmaydi, ya'ni sinxron motorning natijaviy magnit maydoni o'zgarmaydi. MYK  $F_1$  bunday o'zgarishi faqat stator chulg'ami tokining qiymati  $I_1$  va fazasi o'zgarishi bilan sodir bo'ldi, ya'ni stator tokining reaktiv tashkil etuvchisi  $I_d$  o'zgaradi. Elektromagnit moment o'zgarimas bo'lganligi uchun stator tokining aktiv tashkil etuvchisi  $I_1 \cos \varphi = const$  o'zgarmaydi.

Masalan, qo'zg'atish toki  $I_k$  o'zining eng kichik qiymati ( $I_k \approx 0$ ) dan ortganda rotor MYK ortadi, bunda stator MYK kamayadi. Bu MYK kamayishi (tarmoq kuchlanishi  $\dot{U}_c$  ga nisbatan) induktiv  $I_d$  bo'lgan, stator tokining kamayishi bilan birga bo'ladi.

Bunda statorning to'la toki  $i_1 = i_q + i_d$  kamayadi, motor quvvat koeffitsiyenti  $\cos \varphi_1$  esa ortadi. Qo'zg'atish tokining biror  $I_k$  qiymatida stator tokining induktiv tashkil etuvchisi nolgacha kamayadi. Ushbu holatda stator toki (mazkur yuklanish uchun) minimal qiymatga erishadi, chunki  $i_1 = i_q$  tok sof aktiv bo'ladi, shunda quvvat koeffitsiyenti  $\cos \varphi_1 = 1$  bo'ladi.

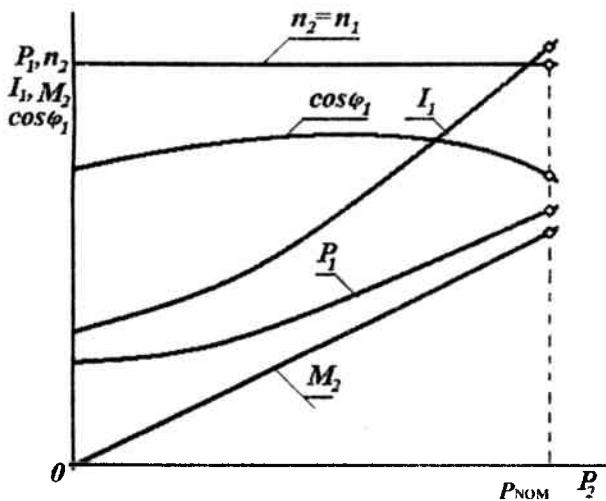


13.5-rasm. Sinxron motor V-simon tavsifi

Qo'zg'atish tokini  $I'_k$  dan oshirilsa, ya'ni motor o'ta qo'zg'atilganda, stator toki  $I_1$  ortadi, ammo endi bu tok tarmoq kuchlanishi  $\dot{U}_{Tarmoq}$  ga nisbatan ildamlovchi (sig'im xarakterda) bo'ladi. Shunday qilib, sinxron motor kam qo'zg'atilgan ( $I_k < I'_k$ ) bo'lsa, motor kechikuvchi tokli, o'ta qo'zg'atilgan ( $I_k > I'_k$ ) bo'lsa - ildamlovchi tokli bo'ladi. Sinxron motor uchun stator tokining qo'zg'atish tokiga bo'lgan bog'liqligi, ya'ni V-simon tavsifi 13.4-rasmda keltirilgan. Unda qo'zg'atish toki  $I'_k$  qiymatiga sinxron motorning quvvat koeffitsiyenti  $\cos\phi_1 = 1$  mos keladi. Motor o'ta qo'zg'atilgan bo'lsa stator chulg'amida ildamlovchi tok hosil bo'ladi. bshqacha qilib aytganda, sinxron motori reaktiv tok generatori hisoblanadi: kam qo'zg'atilgan bo'lsa, tarmoq kuchlanishiga nisbatan induktiv va o'ta qo'zg'atilgan rejimda esa sig'imli hisoblanadi. Sinxron motorlarning ushbu xususiyati ularning yaxshi sifati bo'lib, elektr qurilmalari quvvat koeffitsientini oshirish uchun qo'llaniladi.

Tarmoq bilan parallel ishlayotgan sinxron generatorlarga o'xshash (12.2ga qarang), sinxron motorlarda minimal qo'zg'atish toki bo'lganda turg'unlik chegarasiga ega (13.5-rasmda punktir chiziq).





13.6-rasm. Sinxron motor ishchi tavsiflari

**Ishchi tavsiflari.** Sinxron motor ishchi tavsiflari deb, rotor aylanish tezligi  $n_2$ , iste'mol qilmayotgan quvvat  $P_1$ , foydali moment  $M_2$ , quvvat koeffitsiyenti  $\cos \varphi_1$  va stator chulg'amidagi tok  $I_1$  ning motor foydali quvvati  $P_2$  ga bog'liqligiga aytiladi (13.6-rasm). Rotorning aylanish tezligi  $n_2$  doimo sinxron tezlik  $n_1 = f_1 60 / p$  ga teng, shuning uchun  $n_2 = f(P_2)$  tavsifi absissa o'qiga parallel bo'lgan to'g'ri chiziqdan iborat. Ishchi tavsiflarni tarmoq kuchlanishi chastotasi o'zgarmas  $f_1 = \text{const}$  va  $\omega_1 = \text{const}$ , degan shart bilan olinishi sababli  $M_2 = f(P_2)$  grafigi koordinata boshidan chiqqan to'g'ri chiziqni eslatadi. Motor kirishidagi quvvat  $P_1 = P_2 + \Sigma P$ . Motor validagi yuklanish ortishi bilan quvvat isroflari  $\Sigma P$  ham ortadi, shu sababli motor iste'mol qilayotgan quvvat  $P_1$  valdagi foydali quvvat  $P_2$  dan tezroq o'sadi va uning grafigi  $P_1 = f(P_2)$  nochiziqli bo'ladi.

Quvvat koeffitsiyenti  $\cos \varphi_1 = f(P_2)$  tavsifining shakli qo'zg'atish tokini sozlash rejimiga bog'liq: agar YU.i.rejimida qo'zg'atish tokini shunday o'rnatilsaki, unda  $\cos \varphi_1 = 1$  bo'lsa, u holda motor yuklanishi ortishi bilan quvvat koeffitsiyenti kamayadi, tavsif pasahvchi bo'ladi; agar nominal yuklanishda  $\cos \varphi_1 = 1$  o'rnatilsa, kam yuklanish

bo'lganda motor tarmoqdan reaktiv ilgarilovchi tokni oladi, o'ta yuklanganda esa – kechikuvchi tokni oladi. Aksariyat, qo'zg'atish tokini shunday o'rnatiladiki, unda yuklanish o'rtacha bo'lganda  $\cos \varphi_1 = 1$  o'rnatiladi. Shunday vaziyatda quvvat koeffitsiyenti yuklanish o'zgarishining barcha diapazonida katta qiymatda bo'ladi. Agar qo'zg'atish tokini shunday o'rnatilsaki, unda yuklanish nominal qiymatidan yuqoriroq bo'lganda quvvat koeffitsiyenti  $\cos \varphi_1 = 1$  etib rostlansa, u holda nominal yuklanishda  $\cos \varphi_1 = 0,8$  bo'ladi va motor tarmoqdan kuchlanishga nisbatan ilgarilovchi tok istemol qiladi, bu esa tarmoqning quvvat koeffitsiyentini oshiradi. Bu xususiyati bilan sinxron motori asinxron motorlarga nisbatan farqli bo'lib, ta'minlovchi tarmoqning energetik ko'rsatkichlarini yaxshilaydi.

Motor statoridagi tokning qiymati quyidagicha aniqlanadi:

$$I_1 = \frac{P_1}{m_1 U_1 \cos \varphi_1}.$$

Bu ifodadan ko'rinadiki, yuklanish ortishi bilan quvvat koeffitsiyenti  $\cos \varphi_1$  kamayishi sababli, statorning toki  $I_1$  iste'mol qilina-yotgan quvvat  $P_1$  ga nisbatan tezroq ortayapti.

Sinxron motor rotorining aylanish yo'nalishi stator magnit oqimi aylanish yo'nalishi bilan mos. Ular aylanish yo'nalishi tarmoq uch fazasining ketma-ketligiga bog'liq. Aylanish yo'nalishini o'zgartirish uchun uch fazadan ikkisining o'rni almashtiriladi.

Xulosa qilib shuni aytish zarur: sinxron motorlar asinxron motorlarga nisbatan afzalligi shundaki, ular tarmoqda qo'shimcha quvvat isroflari hosil qiluvchi induktiv toklar hosil qilmaydi va  $\cos \varphi_1 = 1$  ushlab turish imkoniyatiga ega. Undan ham ortiqroq, sinxron motorni o'ta qo'zg'atish rejimida ishlatib, tarmoq uchun sig'im toklarini ishlab chiqarish mumkin, bu esa energetika tizimining quvvat koeffitsiyentini oshiradi. Sinxron motorning yana bir afzalligi shundaki, (12.11) ifodaga kshra, elektromagnit momentning asosiy tashkil etuvchisi stator kuchlanishi  $U_1$  ga proporsional, asinxron motorlarda esa bu bog'liqlik kuchlanishning kvadrati bilan  $U_1^2$  ifodalanadi. Shu sababli, tarmoq kuchlanishi pasayganda, sinxron

motor, asinxron motorga nisbatan, o'zining o'tayuklanuvchanlik xususiyatini ko'proq saqlab qoladi.

Sinxron motorlarning kamchiligi – qisqa tutashgan rotorli asinxron motorlarga nisbatan tuzilishining murakkabligiga va narxining balandligidir. Undan tashqari, sinxron motorning ishlashi uchun qo'zg'atish chulg'amini o'zgarmas tok bilan ta'minlaydigan qurilma bo'lishi zarur.

Ekspluatatsiya natijalari shuni ko'rsatdiki, sinxron motorlarni quvvati 200 KВт va undan katta, tez-tez ishga tushirish va boshqarish zarurati bo'lmagan qurimalarda (ruda tegirmonlari, katta quvvatli nasoslar, ventilyatorlar, kompressorlar va h.k.) ishlatish maqsadga muvofiq bo'ladi.

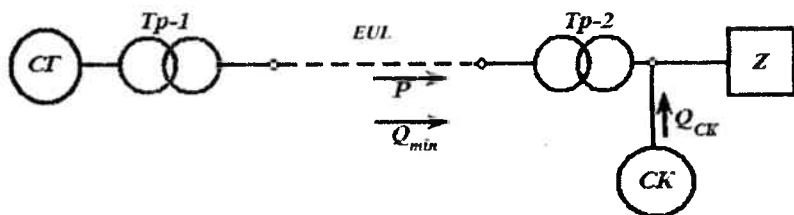
### **13.4. Sinxron kompensator**

Sinxron kompensator (SK) shunday sinxron mashinaki, reaktiv quvvatni generatsiya qilish uchun qo'llaniladi. Sinxron kompensatormi elektr tarmoqqa, uning quvvat koeffitsiyentini oshirish uchun kiritiladi.

Iste'molchilar uchun (elekt motorlar, transformatorlar va boshqa induktiv yuklamalar) elektr energiyaning faqat aktiv tashkil etuvchisi emas, balki reaktiv tashkil etuvchisi ham o'ta zarur. Reaktiv energiya ularda magnit maydon hosil vazifasini bajaradi, xolos. Foydali ish bajarmaydi, generator va iste'molchi orasidagi elektr uzatish liniyasida (EUL) sirkulyatsiya qilib, unda Joul isroflarini hosil qiladi. EUL o'tkazgichlaridan oqayotgan tokning zichligi cheklanganligi sababli, liniyada energiyaning aktiv tashkil etuvchisini istemolchiga yetkazib berishda halal beradi.

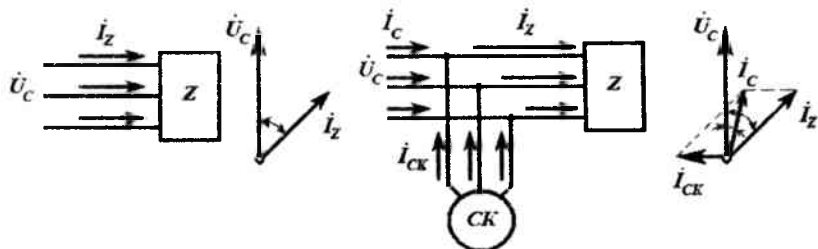
SKning qo'llanishidan maqsad, iste'molchilarga zarur bo'lgan reaktiv quvvatni elektr stansiyada o'rnatilgan sinxron generator emas, balki iste'molchi yaqinida o'rnatilgan sinxron kompensator ishlab chiqaradi. Bu kabi katta reaktiv quvvat talab etuvchi iste'molchilar, asosan transformator, asinxron motor va reaktori mavjud bo'lgan korxonalaridir. Quyida keltirilgan 13.7-rasmda sinxron generator (SG), kuchaytiruvchi va pasaytiruvchi transformatorlar (Tr-1 va Tr-2), EUL, iste'molchi (Z) va iste'molchining bevosita kirish

klemmalariga ulangan sinxron kompensator (SK)larni o'z ichiga olgan elektr energetik tizimning prinsipial sxemasi ko'rsatilgan.



13.7-rasm. Sinxron kompensator elektr tarmog'iga ulanishi

Tarmoqqa ulangan SK, valida yuklamasi bo'lmagan ( $P_2 = 0$ ), ya'ni YU.i.rejimidagi sinxron motor kabi ishlaydi va iste'molchi Z (masalan, asinxron motorlar guruhi) uchun zarur bo'lgan  $Q_{ca}$  reaktiv quvvat ishlab chiqaradi. Natijada, SG va EULning reaktiv quvvati minimal qiymatga  $Q_{min}$  cha pasaytiriladi.



13.8-rasm. Sinxron kompensatorni tarmoq quvvat koeffitsiyentini oshirish uchun qo'llash

Elektr tarmog'iga SK kiritish bilan bog'liq jarayonni tutuntirish uchun 13.8-rasmdagi sxema ishlashini ko'raylik. Kuchlanishi  $U_c$  bo'lgan tarmoqqa Z iste'molchini kiritilganda (13.8,a-rasm) undagi mavjud katta induktiv yuklanish hisobiga tarmoqda  $U_c$  kuchlanishdan  $\varphi_2$  burchakka kechikuvchi  $I_z$  toki oqa boshlaydi. Z iste'molchiga parallel SK ulanganda va SKda o'ta qo'zg'atilganlik rejimi

o'rnatilganda (13.8,b-rasm) tarmoq  $\dot{U}_c$  kuchlanishiga nisbatan  $90^\circ$  burchakka ilgarilab ketuvchi  $\dot{I}_{CK}$  toki hosil bo'ladi. Tarmoqdagi natijaviy tok

$$\dot{I}_c = \dot{I}_z + \dot{I}_{CK}. \quad (13.1)$$

Bu tokning tarmoq kuchlanishi  $\dot{U}_c$  ga nisbatan faza siljishi ( $\varphi_c$  burchak) SK ulangunga qadar bo'lgan faza siljishidan ancha kichik ( $\varphi_z$  burchak). Bundan tashqari, SK ulanishi bilan  $I_c$  kamayadi ( $I_c < I_z$ ). Bunga iqror bo'lish uchun quyidagi fikrlarni ko'rib chiqamiz: SK valida yuksiz bo'lmagani sababli, uning aktiv quvvati kichik va kompensator YU.i.isroflariga teng. Bu isroflarni e'tiborga olmay, SK ulangunga qadar bo'lgan tarmoqdagi aktiv quvvatni

$$P_c = P_z = \sqrt{3}I_zU_c \cos \varphi_z \quad (13.2)$$

SK ulangandan keyingi tarmoq aktiv quvvatiga tenglashtirish mumkin:

$$P'_c = \sqrt{3}I_cU_c \cos \varphi_c. \quad (13.3)$$

Ifodalar (13.2) va (13.3)dagi quvvatlarni teng deb qabul qilsak  $P_c = P'_c$ , quvvat koeffitsiyentlari  $\cos \varphi_c > \cos \varphi_z$  va toklar  $I_c < I_z$  bo'ladi. Natijada sinxr generator va EUL reaktiv quvvatdan ozod bo'lib, ulardagi quvvat isroflari kamayadi.

Ba'zi holatlarda SK chala qo'zg'atilgan rejimda ishlaydi. Bunga zarurat paydo bo'lishi, tarmoqda ko'p miqdorda sig'im (reaktiv) yuklanishi bo'lib, istemolchi yuklanishining induktiv tashkil etuvchisi uni kompensatsiya qila olmaydi (Masalan, iste'molchining ko'plab induktiv yuklanishi vaqtincha o'chirilgan holat). Aksariyat SKning qo'zg'atish darajasi avtomatik uskunalar yordamida boshqariladi.

Sinxron kompensatorlar EULda uzoq masofalarga energiya uzatishda ham ishlatiladi. Katta induktiv yuklamali liniya oxirida (istemolchida) kuchlanish liniya boshlanishidagidan ancha kichik bo'lishi mumkin; kichik yuklanishlarda, aksincha, liniyadagi sig'im

yuklanishlari ta'sirida liniya oxiridagi kuchlanish, liniya boshlanishidagi kuchlanishdan yuqori bo'lishi mumkin. Agar liniya oxirida (istemolchilarda) SK ulansa va katta yuklanishlarda o'ta qo'zg'atilganlik rejimida, kichik yuklanishlarda esa chala qo'zg'atilganlik rejimida ishlatilsa, u holda liniya oxiridagi kuchlanishni o'zgarmas qiymatda saqlash mumkin.

SKlarning qizish jarayoni ildamlovchi toklar (o'ta qo'zg'atilganlik rejimi)da, kechikuvchi tokdagiga nisbatan (chala qo'lg'otilganlik rejimi) og'irroq kechadi, shu sababli kompensatorning nominal quvvati deb, o'ta qo'zg'atilganlik rejimidagi quvvatga aytiladi.

**Misol 13.1.** Kuchlanishi  $U_c$  6,3 kV bo'lgan o'zgaruvchan tok tarmog'iga yuklanish quvvati 1500kV·A, quvvat koeffitsiyenti  $\cos \varphi = 0,7$  bo'lgan istemolchi ulangan. Tarmoq quvvat koeffitsiyentini  $\cos \varphi' = 0,95$  ( $\sin \varphi' = 0,31$ ) oshirish maqsadida o'rnatiladigan sinxron kompensatori quvvatini aniqlang. Qo'shimcha, kompensator o'rnatilgunga qadar va o'rnatilgandan keyin tarmoq yuklanishi tokini aniqlang.

**Yechish.** SK o'rnatilgunga qadar tarmoq reaktiv quvvati  $Q = S \sin \varphi = 1500 \cdot 0,7 = 1050 \text{ kV}\cdot\text{Ar}$ , tarmoq yuklanish toki

$$I_c = S / (\sqrt{3} U_c) = 1500 / (\sqrt{3} \cdot 6,3) = 138 \text{ A};$$

Shu tokning aktiv tashkil etuvchisi

$$I_{CB} = I_c \cos \varphi = 138 \cdot 0,7 = 97 \text{ A}.$$

SK ulangandan so'ng reaktiv quvvat kamaydi

$$Q' = S \sin \varphi' = 1500 \cdot 0,31 = 450 \text{ kV}\cdot\text{Ar}.$$

Shunday qilib, qurilmaning quvvat koeffitsiyentini  $\cos \varphi = 0,7$  qiymatidan  $\cos \varphi' = 0,95$  gacha oshirish uchun quvvati

$$Q_{CK} = 1050 - 450 = 600 \text{ kV}\cdot\text{Ar}$$

bo'lgan SK kiritish zarur bo'ladi bunda, tarmoq tokining aktiv tashkil etuvchisi ( $I_{c.a} = 97 \text{ A}$ ) o'zgarmaydi, reaktiv tashkil etuvchisi esa quyidagiga teng bo'ladi

$$I'_{c.p} = Q / (\sqrt{3} \cdot U_c) = 450 / (\sqrt{3} \cdot 6.3) = 42 \text{ A}.$$

Demak, SK ulangandan so'ng tarmoqdagi tok quyidagicha bo'ladi

$$I'_c = \sqrt{I_{c.a}^2 + I_{c.p}^2} = \sqrt{97^2 + 42^2} = 104 \text{ A}.$$

Aksariyat, quvvat koeffitsiyentini 0,92-0,95 gacha oshiriladi, chunki  $\cos\varphi=1,0$  gacha o'zgartirishdan olingan iqtisod (foйда), sinxron kompensator quvvatini oshirish uchun xarajatlarni qoplaymaydi. Agar, ko'rilayotgan misolda quvvat koeffitsiyentini birgacha oshirish zaruligi bo'lganda edi, u holda sinxron kompensatori quvvati 1050 kV·Ar, ya'ni xarajatlar  $\cos\varphi' = 0,95$  dagi xarajatlarga nisbatan taxminan ikki marta ko'proq bo'lar edi.

Sinxron kompensatorlar – bu katta quvvatli elektr mashinalaridir: 10 dan 160 ming. kV·A gacha. Ularni, aksariyat, vali gorizontal joylashtirib yasaladi, kuchlanishi 6,6 dan 16 kV.gacha, chastotasi 50 Gs. SK rotorining qutblari soni  $z_p = 6$  i 8, bu esa rotor aylanilar sonining 1000 va 750 ay/min. ga mos keladi. Hozirgi zamon SKlarida asinxron ishga tushirish qabul qilingan, shu sababli SK rotori ishga tushirish chulg'ami bilan ta'minlangan.

Kompensator vali aylanma momentni boshqa mexanizmga uzatmaydi, shu sababli uning loyihasida faqat rotor tortish kuchi va magnet tortilish kuchini e'tiborga olinadi. Natijada, SK vali sinxron motor valiga nisbatan kichik kesim yuzaga ega. Bu ko'rsatkich SKning tashqi o'lchamlari (gabariti)ni kamaytirish imkonini beradi. SK vali ulanish qismi bo'lmaganligi sababli, SKga vodorodli sovutkich ishiatish maqsadida, nisbatan oson germetizatsiya qilish mumkin.

SKning muhim tavsiflaridan biri, uning asosiy parametrlarini aniqlovchi V-simon tavsifidir: stator va qo'zg'atish chulg'amlari toklarining qiymatlari. Bu tavsiflar sinxron motorning YU.i. rejimidagi ( $p_2 = 0$ ) V-simon tavsifidan farq qilmaydi. Bu tavsiflar tarmoqning har xil kuchlanishlari uchun quriladi.

Sinxron kompensator aktiv yuklanishsiz (elektromagnit quvvati  $P_{\text{m}} \approx 0$ ) va burchak  $\theta = 0$  da ishlaydi, bu esa SKning katta o'ta yuklanuvchanlik xususiyatini oshlradi.

### Nazorat savollari

1. Sinxron motorning turg'un ishlash zonasi nima bilan cheklanadi?
2. Sinxron motorni ishga tushirish tartibini tushuntiring.
3. Sinxron motorning quvvat koeffitsienti qanday boshqariladi?
4. Sinxron kompensator nima vazifani bajaradi?
5. Sinxron motorning asinxron motorga nisbatan qanday afzalliklari va kamchiliklari mavjud?



## V QISM.

### O'ZGARMAS TOK ELEKTR MASHINALARI

O'zgarmas tok elektr mashinalarini generator va motor rejimlarida ishlatiladi. Motor rejimi eng ko'p qo'llaniladigan rejim hisoblanib, ishlatilish sohalari va quvvat diapazonlari etarli darajada keng: birnecha vatt ulushidan (avtomatika qurilmalari yuritmalari) birecha ming kilovattgacha (prokat stanlari yuritmalari, shaxta ko'tarish mexanizmlari). O'zgarmas tok motorlari yuqoriga ko'tarish mexanizmlarida kran motorlari, transport vositalari yuritmalarida tortuvchi motorlar sifatida keng qo'llaniladi. O'zgarmas tok motorlarining asosiy afzalliklari - ishga tushirish va boshqarishning yaxshi xususiyatlar mavjudligi, 3000 ay/mim aylanish tezligiga engil erishish imkoniyatlari mavjudligi, kamchiliklari esa - nisbatan yuqori narxi va tashqi o'lchamlari (gabaritlari), ishlab chiqarishdagi murakkabliklari va past ishonchliligi. O'zgarmas tok mashinalarining barcha kamchiliklari kollektor-cho'tka tizimining mavjudligidan kelib chiqadi. Shu bilan birga, kollektor-cho'tka tizimi radioshovqin va yong'inga xavfli vaziyatlar hosil qiladi. Ushbu kamchiliklar o'zgarmas tok mashinalari keng qo'llanishiga to'siq bo'ladi.

Darslikning ushbu qismida hozirgi zamon elektr yuritmalarida ko'plab ishlatilayotgan umumqo'llanish o'zgarmas tok mashinalari o'rganiladi.

Shuni ta'kidlash zarurki, tog'-kon sanoati korxonalarida o'zgarmas tok mashinalaridan ko'proq motor rejimida foydalanish, ularni ishga tushirish va boshqarish xususiyatlariga oson erishish ikoniyatlaridan kelib chiqadi. O'zgarmas tok mashinalarini kuchlanish manbai - generator sifatida ishlatish, texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlari o'zgarmas tok elektromexanik o'zgartkichlariga nisbatan juda yuqori bo'lgan yarim o'tkazgichli to'g'rilagichlarning sanoatda keng qo'llanishi natijasida, cheklanib borayapti.

## 14-bob. O'ZGARMAS TOK ELEKTR MASHINALARI ISHLASH PRINSIPI VA TUZILISHI

### 14.1. O'zgarmas tok generatori va motorini ishlash prinsipi

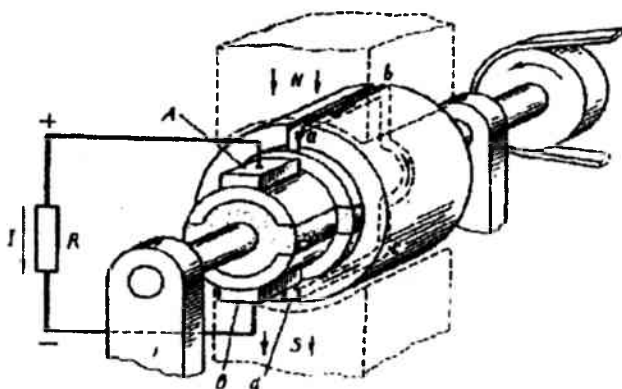
O'zgarmas tok mashinasining o'ziga xos xarakterli belgisi kollektor-cho'tka tizimi, o'zgarmas tokni o'zgaruvchan tokka aylantiruvchi va, uning aksi, - mexanik o'zgartkich mavjudligidir. Bunday o'zgartkichning zarurati shu bilan tushuntiriladiki, o'zgarmas tok mashinasining yakor chulg'amida o'zgaruvchan tok oqish shart, chunki faqat shu sharoitda mashinada elektromexanik energiya o'zgartirili-shining uzluksiz jarayoni sodir bo'ladi.

O'zgarmas tok generatorining ishlash prinsipini ko'raylik. 14.1-rasmda generatorning soddalashtirilgan modeli tasvirlangan: ikki qo'zg'olmas o'zgarmas magnit qutblari  $N$  va  $S$  orasiga generatorning aylanuvchi qism - yakor joylashtirilgan. Uning vali shkiv va tasma uzatkich mexanizmi yordamida birlamchi motor - mexanik energiya manbai (rasmda ko'rsatilmagan) vali bilan ulangan. Yakor magnit o'zagi tashqi silindrik yuzasida qirqilgan ikki bo'ylama pazda bir o'ram sifatida keltirilgan  $a, b, c, d$  chulg'am joylashtirilgan. O'ramning boshi va keti soddalashtirilgan kollektorni tasvirlovsi, o'z-aro izolyasiyalangan ikki mis yarim xalqalarga ulangan. Kollektor yuzasiga  $A$  va  $V$  cho'tkalar o'rnatilgan. Kollektor va cho'tkalar, generator yakor chulg'amini tashqi zanjir ( $R$  qarshiligi bo'lgan yuklama) bilan bog'lovchi, sirpanuvchi kontaklar vazifasini bajaradi.

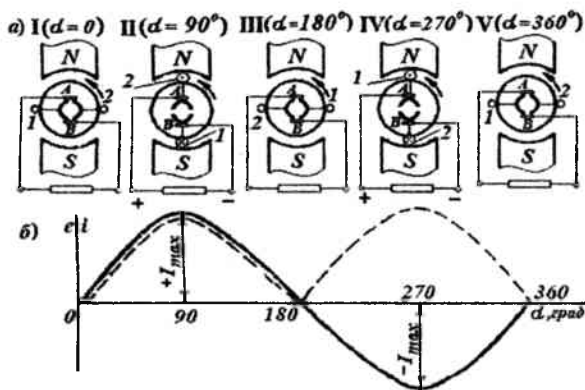
Faraz qilaylik, birlamchi motor generator yakorini soat miliga teskari yo'nalishda aylantirsin, unda o'zgarmas magnit qutblarining magnit maydonida aylanayotgan yakor o'ramida oniy qiynati  $e = 2Blv$  bo'lgan EYK induktivlanadi. EYK yo'nalishi yakorning rasmda ko'rsatilgan holati uchun strelkalar bilan ko'rsatilgan.

Generatorning ishlash jarayonida uning yakori aylanadi va o'ram  $a, b, c, d$  har hil fazoviy holatlarni qabul qiladi, shuning uchun yakor chulg'amida o'zgaruvchan EYK induktivlanadi. Agar mashinada kollektor bo'lmaganda, u holatda tashqi zanjirda ( $R$  yuklamada) tok

o'zgaruvchan bo'lar edi, ammo kollektor va cho'tkalar yordamida yakor chulg'amidagi o'zgaruvchan tok generator tashqi zanjirlari (yuklanish)da pulslanuvchi tokka, ya'ni yo'nalishi o'zgarmaydigan tokka aylanadi.



14.1-rasm. O'zgarvas tok mashinasi soddalashtirilgan modeli



14.2-rasm. O'zgarvas tok generatori ishlash prinsipini tushuntirishi:  
a-yakor EYK; b-yuklama kuchlanishi

Yakor o'rami 14.1-rasmda ko'rsatilgan holatda bo'lganida, tashqi zanjir (yuklama)dagi tok A cho'tkadan V cho'tka tomon yo'nalgan; demak, cho'tka A musbat ishorali, cho'tka V esa - manfiy. Yakor  $180^\circ$

ga burilgandan so'ng (14.2,*a*-rasm), yakor o'ramining toki yo'nalishi teskarisiga o'zgaradi, biroq, cho'tkalar ishoralari va, demak, tashqi zanjir (yuklanishi)dagi tok o'zgarmasdan qoladi (14.2,*b*-rasm). Buni shunday tushuntirish mumkin: yakor o'ramida tok yo'nalishi o'zgaragan onda kollektor plastinalari o'rni o'zgaradi.

Shunday qilib, *A* cho'tkasi ostida doimo shimoliy magnit qutb ostidagi o'tkazgich bilan ulangan plastina joylashgan bo'ladi, *V* cho'tka ostida janubiy qutb ostidagi o'tkazgich bilan ulangan plastina bo'ladi.

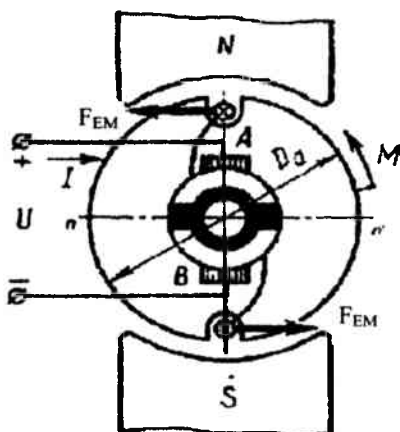
Shu sababli generator cho'tkalari ishorasi yakor o'ramining holatiga bog'lliq bo'lmay o'zgarmasdan qoladi. Tashqi zanjirdagi tokning pulslanishiga kelsak, yakor chulg'ami o'ramlari soni ortishi, ular yakor yuzasida bir tekisda joylashganiga va kollektor plasinalarining ham ortishiga qarab ancha susayadi.

Elektr mashinalarining qaytuvchanlik prinsipiga muvofiq, o'zgarmas tok mashinasining soddalashtirilgan modeli o'zgarmas tok motori sifatida ishlatilishi mumkin. Buning uchun generator yuklamasi *R* ni uzish va mashina cho'tkalariga o'zgarmas tok manbaidan kuchlanish keltirish zarur. Masalan, agar cho'tka *A* ga "plyus" klemmasini, *V* cho'tkaga "minus" klemmasini ulasak, u holda yakor chulg'amida yo'nalishi 14.3-rasmda keltirilgan *I* toki hosil bo'ladi. Bu tokning qutb o'zgarmas magnit oqimi (qo'zg'atish chulg'ami magnit maydoni) bilan o'zaro ta'siri natijasida soat miliga teskari yo'nalishda aylanuvchi elektromagnit moment *M*<sub>ni</sub> hosil qiluvchi elektromagnit kuchlar *F*<sub>EM</sub> paydo bo'ladi. Yakorning 180° ga buriganidan so'ng, elektromanit kuchlar o'z yo'nalishini o'zgartirmaydi, chunki yakor chulg'amining har bir o'tkazgichi bir magnit qurb zonasidan ikkinchi qutb zonasiga o'tish onida, bu o'tkazgichlarda tok yo'nalishi o'zgaradi.

Shunday qilib, o'zgarmas tok motorida kollektor va cho'tkalarining vazifalari - chulg'am o'tkazgichlari bir magnit qurb zonasidan ikkinchi qutb zonasiga o'tish onida o'tkazgichlardagi tok yo'nalishi o'zgarishdir.

Ko'rilgan o'zgarmas tok motorining soddalashtirilgan modeli motor uchun turg'un ishlash rejimini ta'minlamaydi, chunki yakor chulg'ami o'tkazgichining geometrik neytral *nn'* dan (14.3-rasm) o'tishida elektromagnit kuchlar nolga teng *F*<sub>EM</sub>=0 (iagnit qutblari orasidagi oraliqda magnit induksiyasi nolga teng). Biroq, yakor

chulg'amida o'tkazgichlar (yakor yuzasida chulg'am o'tkazgichlari bir tekisda ravon joylashtirilsa) va kollektor plastinalari soni ortishi bilan motorning yakori aylanishi turg'un va ravon bo'lib boradi.



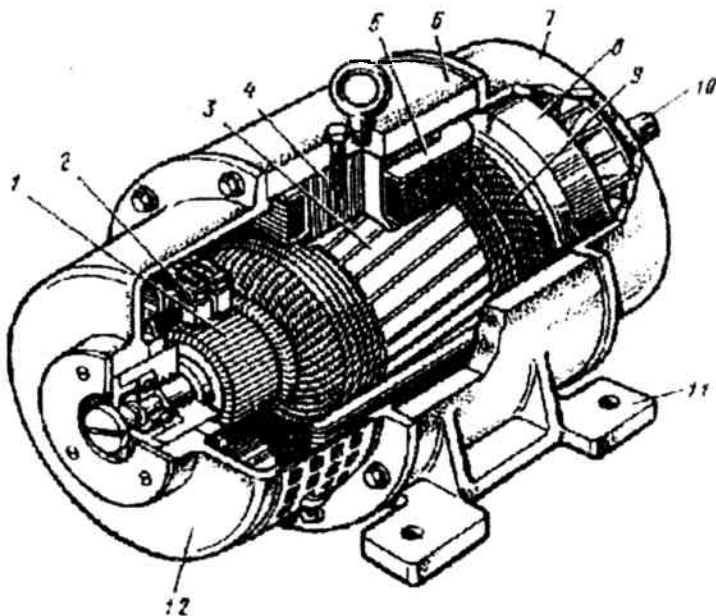
14.3-rasm. O'zgarmas tok mashinasining tuzilishi

## 14.2. O'zgarmas tok mashinasining tuzilishi

Hozirgi kunda elektr mashinasozlik sanoati korxonalari xalq xo'jaligining har xil sohalarini uchun o'zgarmas tok elektr mashinalarini ishlab chiqarmoqda. Shu sababli o'zgarmas tok elektr mashinalarining alohida qismlari har xil tuzilishga ega bo'lishi mumkin, biroq, mashinaning umumiy konstruktiv sxemasi bir xil. Mashinaning qo'zg'olmas qismini stator deyiladi, aylanuvchi qismi - yakor deyiladi (14.4-rasm).

**Stator.** Stator 6 staninadan va unga boltlar bilan maxkamlangan 4 bosh qutblardan iborat. Staninaga qutblardan tashqari, podshipnik 7 va 12 qalqonlari maxkamlanadi. Stanina magnit o'zakning bir qismi hisoblanib, u orqali magnit maydon tutashadi va berk konturni hosil qiladi. Stanina etarli darajada mexanik mustahkamlik va katta magnit singdiruvchanlikka ega bo'lgan materialdan (po'latdan yasaladi). Stanina pastki qismida mashinani fundament plitasiga mahkamlash

uchun 11 lapa mavjud, stanina aylanasi bo‘ylab teshiklar mavjud bo‘lib, unga bolt yordamida 4 bosh qutblar mahkamlanadi. Aksariyat, stanina yaxlit po‘lat trubadan qirqib yasaladi (kichik quvvatli mashinalar), yoki qirqilgan po‘lat listlaridan payvandlash yo‘li bilan (katta diametrli mashinalar bundan mustasno, transportirovka va montaj qulayliklari uchun ular yig‘iluvchan bo‘ladi).

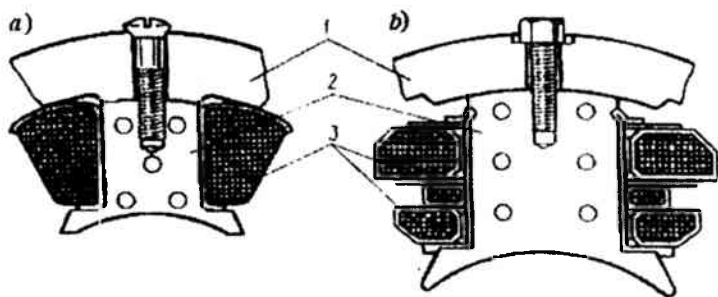


14.4-rasm. O‘zgarmas tok mashinasining tuzilishi

Bosh qutblar mashinada magnet maydon qo‘zg‘atish uchun mo‘ljallangan. Bosh qutb magnet 6 o‘zak va qutb g‘altagi 5 dan iborat. Qutbning yakorga qaratilgan tomonida qutb uchliklari mavjud. U mashina havo oralig‘ida magnet maydonning zaruriy taqsimlanishini ta‘minlaydi. Bosh qutb magnet o‘zaklari 1-2 mm qalinlikdagi konstrukcion po‘lat tunikachalardan yoki 3411 markali sovuq jo‘valangan anizotrop elektrotexnik po‘lat tunikachalardan shixtovka qilinadi. Bosh qutb shtamplangan plastinalari ataylab o‘zaro izolyatsiyalanmaydi, chunki plastinalar yuzasidagi yupqa oksid

plenka ularda induktivlanadigan uyurma toklarni keskin pasaytirish uchun etarli bo'ladi. Anizotrop po'lat jo'valag yo'nalishi bo'yicha yuqori magnit singdiruvchanlikka ega bo'lib, plastinalar shtamp-lanishida va qutb paketi yig'ilishida e'tiborga olinishi kerak. Jo'va-lash yo'nalishiga ko'ndalang bo'lgan yo'nalishda magnit singdiruv-chanlik pastligi yakor reaksiyasining ta'sirini kuchsizlantiradi va bosh va qo'shimcha qutblar tarqoq magnit oqimni kamaytiradi.

Kichik quvvatli o'zgarmas tok mashinalari qutb g'altaklari karkassiz qilinadi - qutb o'zagiga izolyatsion qistirma (prokladka) joylashtirilib, misdan yasalgan chulg'am o'tkazgichlarini bevosita o'raladi (14.5,*a*-rasm). Ko'pgina mashinalarda (quvvati 1 KWt va undan kattaroq) qutb g'altagi karkasli qilinadi: chulg'am o'tkazgichi karkasga (aksariyat, plastmassadan) o'raladi, so'ngra qutb o'zagiga kiygiziladi (14.5,*b*-rasm). Mashinalarning ba'zi konstruksiyalarida qo'zg'atish chulg'ami intensiv sovutilish uchun balandligi bo'yicha birnecha qismlarga bo'linadi, ular orasida ventilyatsiya kanallari qoldiriladi.



**14.5-rasm.** Karkassiz (*a*) va karkasli (*b*) qutb g'altagi bo'lgan bosh qutblar: 1-stanina; 2-qutb o'zagi; 3-g'altak

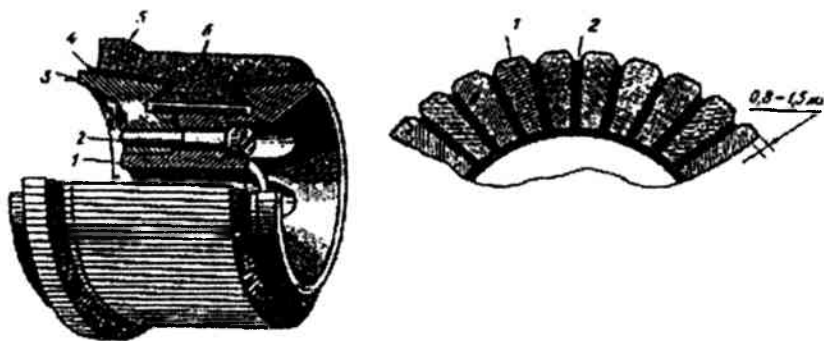
**Yakor.** O'zgarmas tok mashinasining yakori (14.4-rasm) val 10, magnit o'zak 3, yakor chulg'ami 9 va kollektor 1 dan iborat. Yakor magnit o'zagi shixrovka qilingan konstruksiyadan iborat va yupqa tunikasimon elektrotexnik po'latdan shtampangan plasinalardan iborat. Plastinalar lak bilan qrplanadi, paketlarga yig'iladi va

quritiladi. Tayyor magnit o'zak yakor valiga presslanib mahkamlanadi. Yakor magnit o'zagining bunday tuzilishi, uning magnit maydonda aylanishidan hosil bo'lgan qayta magnitlanishda induktivlanadigan uyurma toklarni keskin kamaytirish imkonini beradi. Yakor tashqi silindrik yuzasida bo'ylama pazlar bo'lib, ularda yakor chulg'ami joylashtiriladi.

Yakor chulg'amini dumaloq yoki to'g'ri burchakli kesim yuzali mis o'tkazgichlardan yasaladi. Pazlari chulg'am o'tkazgichlari bilan to'ldirilib, so'ngra pona (tekstolit yoki getinaks) bilan berkitiladi. Ba'zi mashinalarda pona bilan berkitmasdan, balki yakor yuzasiga bandaj o'raladi. Bandaj po'lat yoki shisha tolali tortilgan simdan yasaladi. Chulg'amning tirsak qismi chulg'amni mahkamlovchi bandaj bilan qotiriladi.

Kollektor 1 o'zgarmas tok mashinasining murakkab qismlaridan biri hisoblanadi. Kollektorning asosiy elementlari qattiq tortilgan mis lentasidan trapetsiya shaklida shtamplangan plastinalaridan shunday yig'ilganki, kollektor silindr shaklini oladi. Kollektor plastinalarini mahkamlashga qarab, kollektor ikki asosiy turga bo'linadi: po'lat konus shaybali va plastmassali.

14.6, *a*-rasmda po'lat konus shaybali kollektor tuzilishi keltirilgan. Kollektor plastinalarning 6 quyi qismi «qaldirg'och dumi» shakliga ega. Kollektor yig'ilgandan so'ng, plastinalarning shu qismlari 1 va 3 po'lat shaybalar orasiga siqilgan bo'ladi.

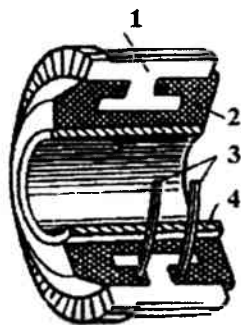


14.6-rasm. Konus shaybali kollektor tuzilishi

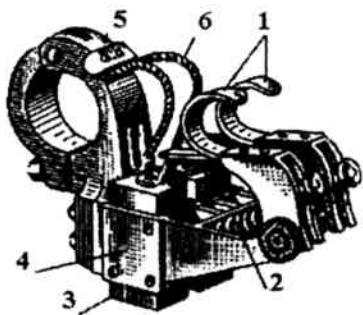


Konus shaybalari vintlar 2 bilan mahkamlanadi. Har bir mis plastinalar orasida mikanit izolyasion qatlamlar joylashtirilgan. Mashinaning ishlash jarayonida kollektorning ishchi yuzasi cho'tkalar bilan doimo ishqalanib ediriladi. Shu jarayonda, mikanit qatlamlari kollektor ishchi yuzasidan yuqori chiqib turmasligi va vibratsiya hosil qilmasligi uchun, koilektor plastinalari orasida chuqurligi 1,5 mm gacha bo'lgan pazlar frezerlanadi (14.6,*b*-rasm). Kollektor plastinasi 5 ning "xo'roz dumii" deb nomlangan yuqori qismida (14.6,*a*-rasm) ingichka bo'ylama paz mavjud, unga yakor chulg'amining o'tkazgichi o'rnatilib, kavsharlanadi.

Kichik quvvatli o'zgarmas tok mashinalarda, aksariyat, ishlab chiqarish qulayligi sababli, kollektor plasmassaga mahkamlanadi. Bunday kollektorda mikanit va mis plastinalar yig'ilgan holati ular orsidagi bo'shliqqa plastmassa presslanib to'ldiriladi va po'lat vtulka 4 bilan qotiriladi. Ba'zan, kollektor mustahkamligini oshirish maqsadida shu plastmassa po'lat 3 halqalar bilan armaturalanadi 2 (14.7-rasm). Bunda mikanit qatlamlari geometrik o'lchovlari mis plastinalari 1 o'lchovlaridan katta bo'lishi zarur. Bu esa mis plastinalarni po'lat halqa 3 bilan qisqa tutashuviga yo'l qo'ymaydi.



14.7-rasm. Plastmassali kollektor tuzilishi



14.8-rasm. O'zgarmas tok mashinasi cho'tka tutgichi

Kollektor bilan elektr kontaktini 4 cho'tkatutgichlar (shchetko-derjatel)ga joylashtirilgan (14.4-rasm) cho'tkalar yordamida bajariladi. Shchetkatutgich (14.8-rasm) cho'tkatutgich qohig'idan

iborat bo'lib, unga 3 cho'tka, kurok 1 kiritiladi; kurok ochiluvchan bo'lib, prujina 2 bosimini cho'tkaga uzatadi. Shchetkatutgichlar cho'tkatugich barmog'iga 5 qisqichlar yordamida mahkamlanadi. Shchetka egiluvchan tros 6 bilan elektr mashina zanjiriga ulanadi. Bir hil ishoralari barcha cho'tkatugichlar o'zaro yig'uvchi shinalar bilan birlashadi va mashina zanjiriga ulanadi. Biroq, mashina uzluksiz ishlashining asosiy shartlaridan biri – cho'tka va kollektor orasida zich va ishonchli kontaktni hosil qilishdir.

Shchetkalariga prujina bosimi shunday sozlanishi zarurki, haddan ortiq bosim cho'tkalarining muddatdan avval eskirishi va kollektor o'ta qizishi oldini olsin, kichik bosim - kollektorda uchqunlanishni vujudga keltirmasin.

Bundan tashqari, o'zgarmas tok mashinalarida ikki podshipnik qalqonlari mavjud: old qalqon 12 (kollektor tomonidan) va orqa qalqon 7 (14.4-rasm). Qalqonlarning markaziy qismida podshipnik uchun qirqim mavjud.

Old qalqonda qopqoqli vizual darcha (lyuk) mavjud. U orqali mashinaning detallarini yechmasdan, kollektor va cho'tkalar holatini nazorat qilish mumkin. Chulg'amlarning boshi va keti qulg'am klemmalari qutisiga chiqarilgan. Ventilyator 8 mashina o'z-o'zini sovutilishi uchun xizmat qiladi: havo mashinaning ichiga, aksariyat, kollektor tomonidan so'riladi, mashina qizigan qismlari (kollektor, chulg'amlar va magnit o'zak) ni shomollatib sovutadi va qizigan havo kollektorga teskari tomondagi panjara orqali chiqariladi.

O'zgarmas tok mashinasi tuzilishi va ishlash prinsipidan shu kelib chiqadiki, yakor chulg'amini tashqi tarmoq bilan bog'lovchi mashinaning zaruriy qismi - cho'tka-kollektor tizimi, ya'ni tok turini o'zgartiruvchi o'zgartkich ekan. Shunday qilib, o'zgarmas tok mashinalari kollektorsiz o'zgaruvchan tok mashinalaridan (asinxron va sinxron) murakkabroq ekan va, demak, (ayniqsa, asinxron mashinalardan) ishonchliligi va narxi balandligi bilan farq qilar ekan.

### **Nazorat savollari**

1. O'zgarmas tok generatorida kollektor nima uchun kerak?
2. Nima uchun staninani po'latdan yasaladi?
3. Kollektorda konus shaybalar nima vazifani bajaradi?

4. Plasmassali kollektorlarda armaturali halqalar nima uchun ishlatiladi?
5. Bosh qutb staninaga qanday mahkamlanadi?
6. Bosh qutb chulg'ami nima uchun balandligi bo'yicha bo'laklari orasi ochiq qoldiriladi?
7. Ventilyatsiyada havo harakati qanday qismlarni o'z ichiga oladi?
8. O'zgarmas tok generatori qanday qismlardan iborat?
9. Yakor chulg'ami o'ramlari magnit o'g'akka qanday mahkamlanadi?

## 15-bob. O'ZGARMAS TOK MASHINALARI YAKOR CHULG'AMLARI

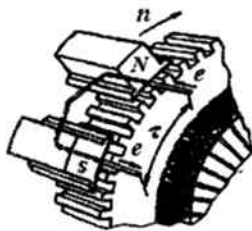
### 15.1. Sirtmoqsimon yakor chulg'amlari

**Asosiy tushunchalar.** O'zgarmas tok mashinasi yakor chulg'amlari – yakor magnit o'zagida ma'lum tartibda joylashtirilgan, uchlari kollektor plastinalariga ulangan va izolyatsiyalangan o'tkazgichlarning berk tizimini hosil qiladi.

Yakor chulg'amining elementi – ikki kollektor plastinasiga ulangan seksiya (g'altak)dir. Seksiyaning paz qismlari orasidagi masofa mashina qutb oralig'iga teng yoki undan biroz farq qilishi kerak (15.1-rasm):

$$z = nD_j(2p). \quad (15.1)$$

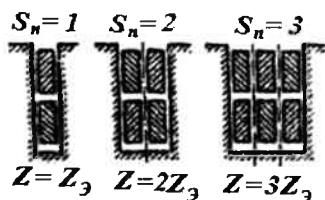
bunda  $D_j$  – yakor magnit o'zagi diametri, mm.



15.1-rasm. Seksiya paz tomonlari magnit o'zakda joylanishi

Yakor chulg'amlari, aksariyat, ikki qatlamli qilib bajariladi. Ular quyidagi parametrlari bilan farqlanadilar: seksiyalar soni  $S$ ; pazlar (real) soni  $Z$ ; bir pazga mos keluvchi seksiyalar soni,  $S_n = S/Z$ ; seksiya o'ramlari soni  $w_c$ ; chulg'am paz tomonlari soni  $N$ ; bir pazdagi paz tomonlari  $p_p = N/Z = 2w_c S_p$ . Bir pazda joylashgan bir seksiyaning yuqori paz tomoni va boshqa seksiyaning quyi paz tomoni elementar

pazni tashkil etadi. Real pazlardagi elementar pazlar soni  $Z_p$ , bir pazda bo'lgan seksiyalar soni bilan agiqlanadi:  $S_p = S/Z$  (15.2-rasm).

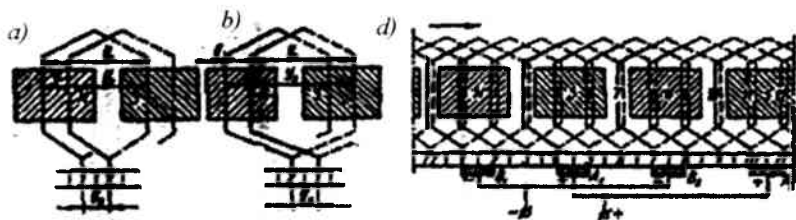


15.2-rasm. Elementar pazlar

Yakor chulg'amlari yoyiq tarzda bo'ladi, bunda barcha seksiyalar bir o'ramli ko'rsatiladi. Bunday holatda ikkitadan paz tomonlariga bo'lgan har bir seksiyaga, bir elementar paz mos keladi. Seksiyalar boshi va keti kollektor plastinalariga ulanadi, bunda har bir plastinaga bir seksiyaning boshi, boshqa seksiyaning keti ulanadi, ya'ni har bir seksiyaga bir kollektor plastinasi mos keladi. Shunday qilib, yakor chulg'amiga  $S = Z_3 = K$  tenglik to'g'ri keladi, bunda  $K$  – kollektordagi plastinalar soni. Bir real pazga mos bo'lgan seksiyalar soni, quyidagi nisbat bilan belgilanadi  $Z_E / Z$ .

**Oddiy sirtmoqsimon yakor chulg'ami.** Oddiy sirtmoqsimon yakor chulg'ami har bir seksiya ikki yonma-yon joylashgan kollektor plastinalariga ulanadi. Seksiyalarni magnit o'zak pazlariga joylashtirishda har bir seksiyaning boshi, undan ilgarigi seksiya keti bilan ulanadi, bunda yakor (va kollektor) yuzasida qadamma-qadam shunday surilladiki, unda yakor yuzasini bir marta aylanib chiqilganda, chulg'amning barcha seksiyalari joylashtiriladi. Natijada, oxirgi seksiyaning keti, birinchi seksiyaning boshiga ulanib qoladi, ya'ni yakor chulg'ami berk tutashadi.

15.3,*a,b*-rasmlarda oddiy sirt-moqsimon chulg'am yoyiq sxemasi ko'rsatilgan bo'lib, unda chulg'am qadamlari – yakor bo'yicha seksiyaning paz tomonlari orasidaga masofalari keltirilgan: yakor bo'yicha birinchi qisman odimi  $y_1$ , yakor bo'yicha ikkinchi qisman odimi  $y_2$  va yakor bo'yicha natijaviy odim  $y$ .



**15.3-rasm.** Oddiy sirtmoqsimon chulg'am: o'ng odimlovchi; chap odimlovchi; yoyiq sxemasi

Agar seksiyalarni joylashtirish yakor bo'yicha chapdan o'ngga bajarilsa, u holda chulg'am o'ng odimli deyiladi (15.3,*a*-rasm), agar o'ngdan chapga bo'lsa – chap odimli deyiladi (15.4,*b*-rasm). O'ng odimli chulg'am uchun natijaviy odim

$$u = u_1 = u_2 \quad (15.2)$$

Bir seksiyaning boshi va keti ulangan ikki kollektor plastinalari orasidagi masofa, kollektor bo'yicha chulg'am odimi  $u_k$  deyiladi. Yakor chulg'ami odimlari elementar pazlarda o'lchanadi, kollektor bo'yicha odim – kollektor bo'linmasida (plastinasida) o'lchanadi.

Oddiy sirtmoqsimon chulg'am har bir seksiyasi boshi va keti yonma-yon joylashgan kollektor plastinalariga ulanadi, demak,  $u = u_k = \pm 1$ , bunda plyus ishora - o'ng odimli, minus - chap odimli chulg'amlarga mansub.

Oddiy sirtmoqsimon chulg'amning barcha odimini aniqlash uchun birinchi xususiy odimni aniqlash yetarli bo'ladi

$$u_1 = [Z_E / (2p)] \pm \varepsilon, \quad (15.3)$$

bunda  $\varepsilon$  – biror birdan kichik son bo'lib, uni qo'shish yoki ayirish natijasida natijaviy odimning butun sonini hisoblaymiz.

Yakor chulg'ami ikkinchi xususiy odimi

$$u_2 = u_1 \pm u = u_1 \pm 1. \quad (15.4)$$

**Misol 15.1.** To'rt qutbli ( $2r=4$ ) o'zgarmas tok mashinasi yakori-ning oddiy sirtmoqsimon chulg'ami uchun odimlari va yoyiq sxemasi qurilsin. Chulg'am o'ng odimli, 12 seksiyadan iborat (15.3) bo'yicha

$$u_1 = [Z_E / (2p)] \pm \varepsilon = (12/4) \pm 0 = 3 \text{ paz.}$$

Chkor bo'yicha ikkinchi xususiy odim (15.4) bo'yicha

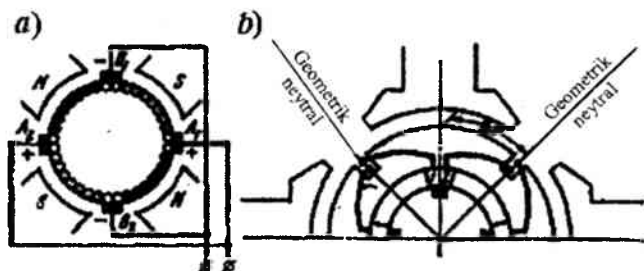
$$u_2 = u_1 - u = 3 - 1 = 2 \text{ paz.}$$

Sxemani bajarishdan avval, barcha pazlar va seksiyalarni belgilash va raqamlash zarur, sxema eskiziga magnit qutblar konturlarini o'rnatib, ularni belgilash zarur (15.3, *d*-rasm). Bunda e'tiborni shunga qaratish kerakki, sxemada ko'rsatilgan qutblar, aslida qutb emas, balki ularning aksidir va yakor ostida joylashgandir. Shundan so'ng, kollektor plastinalar tasvirlanadi va sxemaga birinchi seksiyani joylashtiriladi. Uning paz qismlari 1 va 4 pazlarda joylashadi. Bu seksiyalarning boshi va keti ulangan kollektor plastinalari 1 va 2 raqamlari bilan belgilanadi. Shundan so'ng barcha plastinalar raqamlanadi va sxemaga qolgan seksiyalar (2, 3, 4 va h.k.) chiziladi. Oxirgi 12 seksiya chulg'amni tutashtiradi, bu sxemaning to'g'ri tuzilganidan dalolat beradi.

Shundan so'ng sxemada cho'tkalar tasvirlanadi.  $A$  va  $V$  cho'tkalar orasidagi masofa  $K/(2p)=12/4=3$ , ya'ni qutb bo'limiga mos kelishi shart. Shchetkalarining kollektorda joylashishiga kelganda, quyidagi tartibda ishlarni davom ettirishimiz zarur. Faraz qilaylik, yakor chulg'ami bilan tashqi zanjir orasidagi elektr kontakti kollektor orqali emas, balki bevosita chulg'amning paz qismidagi o'tkazgichlar orqali va ularga o'rnatilgan "shartli cho'tkalar" orqali bajarilayotgan bo'lsin (25.4, *a*-rasm). Bunday holatda mashinaning eng katta EYK "shartli cho'tkalar" – geometrik neytraliga mos keladi (25.4-bobga qarang). Kollektor plastinalar va ular ulangan seksiyaning paz qismlari orasida  $0,5 \cdot \tau$  (15.4, *b*-rasm) masofa bo'lgani uchun, real cho'tkalarga o'tishda, cho'tkalarni kollektorda (15.3, *s*-rasm) bosh o'qi bo'ylab o'rnatish zarur.

Cho'tkalar ishorasini aniqlashda faraz qilinadiki, mashina generator rejimida ishlaydi va strelka yo'nalishi bo'ylab aylanadi

(15.3,*d*-rasm). «O'ng qo'l» qoidasiga muvofiq, seksiyalarda induktivlangan EYK (tok) yo'nalishi aniqlanadi. Natijada ko'ramizki, chulg'amdanda tashqi zanjirga tok olib berayotgan  $A_1$  va  $A_2$  cho'tkalar musbat ishorali,  $V_1$  va  $V_2$  cho'tkalar manfiy ishorali bo'ladi. Bir xil ishorasi cho'tkalar mos ishorali klemmalarga parallel ulanadi.



15.4-rasm. Shartli (a) va real (b) shyotkalar joylanishi

**Yakor chulg'amining parallel shaxobchalari.** Agar yakor chulg'ami seksiyalarida tok oqishini kuzatsak (15.3,*s*-rasm), u holda chulg'am bir-biri bilan parallel ulangan va parallel shaxobchalar deb nomlangan to'rt bo'lakdan iborat bo'lishini ko'ramiz. Har bir parallel shaxobcha birnecha ketma-ket ulangan va toklari bir yo'nalishda bo'lgan seksiyalardan iborat. Parallel shaxobchalarda seksiyalarning taqsimlanishi 15.5-rasmda ko'rsatilgan. Bu sxemani chulg'amning yoyiq sxemasidan (15.3,*b*-rasm) quyidagi tartibda olish mumkin. Qog'oz varag'ida cho'tkalar va ular bilan kontaktda bo'lgan kollektor plastinalari, 15.5-rasmda ko'rsatilganidek, chiziladi. Shundan so'ng,  $V_1$  cho'tka bilan tutashgan seksiya 1 dan boshlab seksiyalarni tok yo'nalishi bo'ylab ketma-ket kuzatamiz.

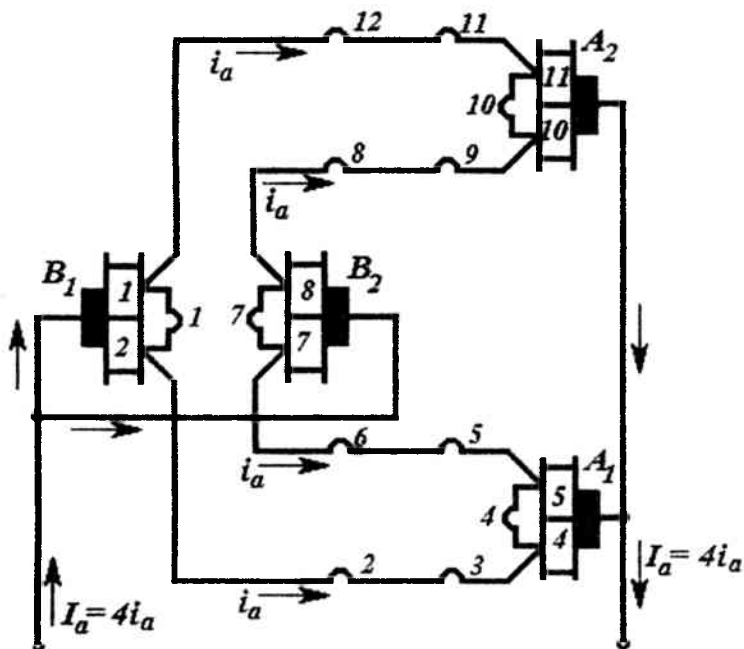
Undan so'ng unga ulangan seksiyalar 2, 3 keladi va ular parallel shaxobchani tashkil etadilar. Shunga o'xshash barcha seksiyalar ko'zdan kechiriladi. Natijada har bir shaxobchada ikkitadan seksiyasi bo'lgan to'rtta parallel shaxobchali sxema hosil qilamiz.

Olingan sxemadan shu ma'lum bo'ladiki, yakor chulg'amining EYK bir parallel shaxobcha EYK bilan aniqlanar ekan, chulg'amdagi tokning miqdori esa, barcha shaxobchalar toklarining yig'indisi bilan aniqlanadi.



$$I = 2 a i_a, \quad (15.5)$$

bunda  $2a$  – yakor chulg‘ami parallel shaxobchalari soni;  $i_a$  - bir parallel shaxobcha toki.



15.5-rasm. Chulg‘am elektr sxemasi

Oddiy sirtmoqsimon chulg‘amda parallel shaxobchalar soni mashina bosh qutblari soniga teng:  $2p = 2a$ .

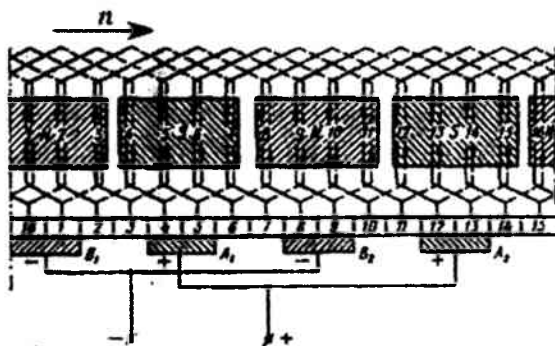
Shuni sezish mumkinki, yakor chulg‘amidagi shaxobchalar soni mashinaning asosiy parametrlari – tok va kuchlanish miqdorlarini aniqlaydi.

**Misol 15.2.** Olti qutbli o‘zgarmas tok mashinasi yakorida 36 seksiyadan iborat oddiy sirtmoqsimon chulg‘am mavjud. Agar har bir seksiyada 10 volt EYK induktivlansa, chulg‘am o‘tkazgichi 15 Amperdan katta bo‘lmagan tok o‘tishiga mo‘ljallangan bo‘lsa, yakor chulg‘amidagi EYK va tok kuchini aniqlang.

**Yechish.** Chulg'amdagi parallel shaxobchalar soni  $2p = 2a = 6$ , bunda har bir parallel shaxobchada  $S_p = S / (2a) = 36 / 6 = 6$  seksiya. Demak, yakor chulg'ami EYK  $E_a = 6 \cdot 10 = 60$  B, mashinaning joiz toki  $I_a = 6 \cdot 15 = 90$  A.

Agar mashina barcha o'zgarmas sharoitlarda sakkiz qutbli bo'lsa, uning EYK 40 V ga kamaygan bo'lar edi, chulg'am toki esa 120 Ampergacha organ bo'lar edi.

**Murakkab sirtmoqsimon chulg'amlar.** Kichik kuchlanishli, katta tokli o'zgarmas tok mashinalarini qurish zarurati bo'lganda parallel shaxobchalar sonini ko'paytiruvchi murakkab sirtmoqsimon chulg'amlar ishlatiladi. Bunday chulg'am bir necha (aksariyat, ikkita) oddiy sirtmoqsimon chulg'amdan iborat bo'lib, bir yakorga joylashtiriladi va bir kollektorga ulanadi. Murakkab sirtmoqsimon chulg'amlarda parallel shaxobchalar soni  $2a = 2pm$ , bunda  $m$  – murakkab sirtmoqsimon chulg'am tarkibidagi oddiy sirtmoqsimon chulg'amlar soni (aksariyat,  $m = 2$ ). Murakkab sirtmoqsimon chulg'amlarda cho'tkalar kengligi shunday qabul qilinadiki, har bir cho'tka bir onning o'zida  $m$  plastinkalarni qoplasin, ya'ni murakkab chulg'am tarkibida nechta oddiy chulg'amlar bo'lsa, shuncha plastinkalarni qoplasin. 15.6-rasmda  $m = 2$ ;  $2p = 4$ ;  $Z_c = 16$  parametrlri murakkab sirtmoqsimon chulg'am yoyiq sxemasi keltirilgan. murakkab sirtmoqsimon chulg'am yakor bo'yicha natijaviy odimi va kollektor bo'yicha odimi teng ( $u = u_k = m$ ). Yakor bo'yicha birinchi xususiy odim (15.3) bo'yicha aniqlanadi.



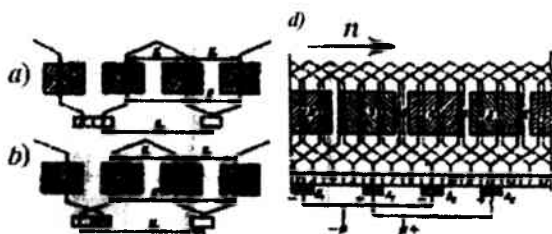
15.6-rasm. Murakkab sirtmoqsimon chulg'am yoyiq sxemasi

**Misol 15.3.** To'rt qutbli o'zgarmas tok mashinasida 16 seksiyadan iborat bo'lgan murakkab sirtmoqsimon chulg'ami bor. Agar  $m=2$  bo'lsa, chulg'amning yoyiq sxemasini chizing.

**Yechish.** Chulg'am odimlari  $u_1 = Z_c / (2p) = 16/4$  paz;  $u = u_k = 2$ .  $u_2 = u_1 - u = 4 - 2 = 2$  paz.

Avval oddiy chulg'amlardan birining barcha seksiyalarini (toq raqamli seksiyalar: 1, 3, 5 va h.k.) pazlarga joylashtirib, seksiyalar boshi va ketini toq raqamli plastinalarga ulaymiz (15.6-rasmi). Shundan so'ng, yakorda juft raqamli pazlarga boshqa oddiy chulg'am seksiyalarini joylashtiramiz (2, 4, 6 va h.k.) seksiya uchlarini plastinalarga ulaymiz. Sxemada kengligi ikki plastina kengligiga teng bo'lgan cho'tkalarni o'rnatamiz. Chulg'amning parallel shaxobchalari soni  $2a = 2pm = 4 \cdot 2 = 8$ .

**Oddiy to'liqinsimon chulg'am.** Oddiy to'liqinsimon chulg'amni har hil juft qutblar ostida joylashgan seksiyalarni ketma-ket ulash yo'li bilan hosil qilish mumkin (15.7-rasm). To'liqinsimon chulg'am seksiyalarning boshi va keti bir-biridan kollektor bo'yicha  $u = u_k$  masofada joylashgan plastinalarga ulanadi. Yakor aylanasi bo'yicha yotqiziladigan seksiyalar soni mashinaning juft qutblari soniga teng, bunda aylanish bo'yicha oxirgi seksiyaning keti birinchi yotqizilgan seksiyaning boshi ulangan plastinaga ulanadi.

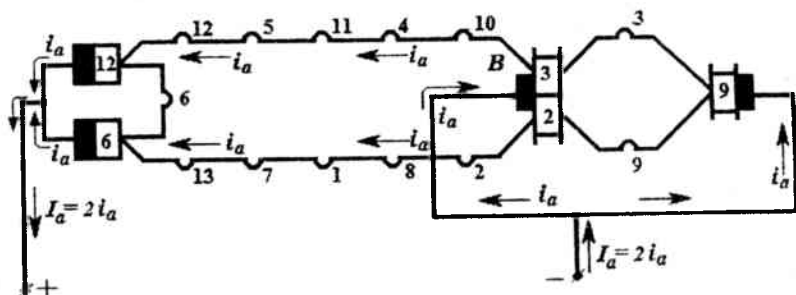


**15.7-rasm.** Oddiy to'liqinsimon chulg'am: *a*-o'ng odimli; *b*-chap odimli; *d*-yoyiq sxema

## 15.2. Yakorning to'liqinsimon chulg'amlari

Oddiy to'liqinsimon chulg'amning aylanish bo'yicha oxirgi seksiyasi keti birinchi yotqizilgan seksiya boshi bilan ulanishdagi

plastina chap tomonda bo'lsa, chulg'am chap odimli deyiladi (15.7,*a*-rasm). Agar shu plastina o'ng tomonda bo'lsa, chulg'am o'ng odimli deyiladi (15.7,*b*-rasm).



15.8-rasm. To'liqsimon chulg'amning yoyma elektr sxemasi

To'liqsimon chulg'am seksiyasi bir o'ramli va ko'p o'ramli bo'lishi mumkin. Oddiy to'liqsimon chulg'am kollektro bo'yicha odimi

$$y_k = y = (K \pm 1) / p. \quad (15.6)$$

Minus ishorasi chap odimli, musbat ishora o'ng odimli chulg'amga mos keladi. O'ng odimli chulg'amni yasash misning qo'shimcha isrofi bilan bog'liq. Shu sababli o'ng odimli to'liqsimon chulg'amlar keng tarqala olmadi.

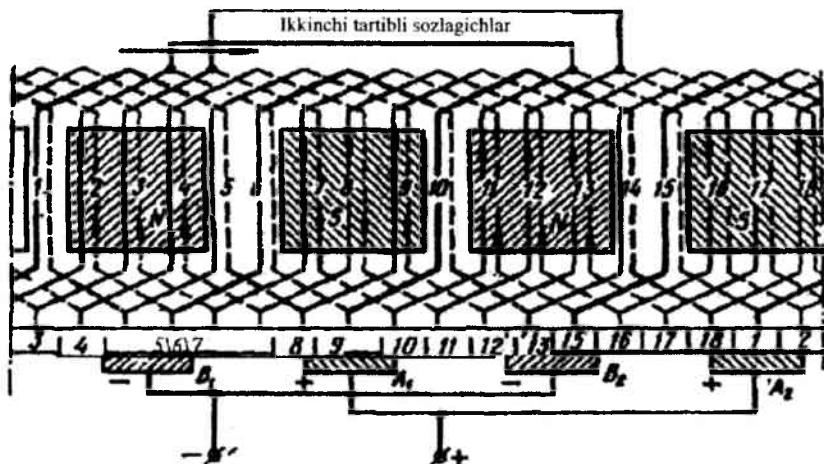
Yakor bo'yicha birinchi xususiy odim (15.3) yordamida hisoblanadi, ikkinchi xususiy odim  $u_2 = u - u_1$ .

**Misol 25.4.** To'rt qutbli o'zgarimas tok mashinasi 13 seksiyadan iborat bo'lgan oddiy to'liqsimon yakor chulg'amiga ega. Chulg'amning yoyma sxemasi va parallel shaxobchalar sxemasini chizing.

**Yechish.** Chulg'am odimlari:  $u_k = u = (K \pm 1) / p = (13-1)/2 = 6$  paz;  $u_l = [Z_c / (2p)] \pm e = 13/4 - 0,25 = 3$  paz;  $u_g = u, -u = 6 - 3 = 3$  paz.

Yakor bo'yicha birinchi aylanishda 1 va 7 seksiyalar joylashtiriladi (15.7,*s*-rasm). Ikkinchi aylanishda 13 va 6 seksiyalar va h.k., oxirgi 13ta seksiya joylashtirilmaguncha va chulg'am berk tutashmaguncha davom etadi. Ushbu ko'rilayotgan onda 3, 6 va 9

seksiyalar bir xil ishorali choʻtkalar va ularni bogʻlovchi oʻtkazgichlar yordamida qisqa tutashgan. Soʻngra choʻtkalar ishoralarini aniqlaymiz. Keyim elektr sxemani (parallel shaxobchalar sxemasini) quramiz, undan koʻrinadiki, (15.7-rasm), chulgʻam ikki parallel shaxobchalardan tuzilgan ekan ( $2a = 2$ ). Bu oddiy toʻlqinsimon chulgʻamlar uchun xarakterli xususiyatdir. Ularda parallel shaxobchalar soni qutblar soniga bogʻliq emas va doimo ikkiga teng.



15.9-rasm. Murakkab toʻlqinsimon chulgʻamning yoyma sxemasi

**Murakkab toʻlqinsimon chulgʻam** (15.8-rasm). Bir yakorda joylashtirilgan birnecha (aksariyat ikkita) oddiy toʻlqinsimon chulgʻamlar murakkab toʻlqinsimon chulgʻamni hosil qiladilar. Murakkab toʻlqinsimon chulgʻamda parallel shaxobchalar soni  $2a = 2p$  (aksariyat,  $2a = 4$ ), bunda  $m$  –murakkab chulgʻam tarkibidagi oddiy chulgʻamlar soni. Murakkab chulgʻamga kiruvchi oddiy chulgʻamlar choʻtkalar yordamida parallel ulanadilar. Kollektor boʻyicha odim, demak, yakor boʻyicha natijaviy odim yakor boʻyicha birinchi xususiy odim (15.3) yordamida aniqlanadi.

$$u_k = u = (K \pm m)/p. \quad (15.7)$$

**15.5-misol.** Murakkab to'liqsimon chulg'amda  $m=2$  bo'lib, 18 seksiyadan iborat. Agar  $2p = 4$  bo'lsa, chulg'amning yoyiq sxemasini quring.

**Yechish.** Chulg'am odimlari:

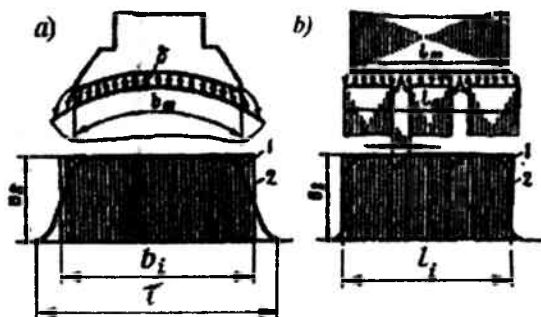
$$u_l = [Z_c / (2p)] \pm \varepsilon = 18/4 - 0,5 = 4 \text{ paz};$$

$$u_k = u = (K \pm m) / p = (18 - 2) / 2 = 8 \text{ paz}.$$

Sxemani bajarish tartibi murakkab sirtmoqsimon chulg'amdagiday: avval yakor pazlariga bir oddiy to'liqsimon chulg'am toq seksiyalari joylashtiriladi, so'ngra juft seksiyalar (15.9-rasm). Chulg'am parallel shaxobchalari somi  $2a = 4$ .

### 15.3. O'zgarmas tok mashinasi elektr yurituvchi kuchi va elektromagnit momenti

**Elektr yurituvchi kuch (EYK).** EYKni yakor chulg'amida asosiy magnit maydoni induktivlaydi. Bu magnit maydonining anahitik ifodasini aniqlash uchun elektr mashinasi havo oralig'idagi (ko'ndalang kesimi) magnit induksiyasining taqsimlanish grafigiga murojaat qilamiz. U har bir qutb bo'limida egri chiziqli trapetsiya shaklida bo'ladi (15.10,*a*-rasm, grafik 1). Havo oralig'idagi magnit induksiyasi real taqsimlanishini to'g'ri to'rtburchak bilan almashtiramiz (grafik 2), bunda to'g'ri to'rtburchak balandligi maksimal induksiya  $B_\delta$  bilan, kengligini -  $b_i$  ga teng, deb olamiz, bunda to'g'ri to'rtburchak yuzasi egri chiziqli trapetsiya yuzasiga teng. Kattalik  $b_i$  hisobiy qutb yoyi deyiladi. O'zgarmas tok mashinalarida hisobiy qutb yoyi qutb bo'limi  $b_r$  dan farq qilmaydi



15.10-rasm. Mashina havo oralig'ida magnit induksiya taqsimlanishi

$$b_i \approx b_i + 2\delta, \quad (15.13)$$

yoki qutbni qoplash koeffitsiyenti  $\alpha_i = b_i / \tau$  dan foydalanib, quyidagini aniqlaymiz

$$b_i = \alpha_i \tau. \quad (15.14)$$

Asosiy magnit oqimni e'tiborga olib (15.14), (Vb)

$$F = B_8 b_i l_i 10^{-6} = B_8 \cdot b_i \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot 10^{-6}. \quad (15.15)$$

bunda  $\tau$  – qutb oralig'i, mm;  $l_i$  - yakorning hisobiy uzunligi, mm.

Qutbni qoplash koeffitsiyenti  $\alpha_i$  o'zgarmas tok mashinasi xususiyatlariga ta'siri katta. Birinchi qarashda  $\alpha_i$  miqdorini kattaroq tanlash maqsadga muvofiqdek ko'rinadi, chunki bu magnit oqim  $F$  ortishiga olib keladi, demak, mashina quvvatining ortishini ko'ramiz (gabarit o'lchovlari o'zgarmas bo'lsa). Biroq,  $\alpha_i$  ning juda katta qiymati qarama-qarshi magnit qutblar uchliklarining yaqinlashuviga, tarqoq magnit oqimining ortishiga olib keladi va mashinaning boshqa xususiyatlariga ta'sir etadi. Bunda asosiy magnit oqim avval qilingan mo'ljaldan ham kam bo'lishi mumkin. Aksariyat,  $\alpha_i = 0,6 \div 0,8$  qabul qilinadi, bunda  $\alpha_i$  ning kichik qiymatlari kichik quvvatli mashinalarga mos keladi.

15.10-rasmda radial ventilyatsiya kanallari bo'lgan bosh qutb va yakorning bo'ylama kesimi ko'rsatilgan. Mashinaning bo'ylama kesimi bo'yicha magnit induksiyaning havo oralig'ida taqsimlanish grafigi (Iegri chiziq) tishsimon egri chiziqdan iborat. Bu egri chiziqni balandligi  $B_8$  va asosi  $l_i$  bo'lgan hamda yuzasi tishsimon egri chiziq bilan chegaralangan yuzaga teng bo'lgan to'rt burchak bilan almashtiramiz. Bu asos yakorning hisobiy uzunligini anglatadi

$$l_i = 0,5(l_m + l), \quad (15.16)$$

bunda  $l_m$  – qutbning uzunligi, mm;

$$l = l_a - p_k \cdot b_k, \quad (15.17)$$

- yakorning radial ventilyatsiya kanallarisiz uzunligi, mm;  $l_a$  – ventilyatsiya kanallarini ham hisobga olgan yakorning umumiy uzunligi, mm;  $b_k$  – ventilyatsiya kanalining kengligi (aksariyat, 10 mm), mm.

EYK analitik ifodasini keltirib chiqarganda havo oralig'ida magnit induksiyasi o'zgarishi to'g'ri burchakli taqsimlanish qonuniyati asoslanib, bunda magnit induksiya  $b_i = \alpha_i \tau$  zonasida  $B_8$  ga teng, uning tashqarisida nolga teng va u erdagi o'tkazgichlarda EYK induktivlanmaydi, deb hisoblaymiz. Bu esa chulg'amning pazlardagi umumiy o'tkazgichlari sonining  $N_i = \alpha_i \cdot N$  miqdorga kamayishiga ekvivalentdir. Shu asosda va chulg'amning EYK paz o'tkazgichlari  $N/(2p)$  bo'lgan faqat bir parallel shaxobchaga kiruvchi seksiyalar EYKlar yig'indisiga teng ekanini e'tiborga olib, quyidagini yozamiz

$$E_a = E_{pr} [N/(2a)] \alpha_i, \quad (15.18)$$

bunda

$$E_{pr} = B_8 \cdot l \cdot v \quad (15.19)$$

- aktiv uzunligi  $l_i$  bo'lgan bir paz o'tkazgichining EYK.

Yakorning aylanish tezligi  $v = \pi D n / 60 = 2p\tau n / 60$ , bunda  $\pi D = 2p\tau$ . Ifoda (15.18), (15.19) larni e'tiborga olib, quyidagini yozamiz

$$E_a = B_8 l_i \tau \alpha_i \frac{2pn}{60} \frac{N}{2a}$$

yoki,  $B_8 l_i \tau \alpha_i = \Phi$  ekanini e'tiborga olib, o'zgarimas tok mashinasi EYKning ifodasini olamiz

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_e \Phi n, \quad (15.20)$$

bunda,

$$C_e = pN / (60a) \quad (15.21)$$

- mashina qiymatlari doimiysi;  $\Phi$  – asosiy magnit oqimi, Vb;  $n$  – yakorning aylanish tezligi, ay/min.



**Elektromagnit moment.** Yakor chulg'aming pazzlarda joylashgan o'tkazgichlaridan tok  $i_a$  oqishi natijasida har bir o'tkazgichda elektromagnit kuchi paydo bo'ladi

$$F_{EM} = B_\delta I_a i_a. \quad (15.22)$$

Yakordagi barcha elektromagnit  $F_{EM}$  kuchlari yig'indisining yakor magnit o'zagi radiusi ( $D_a/2$ ) ga teng bo'lgan elkasiga ta'siri, yakorda elektromagnit  $M$  momentini hosil qiladi.

Havo oralig'ida magnit induksiyasi o'zgarishi to'g'ri burchakli taqsimlanish qonuniyati asosida (15.10, a-rasmda 2 gravik) ta'kidlash kerakki,  $F_{EM}$  kuchlar bir onda  $N_t = \alpha_t N$  paz o'tkazgichlariga ta'sir etadi. Demak, o'zgarimas tok mashinasining elektromagnit momenti (N·m)

$$M = F_{EM} \cdot \alpha_t \cdot N \cdot (D_a/2).$$

Mashinasining elektromagnit kuchi  $F_{EM} = B_\delta I_a i_a$  hamda parallel shaxobchalardagi tok  $i_a = I_a/(2a)$  e'tiborga olib, quyidagini olamiz

$$M = B_\delta \cdot I_a \cdot [I_a/(2a)] \cdot \alpha_t \cdot N \cdot (D_a/2).$$

Asosiy magnit maydon (15.15) ifodasini hamda  $D_a = 2p\tau/\pi$  ekanini e'tiborga olib, elektromagnit moment ifodasini yozish mumkin, (N·m):

$$M = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a} \Phi I_a = C_M \Phi I_a, \quad (15.24)$$

bunda  $I_a$  – yakor chulg'ami toki, A;

$$C_M = p \cdot N/(2\pi a) \quad (15.25)$$

- berilgan mashina uchun o'zgarimas miqdor.

Elektromagnit momenti mashina motor rejimida ishlaganda aylantiruvchi, generator rejimida ishiaganda uni aylantirayotgan birlamchi motorga nisbatan tormozlovchi hisoblanadi.

Ifoda (15.20) dan (15.24) ga asosiy magnit maydon  $\Phi = E_a / C_e \cdot n$ , qiymatini qo'ysak, elektromagnit momentning yana bir ifodasini topamiz :

$$M = [60 / (2\pi n)] E_a \cdot I_a = 9,55 P_{EM} / n = P_{EM} / \omega, \quad (15.26)$$

bunda  $\omega = 2\pi n / 60$  - yakorning burchak aylanish tezligi;

$$P_{EM} = E_a \cdot I_a. \quad (15.27)$$

- o'zgarmas tok mashinasining elektromagnit quvvati, Vt.

### Nazorat savollari

1. O'zgarmas tok maninalari yakor chulg'amining o'zgaruvchan tok mashinalari ststor chulg'amidan farqi nimada?

2. Yakor chulg'ami qanday parametrlar bilan xarakterli?

3. Olti qutbli o'zgarmas tok mashinasi yakor chulg'ami oddiy sirtmoqsimon va oddiy to'lqinsimin bo'lganda nechta parallel shoxobcha bo'ladi?

4. Olti qutbli o'zgarmas tok mashinasi yakoridagi oddiy to'lqinsimin chulg'amni oddiy sirtmoqsimon chulg'am bilan asmashtirilsa, mashina EYK necha martaga o'zgaradi?

5. To'rt qutbli o'zgarmas tok mashinasi yakoridagi oddiy sirtmoqsimon chulg'amni oddiy to'lqinsimin chulg'am bilan asmashtirilsa, mashina shaxobchalaridagi toklar necha martaga o'zgaradi?

## 16-bob. O'ZGARMAS TOK MASHINALARI MAGNIT MAYDONI

### 16.1. O'zgarmas tok mashinalari magnit zanjiri

O'zgarmas tok mashinasi magnit tizimi stanina (yarmo), bosh qutblar magnit o'zagi (qutb uchliklari bilan) havo oralig'i va yakor magnit o'zagidan iborat.



16.1-rasm. O'zgarmas tok mashinasi YU.i.rejimidagi magnit maydoni



16.2-rasm. To'rt qutbli mashina magnit zanjiri hisobiy qismlari

16.1-rasmda to'rt qutbli mashinaning magnit maydoni tasviri keltirilgan. Bunda mashinaning YU.i.rejimi nazarda tutilgan bo'lib, MYUK faqat qo'zg'atish chulg'ami yordamida hosil qilingan, yakor chulg'ami va qo'shimcha qutblar chulg'amlarida tok nolga teng yoki tok shunchalar kichikki, uning magnit maydoni tasviriga ta'sirini e'tiborga olmasa bo'ladi. Rasm sodda bo'lishi uchun qo'shimcha qutblar ko'rsatilmagan, chunki YU.i.rejimida ularning magnit maydoni shakliga ta'siri sezilarsiz. 16.1-rasmdan shu kelib chiqadiki, bosh qutblar magnit oqimi ikki qismdan iborat: ko'proq qismi asosiy magnit oqim  $F_{ni}$  tashkil etsa, kichik qismi - qutblar tarqoq magnit oqimi  $F_{\sigma}$ . Tarqoq magnit oqim tarqoqlik koeffitsiyenti orqali hisobga olinadi.

Bir juft qutb qo'zg'atish chulg'amining magnit yurituvchi kuchi (MYUK) yuksiz ishlash rejimida magnit zanjir qismlarining magnit kuchlanganligi yig'indisi bilan aniqlanadi (16.2-rasm).

$$F = \sum F = 2F_b + 2F_z + 2F_m + F_a + F_{ya}, \quad (16.1)$$

bunda  $F_b$ ,  $F_z$ ,  $F_m$ ,  $F_a$  va  $F_{ya}$  – havo oralig‘i, yakorning tish qoplami, bosh qutb, yakor orqa qismi va yarmo (stanina orqa qismi) magnit kuchlanganligi.

Magnit zanjir qismlari magnit kuchlanganlikni hisoblash o‘zgaruvchan mashinalar magnit zanjirlarini hisoblashdagi kabi bo‘ladi. Bunda stanina va bosh qutb magnit o‘zagi hisoblanishi bosh qutb magnit maydoni  $F_m$  bo‘yicha olib boriladi, uning asosiy magnit oqimidan tarqoq magnit oqim miqdoriga katta

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = \Phi(1 + \sigma_m),$$

bunda  $\sigma_m \approx 10 \cdot \delta / \tau = 0,10 \div 0,25$  – magnit tarqoqlik koeffitsienti.

Mashinaning EYK  $E_a$  berilgan bo‘lsa, unga mos magnit oqim miqdori hisoblanadi (Vb)

$$\Phi = \frac{60aE_a}{pNn}. \quad (16.2)$$

Shundan so‘ng, magnit zanjirning har bir qismi uchun magnit induksiya hisoblanadi

$$B_x = \Phi_x / S_x, \quad (16.3)$$

bunda  $\Phi_x$  – magnit zanjirining mazkur qismi magnit maydoni, Vb;  $S_x$  - shu qismning ko‘ndalang kesimi, m<sup>2</sup>.

Ushbu magnit zanjiri qismining ferromagnit materiali uchun jadval yoki magnitlanish tavsiflarining egri chiziqlaridan foydalanib, shu qism magnit maydoni kuchlanganligi  $H_x$  topiladi, so‘ngra uning magnit yurituvchi kuchi (A)  $F_x = H_x l_x$  va bir juft qutb qo‘zg‘atish chulg‘ami uchun MYUK (16.1) dan aniqlanadi.

## 16.2. O'zgarimas tok mashinasida yakor reaksiyasi

Mashinaning YU.i.rejimida yakor chulg'amida tok deyarli bo'lmaydi, mashinadagi magnit oqimlarni qo'zg'atish chulg'ami MYUK  $F_{\kappa_0}$  hosil qiladi. Bu holatda mashinaning magnit maydoni qutb o'qlariga nisbatan simmetrik bo'ladi (16.3,a-rasm). Magnit induksiyaning havo oralig'ida taqsimlanishi trapetsiyaga yaqin egri chiziq kabi bo'ladi.

Agar mashina yuklansa, yakor chulg'amida  $I_a$  tok hosil bo'ladi, u o'z navbatida, magnit tizimda yakort MYUK  $F_a$  ni hosil qiladi. Faraz qilaylik, qo'zg'atish MYUE nolga teng va mashinada faqat yakor MYUK mavjud. U holda mashina MYUK hosil qilgan magnit maydon 16.3,b-rasmda keltirilgan shaklga ega bo'ladi. Ba rasmdan ko'rinadiki, yakor chulg'ami MYUK cho'tkalar liniyalari bo'yicha yo'naladi (bu holatda geometrik neytral bo'ylab).

Yakor MYUK eng katta qismi cho'tka liniyasida bo'ladi (16.3, b-rasm, 1 egri chiziq), qutb o'qlar bo'ylab bu MYUK nolga teng bo'ladi. Biroq, yakor magni oqimining havo orlig'ida taqsimlangan magnit induksiya MYUK grafigi bilan faqat qutib uchliklari chegarasidagina mos keladi. Qutblar aro fazoda esa magnit induksiya keskin susayadi (16.3, b-rasm, 2 egri chiziq). Bu qutblar aro fazoda yakor magnit oqimiga qarshilikning ortishi bilan tushuntiriladi. Yakor chulg'amining bir juft qutbga mos MYUK chulg'amdagi o'tkazgichlar  $N$  soni va yakor toki  $I_a$  ga proporsional bo'ladi

$$F_a = NI_a / (4ap). \quad (16.6)$$

Yakor tashqi diametri  $D_a$  bo'ylab uzunlik hirligiga mos keluvchi yakor toki  $i_a$  ni tasvirlovchi liniyaviy yuklanish tushunchasini kiritamiz (A/m):

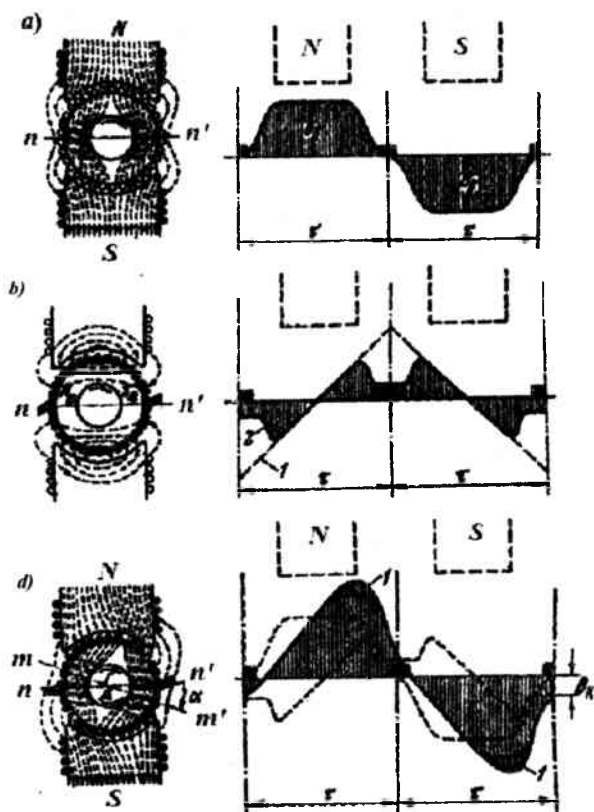
$$A = Ni_a / (\pi D_a), \quad (16.7)$$

bunda  $i_a = I_a / (2a)$  – yakorning bir o'tkazgichidagi tok, A.

Liniyaviy yuklanish qiymati umum qo'llash o'zgarimas tok mashinalari uchun ular quvvatlariga ko'ra  $A = (100 \div 500) \cdot 10^2$  A/m

gacha bo'lishi mumkin. Liniyaviy yuklamishdan foydalanib yakor MYUK uchun ifodani yozamiz:  $F_a = Ar$ . Shunday qilib, yuklangan o'zgarmas tok mashinasida ikki MYUK ta'sir etar ekan: qo'zg'atish  $F_{k0}$  va yakor  $F_a$ .

Yakor MYUKning qo'zg'atish MYUKga ta'siri, yoki yakor toki hosil qilgan magnit maydonning qo'zg'atish chulg'ami hosil qilgan magnit maydoniga ta'siri yakor reaksiyasi deyiladi. Yakor reaksiyasi magnit maydonning shaklini o'zgartiradi va uni qutb o'qlariga nisbatan nosimmetrik qiladi.



16.3-rasm. Magnit induksiyaning havo oralig'ida taqsimlanishi

16.3.d-rasmda o'zgarmas tok generatori yakori strelka bo'yicha aylangandagi natijaviy magnit oqim kuch chiziqlarining taqsimlanishi ko'rsatilgan. Mashina motor rejimida ishlab, faqat yakor strelkaga teskari yo'nalganda aylanganda ham magnit liniyalari taqsimlanishi shu ko'rinishda bo'ladi. Agar magnit tizim to'yinmagan bo'lsa, u holda yakor reaksiyasi natijaviy magnit oqimning qiymatini o'zgartirmay, faqat uning shaklini o'zgartiradi xolos: yakor MYUK va qo'zg'atish MYUK yo'nalishlari mos kelgan qutb chekkasi va uning ostidagi tish qatlami magnitlanadi (magnit maydoni ortadi); aksincha, yakor MYUK qo'zg'atish MYUKga qarama-qarshi bo'lgan qutb chekkasi va uning ostidagi tish qatlami magnitsizlanadi (magnit maydon kamayadi).

Natijaviy magnit maydon shaklining buzilishi mashinaning ishlash rejimiga salbiy ta'sir etadi: cho'tka kontakt tizimining og'ir ishlash rejimi kollektordagi uchqunlar chiqishini oshiradi; qutbning bir qirrasidagi magnit oqim ortishi, unga mos kelgan seksiyalarda EYK oniy qiymatining keskin ortishiga va kollektor plastinalar orasida kuchlanish ortishiga olib keladi. Natijada plastinalar aro mikanit izolyatsiyaning teshilishiga va quvvatli elektr yoyiga olib keladi.

Magnit tizimi to'yinmagan mashinalarda yakor reaksiyasining ta'siri shunday salbiy asoratlarga – avariya holatlariga olib kelishi mumkin ekan.

Agar magnit tizim to'yingan bo'lsa, bu aksariyat, ko'pchilik mashinalarda uchraydigan holat, u holda qutb uchligi bir chekkasining va uning ostida joylashgan tish qatlamining magnitlanishi (magnit maydon ortishi) ikkinchi chekkadagi magnitsizlanishga nisbatan kamroq bo'ladi. Bu havo oralig'ida magnit induksiyasi taqsimlanishiga ravonlashadi, magnit induksiya maksimumi magnitlanuvchi chekkada kamroq ortadi va mashina ishiga ijobiy ta'sir etadi. Ammo, yakor reaksiyasining bunday ta'siri magnit tizim to'yinishi natijasida, yakor yulg'amining natijaviy EYKni kamaytiradi.

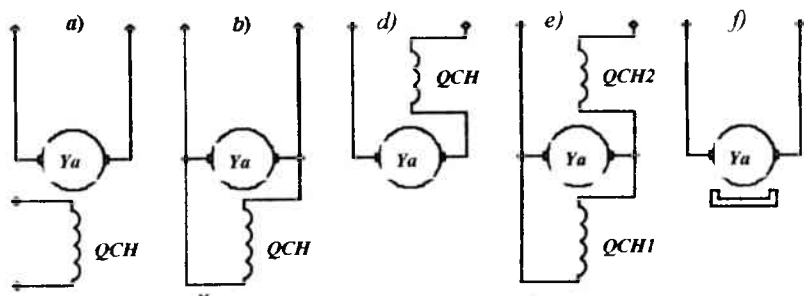
Quvvati 0,4 KWt va undan yuqori bo'lgan o'zgarmas tok mashinalarida yakor reaksiyasining salbiy ta'sirini kamaytirish maqsadida qo'shimcha qutblar o'rnatiladi, ularning chulg'amlari yakor chulg'amiga ketma-ket ulanishi sababli, yakor reaksiyasi

natijasida kamaygan natijaviy magnit oqim qo‘shimcha qutb magnit oqimi bilan kompensatsiyalanadi (magnit oqim o‘rni to‘ldiriladi).

### 16.3. O‘zgarmas tok mashinalari chulg‘amlarini ulash turlari

Mashina ishlashi uchun magnit maydoni bo‘lishi mavjud bo‘lishi zarur. Aksariyat, o‘zgarmas tok mashinalarida bu magnit maydonni o‘zgarmas kuchlanish manbaidan quvvatlanuvchi qo‘zg‘atish chulg‘ami hosil qiladi. O‘zgarmas tok mashinalarining xususiyatlari, ko‘p jihatdan qo‘zg‘atish chulg‘amlarini ulashga bog‘liq.

O‘zgarmas tok mashinalarini qo‘zg‘atish usullariga qarab quyidagicha turkumlarga bo‘lish mumkin:



16.4-rasm. O‘zgarmas tok mashinalarida qo‘zg‘atish (magnit maydon hosil qilish) usullari

- mustaqil qo‘zg‘atishli mashina - qo‘zg‘atish chulg‘amiga (QCH) o‘zgarmas tok yakor chulg‘ami bilan bog‘liq bo‘lmagan, alog‘ida manbadan beriladi (16.4,a-rasm);

- parallel qo‘g‘otishli mashina - QCH va yakor chulg‘ami parallel ulangan (16.4,b-rasm);

- ketma-ket qo‘g‘otishli mashina - QCH va yakor chulg‘ami ketma-ket ulangan (16.4,d-rasm);

- aralash qo‘g‘otishli mashina - ikki qo‘zg‘atish chulg‘amlari bo‘lib, biri yakor chulg‘ami bilan parallel (QCH1), ikkinchisi (QCH2) ketma-ket ulangan (16.4,e-rasm);

- o‘zgarmas magnit bilan qo‘zg‘atiluvchi mashina (16.4,f-rasm).



Barcha keltirilgan mashinalar (oxirgisi bundan mustasno) elektromagnitli qo'zg'atish mashinalari turkumiga kiradi, chunki ularda magnit maydon qo'zg'atish chulg'amidan o'tayotgan elektr toki bilan hosil qilinadi.

O'zgarmas tok mashinalari chulg'amlarining boshi va keti Davlat Standarti talabiga ko'ra quyidagicha belgilanadi:

- yakor chulg'ami - Ya1 va Ya2;
- qo'shinch qutb chulg'ami - D1 va D2;
- kompensatsiyalovchi chulg'am - K1 va K2;
- mustaqil qo'zg'atish chulg'ami - M1 va M2;
- parallel qo'zg'atishli chulg'am (shunt) - SH1 va SH2;
- ketma-ket qo'zg'atish chulg'ami (series) - S1 va S2.

### **Nazorat savollari**

1. O'zgarmas tok mashinalari magnit zanjiri qanday qismlari bor?
2. O'zgarmas tok mashinalarida yakor reaksiyasi moyiyati nimida?
3. Nima uchun bo'ylama o'q bo'yicha yakor reaksiyasi ko'ndalang o'q bo'yicha magnitsizlovchi ta'sir etadi?
4. Nima uchun havo oralig'i ortishi bilan yakor reaksiyasining magnitsizlovchi ta'siri susayadi?
5. O'zgarmas tok mashinalarida qanday qo'zg'atish usullari qo'llaniladi?
6. Davlat Standarti bo'yicha o'zgarmas tok mashina chulg'amlari boshi va keti qanday belgilanadi?

## 17-bob. O'ZGARMAS TOK GENERATORLARI

### 17.1. Asosiy tushunchalar

O'zgarmas tok generatorining ishlash jarayonida yakor chulg'amida EYK  $E_a$  [(15.20)ga qarang]. Generatorga yuklanish ulanganda, yakor zanjirida tok hosil bo'ladi, generator chiqish klemmalarida kuchlanish paydo bo'ladi. Kirxgofning kuchlanishlar qonuniga asoslanib, yakor klemmasidagi kuchlanishni quyidagicha ifodalaymiz

$$U = E_a - I_a \sum r. \quad (17.1)$$

$$\text{bunda } r = r_a + r_{Qo'sh} + r_{kch} + r_s + r_{sh} \quad (17.2)$$

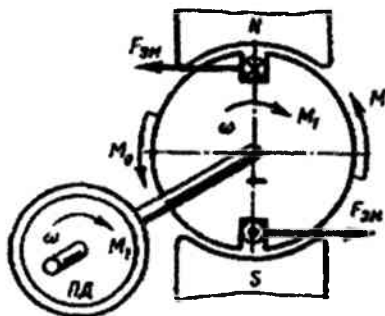
- yakor zanjirining barcha qarshiliklari: yakor chulg'ami  $r_a$ ; qo'shimcha qutb chulg'ami  $r_{Qo'sh}$ ; kompensatsiya chulg'ami  $r_{kch}$ ; ketma-ket ulangan qo'zg'atish chulg'ami  $r_s$ ; cho'tka o'tkinchi kontakti  $r_{sh}$ . Ifoda (17.2)da keltirilgan chulg'amlardan birortasi mashinada bo'lmasa, u holda shu qo'shiluvchi bo'lmaydi.

Generator yakori birlamchi motor yordamida aylantiriladi, u generator valida aylantiruvchi moment  $M_1$  hosil qiladi. Agar generator YU.i.rejimida ishlasa ( $I_a = 0$ ), u holda generator valini aylantirish uchun nisbatan kichik bo'lgan YU.i.momenti  $M_0$  etarli bo'ladi. Bu generator ishlashida hosil bo'ladigan tormozlovchi momentlardan iborat: ishqalanuvi kuchlar momenti va yakordagi uyurma toklar momenti.

Yuklangan generatorning ishlashida yakor chulg'ami o'tkazgichlarida tok hosil bo'ladi, u qo'zg'atuvchi chulg'am g'osil qilgan magnet maydon bilan ta'siri natijasida, yakorda elektromagnet moment  $M$  hosil qiladi [(15.24)ga qarang]. Generatorda bu moment birlamchi motorning aylantiruvchi momentiga qarama-qarshi yo'nalgan, ya'ni u tormozlovchi bo'ladi (15.1-rasm).

Ifoda (17.3) generator aylanish tezligi o'zgarmas ( $n=const.$ ) bo'lganda birlamchi motorning aylantiruvchi momenti  $M_1$  generatorning aks ta'sir etuvchi momentlari (YU.i. $M_0$  momenti va elektromagnit moment  $M$ ) yig'indisi bilan muvozanatlashadi.

$$M_1 = M_0 + M_{EM} . \quad (17.3)$$



17.1-rasm. O'zgarmas tok generatorlaridagi momentlar

Ifoda (17.3) mashina yakori aylanish tezligi sho'garmas  $n=const.$  Bo'lganda - generatorning momentlar tenglamasi deyiladi. Ifodaning (17.3) hadlarini burchak tezligi  $\omega$ ga ko'paytirib, quvvatlar tenglamasini hosil qilamiz

$$P_1 = P_0 + P_{EM} , \quad (17.4)$$

bunda  $P_1 = M_1\omega$  - birlamchi motordan generatorga keltirilayotgan (mexamik) quvvat;  $P_0 = M_0\omega$  - YU.i.quvvati, ya'ni generator yuksiz ishlaganda motordan kelayotgan yuksiz ishiash (mexamik) quvvati (generator yuklanishi uzilgan);  $P_{EM} = M_{EM}\omega$  - generatorning elektromagnit quvvati.

Ifoda (15.27)dan quyidagini hosil qilamiz

$$P_{EM} = E_a I_a ,$$

yoki (17.1) e'tiborga olsak,

$$P_{EM} = UI_a + I_a^2 \sum r = P_2 + P_{ea}, \quad (17.5)$$

bunda  $P_2$  - generatordagi foydali (elektr) quvvat, ya'ni generatorning yuklanishga berayotgan quvvati;  $P_{ea}$ -yakor zanjiridagi chulg'am qizishi va cho'tka kontaktidagi quvvat isroflari.

Generator qo'zg'atish chulg'amidagi isrof  $P_{e,k}$  e'tiborga olib, o'zgaras tok generatori uchun quvvatlar tenglamasini yozamiz

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{\gamma a} + P_{\gamma k} \quad (17.6)$$

Demak, birlamchi motordan generatorga kelayotgan mexanik quvvat  $P_1$  generatorda foydali elektr quvvat  $P_2$  ga aylanib yuklanishga uzatilayapti va quvvat isroflarini qoplash ( $P_0 + P_{\gamma a} + P_{\gamma k}$ ) uchun sarflanayapti.

Aksariyat, generatorlar yakori o'zgaras tezlik bilan aylangani uchun, uning tavsiflari  $n = const.$  bo'lganda ko'riladi.

Yuksiz ishlash tavsifi - YU.i.rejimida generator chiqish klemmlaridagi kuchlanish  $U_0$  ning qo'zg'atish tokiga bog'liqligi:

$$U_0 = f(I_k), \text{ bunda } I_a = 0 \text{ va } n = const.$$

YUklanish tavsifi - yuklanish bilan ishlayotganda ( $I_a = const.$ ) generator chiqish klemmlaridagi kuchlanish  $U$  ning qo'zg'atish toki  $I_k$  ga bog'liqligi:

$$U = f(I_k), \text{ bunda } I_a \neq 0 \text{ va } n = const.$$

Tashqi tavsifi - generator chiqish klemmlaridagi kuchlanish  $U$  ning yuklanish toki  $I$  ga bog'liqligi:

$$U = f(I), \text{ bunda } r_{reg} = const \text{ va } n = const.$$

bunda  $r_{reg}$  - qo'zg'atish chulg'amidagi rostlovchi reostat qarshiligi.

Rostlovchi tavsifi -- qo'zg'atish toki  $I_R$  ning yuklanish toki  $I$  ga bog'liqligi:

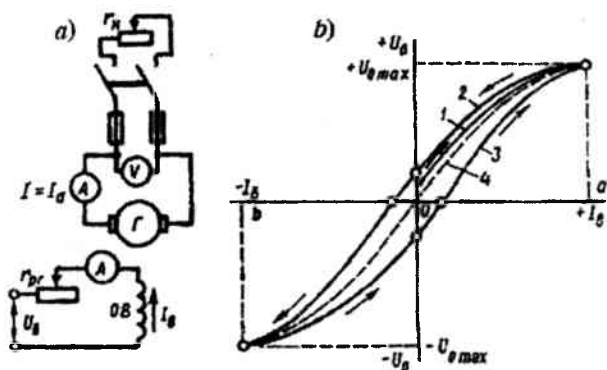
$$I_k = f(I), \text{ bunda } U = const. \text{ va } n = const.$$

Keltirilgan tavsiflarning ko'rinishlari o'zgaras tok generatori xususiyatlarini aniqlab beradi.

## 17.2. Mustaqil qo'zg'atishli generator

Mustaqil qo'zg'atishli generator ulanish sxemasi 17.2,*a*-rasmida ko'rsatilgan. Qo'zg'atish chulg'ami zanjiriga ulangan reostat qo'zg'atish tokini va, demak, asosiy magnit maydon qiymatini boshqarish imkonini beradi. Qo'zg'atish chulg'ami o'zgarmas tok manbaidan energiya iste'mol qiladi: akkumulyator, to'g'rilagich yoki boshqa o'zgarmas tok generatori, bunday holda u qo'zg'atkich deb ataladi

**Yuksiz ishlash tavsifi**  $U_0 = f(I_{KOZ})$  ni olishda yuklamish uzilgan va generator YU.i.rejimida ishlaydi. Nominal aylanish tezligi o'rnatiladi va uni o'zgarmas holatda bo'lishi ta'minlanadi.



17.2-rasm. Mustaqil qo'zg'atishli generator prinsipial sxemasi (a) va yu.i tavsifi (b)

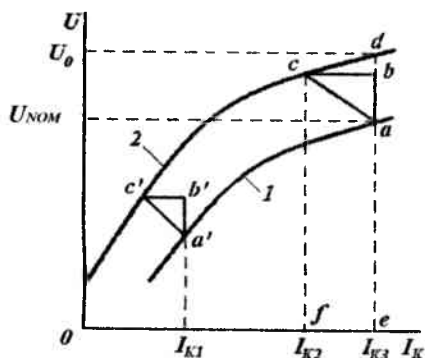
Asta qo'zg'atish toki  $I_{KOZ}$  noldan  $+I_{KOZ} = Oa$  qiymatida  $U_0 = 1,15U_{NOM}$  gacha o'zgartiriladi. Egri chiziq 1 (17.2,*b*-rasm) qurish uchun  $I_{KOZ}$  va  $U_0$  larning birnecha (8-10 nuqta) yozib olinadi. Egri chiziq 1 ning boshlang'ich ordinatasi nolga teng emas, bu magnit tizimda kichik qoldiq magnit oqimi mavjudligi bilan tushuntiriladi. Qo'zg'atish tokini nolgacha kamaytirib va uning yo'nalishini o'zgartirib, asta absolyut qiymatini oshirib  $-I_{KOZ} = Ob$  nuqttagacha boriladi, shu tariqa olingan egri chiziq 2 YU.i.tavsifining tushuvchi

shoxobchasi deyiladi. Birinchi va uchinchi kvadrantlarda tushuvchi shaxobchasi 1 egri chiziqdan yuqori bo'ladi. So'ngra qo'zg'atish toki nolgacha o'zgartirilib, yo'nalishi ham o'zgartirilib,  $+I_{K\omega'z} = Oa$  miqdorgacha oshiriladi va uni yuqorilashuvchi shaxobcha deyiladi (3 egri chiziq). Z egri chiziq boshqalaridan quyida bo'ladi. YU.i. tavsifining tushuvchi va yuqorilashuvchi shaxobchalari magnitlanish (gisterezis) sirtmog'i (petlya namagnichivaniya, gisterezisa) deyiladi. YU.i. tavsifida 2 va 3 egri chiziqning shrtacha qiymatini o'tkazib (4 egri chiziq) hisobiy yuksiz ishlash tavsifini olamiz.

YU.i. tavsifining to'g'ri chizikli qismi magnit o'zakning to'yinmagan qismiga mos keladi. Qo'zg'atish tokini oshirishda davom etsak, mashinaning magnit o'zagi to'yina boshlaydi va tavsif egri chiziq xarakteriga ega bo'ladi.  $U_0 = f(I_{K\omega'z})$  bog'lanish boshqa masshtabda mashinaning magnit tavsifini takrorlaydi va mashinaning magnitlanish xususiyatlari haqida fikr yuritish imkonini beradi.

**Generatorning yuklanish tavsifi.** Bu tavsif aylanish tezligi va yuklanish miqdorlari o'zgarmas (masalan, nominal)  $I_a = const$  bo'lganda generator chiqish klemmalaridagi kuchlanish  $U$  ning qo'zg'atish toki  $I_K$  bog'liqligani ko'rsatadi. Ushbu shartlar bajarilganda generator chiqishidagi kuchlanish yakordagi EYKdan kichik (17.1), shu sababli yuklanish tavsifi 1 yu.i.tavsifidan 2 dan (17.3-rasm) quyiroqda joylashadi. Agar nominal kuchlanish  $U_{NOM}$  ga mos kelgan  $a$  nuqtadan yuqoriga  $ab = I_a \sum r$  kesmani qo'ysak va gorizontal kesma be ni YU.i.tavsifi bilan kesishgunga qadar qo'ysak, so'ngra  $a$  va  $s$  nuqtalar bilan tutashtirsak, u holda  $abs - tavsifiy uchburchakni$  hosil qilamiz.

Generator YU.i.rejimida ishlayotganda qo'zg'atish toki  $I_{K1} = I_{K.NOM}$  bo'lganda chiqishdagi kuchlanish bo'lsin; yuklanish ulangandan so'ng (qo'zg'atish toki o'zgarmas) generator kuchlanishi  $U_{NOM} = ae$  gacha pasayadi. Shunday qilib,  $da$  kesma qo'zg'atish toki  $I_{K1} = I_{K.NOM}$  bo'lganda yuklanishning noldan nominal qiymatgacha o'zgargandagi kuchlanishning  $\Delta U = U_0 - U_{NOM}$  pasayuvini ko'rsatadi. Bunda generatorning yakor klemmalarida kuchlanish o'zgarishi ikki sabab bilan sodir bo'ladi: yakor zanjirida kuchlanish pasayuvi va yakor reaksiyasining magnitsizlovchi ta'siri.



17.3-rasm. Mustaqil qo'zg'atkichli generator yuklanish tavsifi

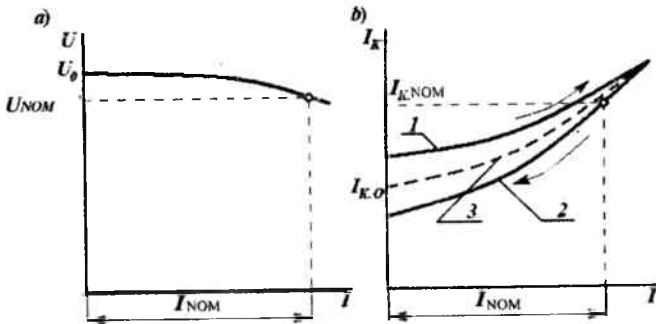
**Tashqi tavsif.** Bu tavsif generatorning chiqish klemmlaridagi kuchlanish  $U$  ning yuklanish toki  $I$  ga bo'lgan bog'lanishini aks ettiradi. Tashqi tavsifni qurish uchun qiymatlarni olishda generator yakorini nominal tezlikkacha  $n = n_{NOM}$  aylantiriladi va uni nominal kuchlanish  $U = U_{NOM}$  da nominal tok  $I_a = I_{a,NOM}$  qiymatigacha yuklaniriladi. So'ngra, asta va ravon yuklanishni YU.i.rejimiga  $I_a = 0$  cha kamaytiriladi, hamda o'lchov asboblari ko'rsatkichlari yozib olinadi. Tajriba davomida qo'zg'atish chulg'amining zanjiridagi qarshilik  $r_k = const.$  va yakor aylanish tezligi  $n = n_{NOM} = const.$  o'zgarmas qoldiriladi.

17.4,a-rasmda mumtaqil qo'zg'atishli generatorning tashqi tavsifi ko'rsatilgan. Undan ko'rinadiki, yuklanish toki  $I_a$  ortishi bilan generator chiqish klemmlaridagi kuchlanish  $U$  kamayadi; buni yakor reaksiyasining magnitsizlovchi ta'siri va yakor zanjiridagi kuchlanishlar pasayuidan, deb tushunish zarur. Tashqi tavsifning absissa o'qiga nishabligi [tashqi tavsifning bikrligi (jestkost vneshney xarakteristiki)] ni baholash uchun kuchlanishlar pasayuvi, deb nomlangan - generator yuklanishi tashlanishida kuchlanishning nominal o'zgarishi qabul qilingan

$$\Delta U_{NOM} = \frac{U_0 - U_{NOM}}{U_{NOM}} \cdot 100\%. \quad (17.9)$$

Aksariyat, mustaqil qo'zg'atishli generator uchun  $\Delta U_{NOM} = 5 \div 10\%$ .

**Generatorning rostlash tavsifi.** Tavsif  $I_k = f(I_a)$ , generator yakori aylanish tezligi o'zgarmas ( $n = n_{NOM} = const.$ ) bo'lib, yuklanishi o'zgarganda yakor klemmlaridagi kuchlanishni o'zgarmas va nominal qoldirish uchun qo'zg'atish tokini qanday o'zgartirish zarurligini ko'rsatadi.



17.4-rasm. Mustaqil qo'zg'atkichli generatorning tashqi (a) va rostlovchi (b) tavsiflari

Generator yuklamasiz ishlaganda qo'zg'atish chulg'amidagi tok  $I_{k0}$  ning qiymatini shunday o'rnatiladiki, chiqish kuchlanishi  $U = U_{HOM}$  nominal bo'lsin. So'ngra, generator yuklanishi asta oshiriladi, shunda kuchlanish pasayadi va qo'zg'atish toki o'zgartirilib, kuchlanish yana nominal qiymatiga etkaziladi. Shu tariqa, yuklanishning har bir o'zgarishida, kuchlanish nominal holatda ushlab turiladi. Ushbu o'zgarishlar yozib olinib, egri chiziq chizilganda, rostlash tavsifining yuqorilashuvchi shaxobcha hosil qilinadi (17.4,b-rasmda 1 egri chiziq).

Asta sekin yuklamasini YU.i.rejimigacha kamaytirib va yuqorida kelfirilganidek, qo'zg'atish tokini rostlab, kuchlanishni o'zgarmas (nominal) holatida ushlab, tavsifning pasayuvchi shaxobchasi (17.4,b-rasmda 2 egri chiziq) hosil qilinadi.

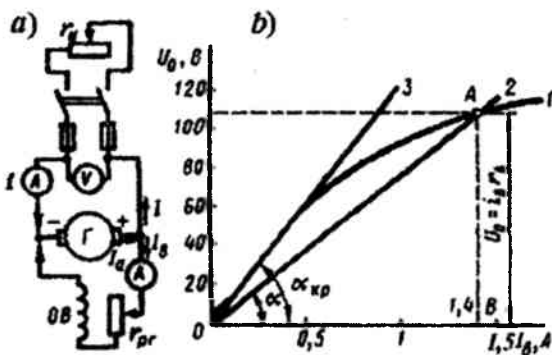
Rostlash tavsifining pasayuvchi shaxobchasi yuqorilashuvchi shaxobchasidan quyida bo'ladi. Bu hodisa qoldiq magnet maydonning ta'siri bilan tushuntiriladi. 1 va 2 egri chiziqlar o'rtisidan o'tkazilgan 3 egri chiziq, generatorning amaldagi rostlash tavsifi deyiladi.



Mustaqil qo'zg'atkichli o'zgarmas tok generatorining asosiy kamchiligi - o'zgarmas tok manbi - qo'zg'atkichning zarurligidir. Biroq, bu generatorda kuchlanishning keng diapazonda boshqarilish imkoniyatlari, hamda tashqi tavsifining nisbatan bikrligi, uning afzalligidir.

### 17.3. Parallel qo'zg'atishli generator

O'zgarmas tok generatori o'z-o'zini qo'zg'atish prinsipi shunga asoslanganki, avvaldan magnitlangan mashinaning magnit tizimi, uzoq vaqt kichik bo'lsada (to'la magnit oqimning 2-3%) qoldiq oqim  $F_{qold}$  saqlaydi. Yakor aylanganda qoldiq magnit oqim  $F_{qold}$  yakor chulg'amida EYK  $E_{qold}$  induktivlaydi. Uning ta'sirida qo'zg'atish chulg'amida kichik tok  $I_{qold}$  hosil bo'ladi. Agar qo'zg'atish chulg'ami MYUK  $w_K I_{qold}$  ham magnit oqim  $F_{qold}$  bilan bir xil yo'nalishda bo'lsa, u holda u bosh qutb magnit oqimini oshiradi. Bu, o'z navbatida, generator EYKni oshiradi, undan qo'zg'atish toki yana ortadi. Shunday jarayon generator kuchlinishi qo'zg'atish zanjirida kuchlanishlar pasayuvi bilan muvozanatlagungacha, ya'ni  $I_K r_K = U_0$  bo'lgunga qadar davom etadi.



17.5-rasm. Parallel qo'zg'atishli generator sxemasi (a) va yu.i tavsifi (b)

17.5,a-rasmda parallel qo'zg'atishli generator elektr sxemasi va 17.5,b-rasmda generatorning YU.i.tavsifi (1 egri chiziq), hamda qo'zg'atish zanjirining volt-ampere tavsifi  $I_K r_K = f(I_K)$  (2 egri chiziq) keltirilgan.

A nuqtasi o'z-o'zini qo'zg'atish jarayonining tugaganiga mos keladi, chunki aynan shu A nuqtada  $U_0 = I_{\kappa} r_{\kappa}$  bo'ladi.

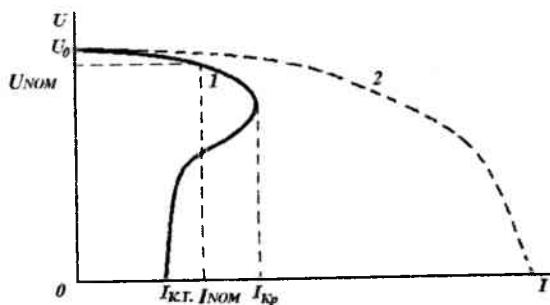
Generator qo'zg'atish jarayonining tahlili shuni ko'rsatadiki, o'zgarmas tok generatori o'z-o'zini qo'zg'atishi uchun quyidagi shartlar bajarilishi zarur:

- a) mashina magnit tizimida qoldiq magnetizm mavjud bo'lishi;
- b) qo'zg'atish chulg'ami shunday ulanishi kerakki, unda qo'zg'atish chulg'amining MYUK bilan qoldiq magnit oqimi  $F_{qold}$  yo'nalishlari bir xil bo'lsin;
- d) qo'zg'atish zanjiri qarshiligi kritik qarshilikdan kichik bo'lsin;
- e) yakorning aylanish tezligi kritik tezlikdan katta bo'lishi.

Parallel qo'zg'atishli generatorning o'z-o'zini qo'zg'atish jarayoni faqat bir yo'nalishda bo'lishi mumkiligi uchun, generatorning YU.i.tavsifi koordinata o'qining faqat bir kvadrantida bo'lishi mumkin.

Parallel qo'zg'atishli generatorning yuklanish va rostdash tavsiflari mustaqil qo'zg'atkichli generator tavsiflaridan deyarli farq qilmaydi.

Parallel qo'zg'atishli o'zgarmas tok generatorining tashqi tavsifi (17.6-rasm, 1 egri chiziq) mutaqil qo'zg'atkichli (2 egri chiziq) generatorning tashqi tavsifiga nisbatan bikrligi kamroq. Bunga sabab, parallel qo'zg'atishli generatorda yuklanish ortishi bilan kuchlanishning pasayishining mustaqil qo'zg'atkichli generatordagi ikki sababga (yakor reaksiyasi va yakor zanjirida kuchlanishlar pasayuvi), uchinchi sabab qo'shiladi - yuqoridagi ikki sabab tufayli qo'zg'atish tokining kamayishi.



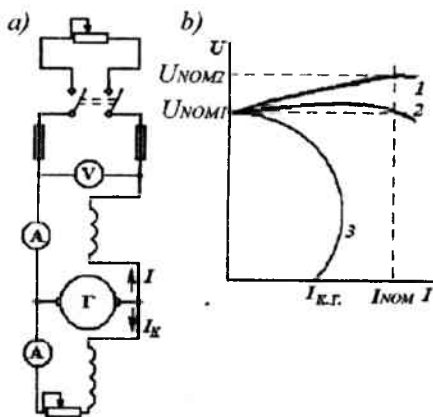
17.6-rasm. Parallel qo'zg'atishli generator tashqi tavsifi

## 17.4. Aralash qo'zg'atishli generator

Aralash qo'zg'atishli generator (17.7, a-rasm) parallel va ketma-ket qo'zg'atish chulg'amlari mavjud. Qo'zg'atish magnit oqimi, asosan parallel qo'zg'atish chulg'ami yordamida hosil qilinadi. Ketma-ket chulg'am, aksariyat parallel chulg'am bilan mos (chulg'amlar MYUKlari qo'shilishi uchun) ulanadi.

YU.i. rejimida generator faqat parallel qo'zg'atish chulg'amiga ega, chunki  $I_a = 0$ . YUKlanish ulangandan so'ng ketma-ket chulg'amning MYUK paydo bo'ladi va magnit tizimni magnitlaydi, yakor reaksiyasi va yakordagi kuchlanishlar pasayuvini kompensatsiyalaydi.

Shu sababli tashqi tavsif bikrligi ortadi (17.7, b-rasm), ya'ni yuklanish ortishi bilan generator kuchlanishi o'zgarishsiz qoladi. Agar istemolchining klemmalarida (liniyaning oxirida) kuchlanish o'zgarishsiz qolishi talab etilsa, u holda ketma-ket qo'zg'atish chulg'ami o'ramlari soni shunday oshiriladiki, bu chulg'am MYUK limiyadagi kuchlanishlar pasayuvini ham kompensatsiyalasim (1 egri chiziq).



17.7-rasm. Aralash qo'zg'atishli generator ulanish sxemasi (a) va uning tashqi tavsiflari (b)

Qo'zg'atish chulg'amlari qarama-qarshi ulanganda, yuklanish ortishi bilan kuchlanish keskin pasayadi (3 egri chiziq). Bu ketma-ket qo'zg'atish chulg'aming MYUK parallel qo'zg'atish chulg'ami MYUK bilan qarama-qarshi yo'nalishda bo'lib, uni magnitsizlashi bilan tushuntiriladi. Chulg'amlarni qarama-qarshi ulash maxsus belgilangan generatorlarda qo'llanilib, tashqi tavsifning keskin tushuvchi bo'lishi uchun qo'llaniladi.

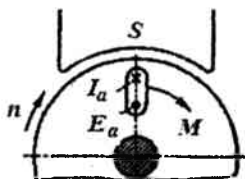
### **Nazorat savollari**

1. O'zgarmas tok generatorlarini qanday tavsiflari xarakterlaydi?
2. Nima uchun parallel qo'zg'atishli generatorda tashqi tavsifi bikrligi katta?
3. O'zgarmas tok generatorining o'z-o'zini qo'zg'atish shartlari qanday?
4. Aralash qo'zg'atishli generatorning qanday ulanishida tashqi tavsif bikrligi yuqori bo'ladi?
5. Generator yuklanishi tashlangandagi nominal kuchlanish pasayuvi nima?
6. Mustaqil qo'zg'atishli generatorning yuksiz ishlash rejimidagi kamayuvchi va ko'tariluvchi shaxobchalarning farqi nimada?
7. Generatorning elektromagnit momentining muvozanat tenglamasini ko'rsating.
8. Generatorning yakor chulg'amidagi kuchlanishlar pasayuvi umumiy holda qanday elementlarda ko'riladi?

## 18-bob. O'ZGARMAS TOK MOTORLARI

### 18.1. Asosiy tushunchalar

O'zgarmas tok motori qaytarilish xususiyatiga ega, ya'ni u motor va generator rejimlarida ishiashi mumkin. Shu sababli, agar o'zgarmas tok mashinasini o'zgarmas tok manbaiga ulansa, u holda yakor va qo'zg'atish chulg'amlarida toklar oqadi. Yakor tokining qo'zg'atish magnit oqimi bilan o'zaro ta'siri natijasida yakorda elektromagnit momenti  $M$  hosil bo'ladi. Bu moment generatordagi kabi tormozlovchi emas, balki aylantiruvchi moment bo'ladi.



18.1-rasm. Motor yakorida teskari-EYK ( $E_a$ ) yo'nalishi

Elektromagnit moment ta'sirida yakor aylana boshlaydi, ya'ni mashina motor rejimida ishlaydi, bunda tarmoqdan elektr energiya istemol qiladi va uni valdagi mexanik energiyaga aylantiradi. Motor ishlashi jarayonida, uning yakori magnit maydonda aylanadi. Natijada, yakor chulg'amida EYK  $E_a$  induktivlanadi, uning yo'nalishini "o'ng qo'l" qoidasi yordamida aniqlanadi. O'zining xususiyati bo'yicha motor EYKi generatorning yakor chulg'amida induktivlangan EYKdan farq qiladi. Lekin, motorda EYKning yo'nalishi yakor toki yo'nalish  $I_a$  ga qarama-qarshi bo'ladi, shu sababli uni yakorning teskari ta'sir etuvchi EYKi (teskari-EYK) deyiladi (18.1-rasm).

O'zgarmas aylanish tezligi bilan ishlayotgan motor uchun kuchlanishlar (EYK) tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$U = E_a + I_a \sum r. \quad (18.1)$$

(18.1) dan shu ma'lum bo'ladiki, tarmoqdan motorga keltirilgan kuchlanish teskari-EYK va yakor zanjiridagi kuchlanish pasayuvi bilan muvozanatlanadi. Ifoda (18.1) asosida yakor toki quyidagicha bo'ladi

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum r}. \quad (18.2)$$

Tenglama (18.2)ning ikki tomonini yakor tokiga ko'paytirib, yakor zanjiri uchun quvvat tenglamasini aniqlaymiz

$$UI_a = I_a^2 \sum r + E_a I_a, \quad (18.3)$$

bunda  $UI_a$  – yakor chulg'ami zanjiridagi quvvat;  $I_a^2 \sum r$  – yakor chulg'ami zanjiridagi quvvat isroflari.

Ifoda  $E_a I_a$  ning mohiyatini aniqlash uchun, quyidagi o'zgartirish kiritamiz

$$E_a I_a = \frac{pN}{60a} \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\omega}{2\pi} I_a,$$

yoki

$$E_a I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \omega.$$

Biroq, (15.24) ifodaga ko'ra

$$[pN / (2\pi a)] \Phi I_a = M,$$

u holda

$$E_a I_a = M \omega = P_{EM}, \quad (18.4)$$

bunda  $\omega = 2\pi n / 60$  – yakor aylanishining burchak tezligi;  $P_{EM}$  – motorning elektromagnit quvvati.

Demak,  $E_a I_a$  ifoda motorning elektromagnit quvvatini aks etadi.

Ifoda (18.3) ni o'zgartirib, (18.4) ni e'tiborga olib quyidagini olamiz.

$$UI_a = M\omega + I_a^2 \sum r.$$

Ushbu tenglamaning tahlili shuni ko'rsatidiki, motor validagi yuklanish ortishi bilan, ya'ni elektromagnit moment  $M$  ortishi bilan, yakor chulg'ami zanjiridagi quvvat  $UI_a$ , ya'ni motor kirishidagi quvvat ortadi. Biroq, kuchlanishning qiymatini o'zgarmas qilib ushlaganimiz ( $U = const.$ ) tufayli, motor yuklanishining ortishi bilan yakor chulg'amidagi tok  $I_a$  ham ortadi.

O'zgarmas tok motorlari qo'zg'atish usullariga qarab, generatorlardagidek, o'zgarmas magnitli motorlar va elektromagnit qo'zg'atishli motorlarga ajratiladi. Elektromagnit qo'zg'atishli motorlar qo'zg'atish chulg'amlarining yakor chulg'ami bilan ulanishiga qarab parallel (shunt) qo'zg'atishli, ketma-ket qo'zg'atishli (series) va aralash qo'zg'atishli (kompaundli) motorlar turkumiga bo'linadilar.

Yakor EYKning analitik ifodasiga  $E_a = C_e \Phi n$  ga ko'ra motor yakori aylanish tezligi (ay/min)

$$n = \frac{E_a}{C_e \Phi}$$

EYKning qiymatini (18.1) ifodadan olib,  $n$  ga qo'ysak

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{C_e \Phi}, \quad (18.5)$$

ya'ni yakor aylanish tezligi kuchlanishga to'g'ri proporsional va magnit maydon qiymatiga teskari proporsional ekan. Bu fikrning fizik tushunchasi shunday tushuntiriladi: kuchlanishning ortishi yoki magnit oqimning kamayishi ( $U - E_a$ ) ayirmaning ortishiga; o'z navbatida, bu tok  $I_a$  ning olib keladi [(18.2)ga qarang]. Buning natijasida miqdori ortgan yakor toki  $I_a$  aylantiruvchi momentni oshiradi, agar shunda yuklanish (qarshilik) momenti o'zgarib qolsa, yakor aylanish tezligi ortadi.

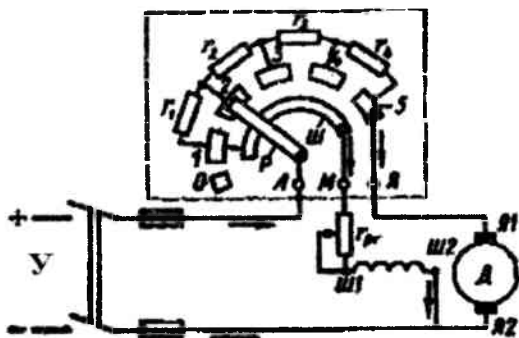
Ifoda (18.5) ga ko'ra, motor aylanish tezligini, yakor chulg'amiga keltirilayotgan kuchlanish  $U$ , asosiy magnit maydon  $F$  (qo'zg'atish toki  $I_K$ ) yoki yakor zanjiri qarshiligini o'zgartirib boshqarish mumkin ekan.

## 18.2. Motorni ishga tushirish

Yakorning toki quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$I_a' = U / \sum r. \quad (18.6)$$

Aksariyat, qarshilik  $\sum r$  ning qiymati kichik bo'radi, shu sababli ishga tushirish tokining qiymati nominal tokdan 10-20 marta ortiq bo'radi.



18.2-rasm. Ishga tushirish reostatini ulash sxemasi

Bunday katta ishga tushirish toki motor uchun xavfli hisoblanadi. Birinchidan, u mashina kollektorida aylanuvchi olov hosil qilishi mumkin, ikkinchidan, bunday katta tok motorda juda katta ishga tushirish momentini hosil qilib, aylanuvchi qismlar uchun katta zarb bilan ta'sir etib, mexanik emirilishga olib keladi. Nihoyat, bunday katta tok tarmoqda katta kuchlanishlar pasayuqini hosil qilib, boshqa istemolchilar ishiga zarar keltirishi mumkin. Shu sababli, motorni bevosita tarmoqqa ulab (reostatsiz) ishga tushirish, quvvati 0,7-1,0 K Wt dan oshmagan motorlar uchun tavsiya etiladi. Bunday motorlarda, yakor chulg'ami qarshiligining katta ekanligi va kichik aylanuvchi massa bo'lgani uchun, ishga tushirish toki nominal tokdan 3-5 marta katta bo'radi va motor uchun xavfi qolmaydi. Katta



quvvatli motorlarda esa, ularni ishga tushirishda ishga tushirish tokini cheklash maqsadida ishga tushirish reostati (ITR) ishlatiladi (18.2-rasm).

Motor ishga tushirilishidan avval reostatning  $R$  richagi kontakt  $0$  ga qo'yiladi. So'ngra  $U$  ulagich (rubilnik) ulanadi,  $R$  richag  $1$  oraliq qarshilikka qo'yiladi va motor yakor zanjiri tarmoqqa ishga tushirish reostatining  $r_{IT} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$  qarshiligi orqali ulanadi.

Shu onda  $R$  richag va  $SH$  shina orqali tarmoqqa qo'zg'atish chulg'ami ulanadi. Undagi tok richagning qanday holatda ekanligidan qat'iy nazar, qo'zg'atish toki o'zgaraydi, chunki  $SH$  shinaning qarshiligi juda kichik.

Ishga tushirish toki reostatning to'liq qarshiligiga ulangandan so'ng quyidagiga teng bo'ladi

$$I_{IT} = \frac{U - E_a}{\sum r + r_{IT}} \quad (18.7)$$

Yakor zanjirida tok  $I_{IT}$  paydo bo'lishi bilan ishga tushirish momenti  $M_{IT}$  hosil bo'ladi, uning ta'sirida yakor aylana boshlaydi. Yakor aylanish tezligi ortgan sari, unda teskari-EYK  $E_a = C_e \Phi$  ortib boradi, u esa ishga tushirish tokini kamaytiradi.

Aylanish tezligi ortishi bilan, ishga tushirish reostatining  $R$  richagi 2, 3 va h.k. holatlarga o'tkaziladi va yuqoridagi jarayon qaytiriladi. Richag 5 holatga kelganda, motorni ishga tushirish jarayoni tugallanadi ( $r = 0$ ). Ishga tushirish reostatining qarshiligi shunday tanlanadiki, eng katta ishga tushirish toki nominal tok qiymatining 2-3 martasidan ortmasin.

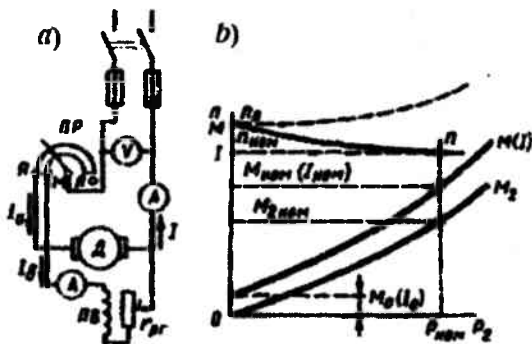
Motor aylantiruvchi elektromagnit momenti  $M$  magnit oqimi  $F$  ga proporsionaldir. Shu sababli parallel va aralash qo'zg'atishli motorlar ishga tushirish jarayonini osonlashtirish maqsadida, qo'zg'atish chulg'amidagi qarshilikni minimal o'rnatiladi ( $r_{IT} = 0$ ).

Katta quvvatli motorlarni ishga tushirishda reostat usuli qo'llanilmaydi, chunki ishga tushirish reostati juda qo'pol, gabarit o'lchovlari, og'irligi katta va quvvat isroflari ham katta bo'ladi. Bunday vaziyatda kuchlanishni ravo oshirish usuli qo'l keladi.

### 18.3. Parallel qo'zg'atishli motorlar

Parallel qo'zg'atishli motorlarning ulanish sxemasi 18.3,*a*-rasmda keltirilgan. Unda qo'zg'atish chulg'ami (QCH)dagi tok yakor chulg'ami (YACH) tokiga bog'liq emas. QCH zanjiridagi reostat  $r_{p,k}$  qo'zg'atish toki  $I_K$  va asosiy magnit oqimni o'zgartirish uchun zarur.

Motorning ekspluatatsion xususiyatlarini uning ishchi tavsiflari aniqlab beradi. Ishchi tavsiflari deb, kuchlanish  $U = const$  va qo'zg'atish toki  $I_K = const$ . o'zgarmas bo'lgandagi aylanish tezligi  $p$ , yakor toki  $I_a$ , foydali moment  $M_2$ , aylantiruvchi moment  $M$  ning valdagi quvvati  $R_2$  ga bog'liqligiga aytiladi (18.3,*b*-rasm).



18.3-rasm. Parallel qo'zg'atishli motor sxemasi (*a*) va ishchi tavsiflari (*b*)

Ifoda  $n = f(P_2)$  - uni, aksariyat tezlik tavsifi deyiladi, tahlil qilish uchun (18.5) ifodani ko'raylik. Undan ko'rinadiki, kuchlanish o'zgar- mas bo'lganda, unga ikki omil ta'sir etadi: yakor zanjiridagi kuchlanish  $I_a \sum r$  pasayuvi, hamda magnit  $F$  oqimi. YUklanish ortganda (18.5)ning surati kamayadi, bunda yakor reaksiyasi ta'sirida maxraj ham kamayadi. Aksariyat, yakor reaksiyasi ta'sirida magnit oqimning susayishi juda kichik va birinchi omil Ikkinchisiga nisbatan aylanish tezligiga kuchliroq ta'sir etadi. natijada, yuklanish  $R_2$  ortishi bilan aylanish tezligi  $p$  kamayadi, grafik  $n = f(P_2)$  absissa o'qigi qaratilgan biroz qobiqlik bilan pasayuvchi xarakterga ega bo'ladi.

Agar motorda yakor reaksiyasi ta'siri kuchli bo'lib,  $F$  oqim kamaysa, u holda yuklanish ortishi bilan aylanish tezligi ortib boradi (rasmda shtrix chiziq). Tezlik tavsifi  $n = f(P_2)$  ning bunday o'zgarishi motor turg'un ishlash shartlarini bajarmagan bo'ladi: yuklanish ortishi bilan aylanish tezligi ortadi, u esa yuklanishning qo'shimcha ortishiga olib keladi va h.k., ya'ni motor yakorining aylanish tezligi cheksiz ortib ketadi. Motor tezlik tavsifining pasayuvchi bo'lishini ta'minlash uchun, ba'zi parallel qo'zg'atishli motorlarda "engil ketma-ket" (kam o'ramli) qo'zg'atish chulg'ami qabul qilinadi. uni stabilizatsiyalovchi chulg'am deyiladi. Bu chulg'am kiritilganda, uning MYUK parallel qo'zg'atish chulg'ami MYUK bilan mos yo'nalishda bo'lishi shart.

Motor nominal yuklanishdan YU.i.rejimiga o'tishidagi yakor aylanish tezligining o'zgarishi foizda ifodalanishi, aylanish tezligining nominal o'zgarishi deyiladi:

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_{NOM}}{n_{nom}} \cdot 100\%, \quad (18.8)$$

bunda  $p_0$  – motorning YU.i.rejimidagi aylanish tezligi.

Aksariyat, parallel qo'zg'atishli motorlar uchun  $\Delta n = 2 \div 8\%$ , shu sababli parallel qo'zg'atishli o'zgarimas tok motorlarining tezlik tavsifi bikrili (jestkaya) deyiladi.

Foydali moment  $M_2$  ning yuklanishga bog'liqligi quyidagi ifoda yordamida berilgan  $M_2 = 9,55P_2 / n$ . Agar  $n = const$  bo'lsa,  $M_2 = f(P_2)$  to'g'ri chiziq shaklida bo'ladi. Biroq, yuklanish ortishi bilan aylanish tezligi biroz kamayadi, shu sababli  $M_2 = f(P_2)$  bog'lanish egri chiziqdan iborat bo'ladi.

Agar  $n = const$  bo'lsa, motorning aylantiruvchi momenti  $M = M_0 + M_2$ . Motorning ishchi tavsiflari magnit oqim o'zgarimas bo'lishi uchun qo'zg'atish toki o'zgarimas  $I_K = const$  degan shart bilan qurilgani sababli,  $M_0 = const$ . Shuning uchun  $M = f(P_2)$  grafik xam  $M_2 = f(P_2)$  ga parallel bo'ladi. Agar  $\Phi = const$  ekanligini e'tiborga olsak, u holda  $M_2 = f(P_2)$  grafik  $I = f(P_2)$  ga o'xshash bo'ladi, chunki  $M = C_M \Phi I_a$ .

Mexanik tavsif  $n = f(M)$  ning analitik ifodasini aniqlash uchun (18.5) ifodani o'zgartiramiz

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_a \sum r}{C_e \Phi}; \quad (18.9)$$

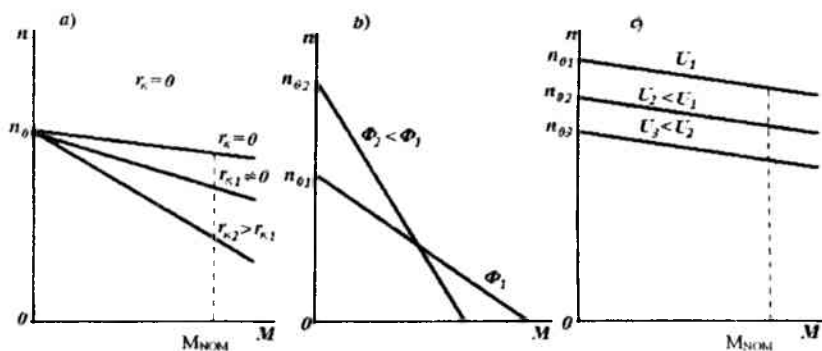
ushbu ifodaga (15.24)dan tokning qiymatini topib,

$$I_a = M / (C_M \Phi), \quad (18.10)$$

quyidagini olamiz

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{M \sum r}{C_e C_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n, \quad (18.11)$$

bunda  $n_0$  – YU.i.rejimidagi aylanish tezligi;  $\Delta n$  - motor valida yuklanish o'zgarishi sababli yakor aylanish tezligining o'zgarishi.



**18.4.-rasm.** Parallel qo'zg'atish motorining mexanik tavsiflari:

a- yakor zanjiriga qo'shimcha qarshilik ulangan; b- asosiy magnit maydon o'zgartirilganda; d-yakor zanjirida kuchlsnish o'zgartirilganda

Agar yakor reaksiyasini e'tiborga olmasak, unda ( $I_k = const.$  bo'lgani uchun)  $\Phi = const$  qabul qilish mumkin. U holda parallel qo'zg'atishli motorning mexanik tavsifi abssissa o'qiga biroz nishabli bo'lgan to'g'ri chiziqni tashkil etadi (18.4,a-rasm).

Yakor zanjiriga ulangan qarshilik qanchalar katta bo'lsa, mexanik tavsifning nishabligi ham shunchalar katta bo'ladi. Yakor zanjirida

qo‘shimcha qarshiliksiz olingan mexanik tavsif tabiiy mexanik tavsif deyiladi (1 to‘g‘ri chiziq). Yakor zanjirida qo‘shimcha qarshilik bilan olingan mexanik tavsif sun‘iy mexanik tavsif deyiladi (2 va 3 to‘g‘ri chiziqlar).

Mexanik tavsifning ko‘rinishi asosiy magnit maydon  $F$  qiymatiga ham bog‘liq. Masalan, magnit oqim  $F$  kamayganda yakorning YU.i.aylanish tezligi  $p_0$  ortadi, shu bilan birga,  $\Delta p$  ham ortadi, ya‘ni (18.11) ifodaning ikkala tashkil etuvchilari ham o‘zgaradi. Bu mexanik tavsifning nishabligini keskin orttiradi, ya‘ni uning bikirligi kamayadi (18.4,*b*-rasm).

Yakor kuchlanishi  $U$  o‘zgarganda yakor aylanish tezligi  $n_0$  o‘zgaradi,  $\Delta n$  o‘zgarasdan qoladi. Natijada, mexanik tavsifning bikirligi (agar yakor reaksiyasi ta‘sirini e‘tiborga olmasak) o‘zgarmaydi (18.4,*s*-rasm), ya‘ni tavsif bir-biriga parallel qolib, balandlikda siljiydi.

#### 18.4. Parallel qo‘zg‘atishli motor aylanish tezligini boshqarish

Motorlarning aylanish tezligini boshqarish usullar baholanganda quyidagi ko‘rsatkichlar taqqoslanadi:

- boshqarishning ravonligi;
- boshqarish diapazoni, eng katta aylanish tezligining eng kichik tezlikka nisbati;
- boshqarishning samaraliligi, boshqarish apparatlarining narxi va ulardagi elektr energiya isroflari.

Ifoda (18.5) dan shuni bilish mumkinki, parallel qo‘zg‘atishli motorning yakori aylanishi tezligini boshqarishga yakor zanjiridagi qarshilikni o‘zgartirib, asosiy magnit oqimni o‘zgartirib va yakor zanjiri kuchlanishini o‘zgartirib erishish mumkin ekan.

**Yakor zanjiriga qo‘shimcha qarshilik kiritish.** Qo‘shimcha qarshilik ( $r_{qo'sh}$  reostat) yakor zanjiriga ishga tushirish reostati (ITR) kabi ulanadi. Bunda faqat shu farq bo‘ladiki, reostat o‘zidan uzoq muddat tok oqishiga hisoblangan bo‘lishi zarur.

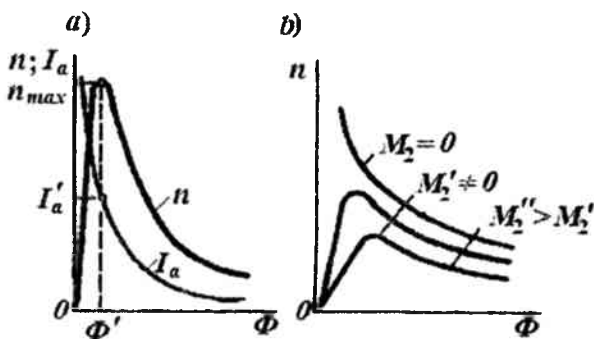
Yakor zanjiriga reostat  $r_{qo'sh}$  ulanganda (18.5) ifoda quyidagicha o‘zgaradi

$$n = \frac{U - I_a \sum (r + r_{qo'sh})}{C_e \Phi} = n_0 - \Delta n, \quad (18.12)$$

bunda  $n = \frac{U}{C_e \Phi}$  - YU.i.rejimidagi aylanish tezligi;

$\Delta n = \frac{I_a (\sum r + r_{qo'sh})}{C_e \Phi}$  - yakor zanjiridagi kuchlanishlar pasayuvi natijasida aylanish tezligi o'zgarishi.

Qo'shimcha qarshilik  $r_{qo'sh}$  ortishi bilan  $\Delta n$  ortadi va aylanish tezligini kamaytiradi. Bog'lanish  $n = f(r_{qo'sh})$  parallel qo'zg'atishli motor mexanik tavsifini ham tasvirlaydi (18.4,a-rasm): yakor zanjiridagi qarshilik  $r_{qo'sh}$  ortishi bilan mexanik tavsifning nishabligi ortadi, aylanish tezligi esa, valdagi berilgan (o'zgarimas) yuklanishda ( $M = M_{NOM}$ ), kamayadi. Ushbu boshqarish usuli aylanish tezligini katta diapazonda ravon boshqarish (faqat aylanish tezligini nominal qaymatidan pastga) imkonini beradi. Biroq u boshqaruvchi reostatda katta quvvat isroflari ( $I_a^2 r$ ) bo'lishi bilan samarali emas. Motorning quvvati oo'gan sari, isroflar  $I_a^2 r$  muttasil ortib boradi.



18.5-rasm. Parallel qo'zg'atishli motor boshqarish tavsifi

**Asosiy magnit oqimni o'zgartirish.** Parallel qo'zg'atishli motorni ushbu usulda boshqarish, qo'zg'atish chulg'amidagi qo'shimcha reostat  $R_{o.o}$  qarshiligini o'zgartirib amalga oshiriladi. Masalan, reostat qarshiligi kamayganda qo'zg'atish magnit oqimi

ortadi va aylanish tezligi kamayadi (18.5). Qarshilik  $R_{\Omega Q}$  qiymati ortganda magnit oqim kamayadi, aylanish tezligi ortadi. Aylanish tezligining qo'zg'atish tokiga bo'lgan bog'liqligi  $U = const$  va  $I_a = const$  bo'lganda motorning boshqarish tavsifi  $n = f(I_K)$  bilan ifodalanadi.

Ifoda (18.5) dan ma'lumki, magnit oqimi  $F$  kamayishi bilan aylanish tezligi  $p$  giperbolik qonuniyat bilan ortadi (18.5, *a*-rasm). Shu bilan birga,  $F$  ning kamayishi yakor tokining  $I_a = M / (C_M \Phi)$  ortishiga olib keladi. Agar magnit oqim  $\Phi = \Phi'$  bo'lganda yakor toki  $I'_a = U / (2 \sum r)$ , ya'ni yakor zanjiridagi kuchlanish pasayuvi, yakorga keltirilgan kuchlanishning ( $I'_a \sum r = U / 2$ ) yarmiga teng bo'ladi. Bunday vaziyatda aylanish tezligi maksimal  $n_{max}$  qiymatiga erishadi. Magnit oqimning kamayishi davom etaversa ( $\Phi < \Phi'$ ), yakor aylanish tezligi kamayib boshlaydi, chunki tok  $I_a$  ning keskin ortishi natijasida (18.9) ifodaning ikkinchi tashkil etuvchisi birinчисiga nisbatan tezroq ortadi.

Motor valida kichik yuklanish momenti bo'lgan-da yakorning maksimal aylanish tezligi  $n_{max}$  nominal tezlik  $n_{NOM}$  dan birnecha marta katta bo'ladi va motorning mexanik chidamliligi nuqtai nazardan bunga yo'l qo'yib bo'lmaydi, ya'ni motor yakori sochilib ketishi mumkin. Bu vaziyatni e'tibor olib, reostat qarshiligi  $R_{\Omega Q}$  shunday tanlanishi kerakki, uni to'liq kiritilganda aylanish tezligi joiz miqdoridan katta bo'lmasin.

Masalan, 2P turdagi motorlarda joiz aylanish tezligi nominal aylanish tezligidan 2-3 martadan ortmasligi zarur. Yana bir xavf shundaki, e'tiborni qo'zg'atish zanjiri kontaktlari ishonchligiga qaratish zarur, aks holda, bu kontaktlarning behosdan uzilishi natijasida, qo'zg'atish chulg'ami toki nolga teng bo'lib, magnit zanjirda magnit oqim qoldiq magnetizm oqimigacha kamayadi, unda aylanish tezligi xavfli miqdorgacha etishi mumkin.

Boshqarish tavsifining shakli  $n = f(\Phi)$  motorning validagi yuklanish momenti  $M_2$  qiymatiga bog'liq:  $M_2$  ortishi bilan maksimal aylanish tezligi  $n_{max}$  kamayadi (18.5, *b*-rasm).

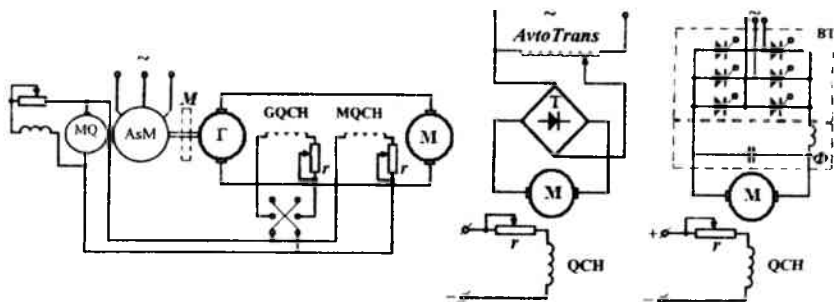
Ushbu motorni boshqarish usulining kamchiligi shundaki, magnit oqim  $F$  o'zgarishi bilan mexanik tavsifning nishabligi o'zgaradi.

Ko‘rilgan boshqarish usuli sodda va iqtisodiy samaralidir, chunki parallel qo‘zg‘atishli motorlarda qo‘zg‘atish toki yakor tokining 1-7 foizini tashkil etadi, ya‘ni  $I_K = (0,01 \div 0,07)I_a$ , shuning uchun boshqaruvchi reostatdagi quvvat isrofi ( $I_K^2 r_{qo'sh}$ ) juda kichik.

**Yakor zanjirida kuchlanishni o‘zgartirish.** Yakor aylanish tezligini yakor kuchlanishi yordamida boshqarish uchun qo‘zg‘atish chulg‘ami magnit oqimi yoki toki o‘zgarmas ( $\Phi = const$  yoki  $I_K = const$ ), ya‘ni mustaqil qo‘zg‘atish – yakor chulg‘ami bilan qo‘zg‘atish chulg‘ami alohida manbalardan ta‘minishi zarur.

YU.i. rejimida aylanish tezligi  $p_0$  kuchlanishga proporsional, ammo  $\Delta n$  kuchlanishga bog‘liq emas [(18.11) ga qarang], shuning uchun kuchlanish o‘zgarganda mexanik tavsif absissa o‘qiga nisbatan nishablik burchagini o‘zgartirmaydi, faqat bir-biriga nisbatan balandligini o‘zgartiradi (18.4, s-rasm). Ushbu usulni amalda qo‘llash uchun yakor zanjirini kuchlanishi boshqariladigan o‘zgarmas tok manbaiga ulash zarur.

Kichik va o‘rta quvvatli motorlarni boshqarish uchun bunday manba sifatida yarim o‘tkazgichli boshqariluvchi to‘g‘rilagich (BT) qo‘llash mumkin. BTlar texnika rivojlanishining namoyishi sifatida birnecha o‘n yillar mobaynida o‘zgarmas tokli elektromexanik o‘zgartkichlar, avtotransformatorli to‘g‘rilagichlar va to‘liq boshqariluvchi tiristorli (tranzistorli) to‘g‘rilagichlarning yaratilish yo‘llarini keltirish mumkin (18.6-rasm).



**18.6-rasm.** Parallel qo‘zg‘atishli motor kuchlanishni o‘zgartirib tezligini boshqarish

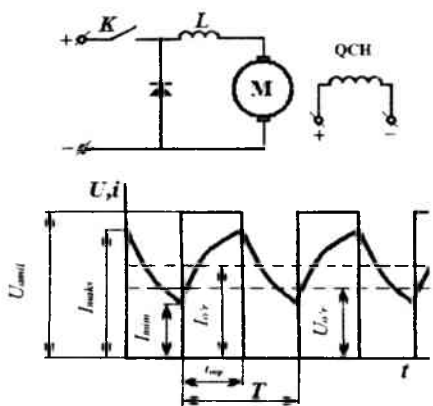


Katta quvvatli motor (M) larni boshqarishda mustaqil qo'zg'atkichli o'zgarmas tok generatorlari ishlatib kelinmoqda; generatorni (G) aylantiruvchi yuritma – birlamchi motor sifatida asinxron motor (AsM) qo'llaniladi. G va M ning qo'zg'atish chulg'amlarini o'zgarmas kuchlanish bilan ta'minlash uchun mustaqil qo'zg'atkichlar (MQ) – o'zgarmas tok generatorlari ishlatiladi. Uning kuchlanishi o'zgarmas holatda bo'ladi. O'zgarmas tok motorini boshqarishning bunday sxemasi (18.6-rasm) "generator-motor" tizimi (G-D sistema) nomi bilan mashhur.

G-M tizimida ishlayotgan motor yakorining aylanish yo'nalishini o'zgartirish uchun G generatorning qo'zg'atish chulg'ami zanjirdagi qayta ulagich (QU) holatini o'zgartirib, qo'zg'atish toki yo'nalishi o'zgaradi, buning natijasida generator va motor yakorlari zanjiridagi tok yo'nalishi o'zgaradi. Agar motor validagi yuklama keskin o'zgaruvchan bo'lsa, asinxron motorning tarmoqdan olayotgan quvvatining tebranishini kamaytirish maqsadida valga maxovik M o'rnatilgan.

Yakor kuchlanishini o'zgartirib aylanish tezligini boshqarish usuli keng diapazonda ( $n_{max}/n_{min} \geq 25$ ) ravon va samarali boshqarish imkoniyatini beradi. Eng katta aylanish tezligi kommutatsiya shartlari bilan, eng kichik tezlik – motorni sovutish sharoitlari bilan cheklanadi.

Ushbu usulning yana bir afzalligi shundaki, uning yordamida motorni reostatsiz ishga tushirish imkonini beradi.



18.7-rasm. O'zgarmas tok motori tezligini impulsli boshqarish

**Aylanish tezligini impulsli boshqarish.** Ushbu usulning mohiyati 18.7,*a*-rasmدا keltirilgan sxemada tasvirlangan. Parallel (mustaqil) chulg'amli motorning yakor zanjiri *K* kalit yordamida davriy ravishda uzib-yoqiladi. Yakor zanjiriga *t* vaqt davomida  $U = U_{imp}$  kuchlanish keltirilsa unda oqayotgan tok maksimal  $I_{max}$  qiymatiga erishadi. So'ngra kalit *K* tokni uzadi va tok kamayib, keyingi kalit ulanish onida  $I_{min}$  qiymatig erishadi (kalit uzilganda motor yakor chulg'amidagi tok diod *D* orqali tutashadi). Kalitning keyingi ulanishida tok  $I_{max}$  qiymatiga erishadi va h.k. Shunday qilib, yakor chulg'amiga kuchlanishning o'rtacha qiymati uzatiladi

$$U_{o'p} = \frac{U \cdot t}{T} = \alpha U \quad (18.13)$$

bunda *T* – impuls davri;  $\alpha = t \cdot T$  – boshqarish koeffitsiyenti.

Yakor chulg'amida o'rtacha tok oqadi, uning qiymati quyidagi ifoda bilan tasvirlanadi  $I_{yp} = 0,5(I_{max} + I_{min})$ . Impulsli boshqarishda aylanish tezligi quyidachiga aniqlanadi

$$n = \frac{\alpha \cdot U - I_{o'r} \sum r}{C_e \Phi} \quad (18.14)$$

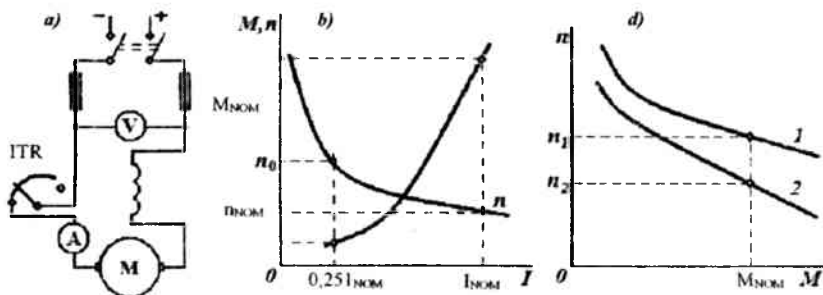
Shunday qilib, aylanish tezligini impulsli boshqarish, yakor zanjiriga keltirilgan kuchlanishni o'zgartirib boshqarishga o'xshashdir. Yakorda tokning rulslanishini kamaytirish maqsadida yakorga ketma-ket drossel *L* ulangan, impulslar chastotasi 200-400 Gs.

Amaliyotda kalit *K* o'rnida tranzistor yoki tiristor ishlatish mumkin. Kuchlanishning o'rtacha qiymati  $U_{yp}$  ni o'zgartirish uchun tranzistor yoki tiristorning ochib-yopish chastotasi va boshqarish koeffitsiyenti  $\alpha$  o'zgartiriladi.

### 18.5. Ketma-ket qo'zg'atishli o'zgarmas tok motori

Bu motorda qo'zg'atish chulg'ami yakor chulg'amiga ketma-ket ulangan (18.8-rasm), shuning uchun undagi magnit maydon qiymati yuklanish tokiga bog'liq  $I = I_a = I_K$ . Kichik yuklanishlarda

mashining magnit tizimi to‘yinmagan va magnit oqimining yuklanish tokiga bog‘lanishi to‘g‘ri proporsional, ya‘ni  $\Phi = k_{\phi} I_a$ . Bunday holat uchun elektromagnit momentni (18.24)dan topamiz



**18.8-rasm.** O‘zgarmas tok ketma-ket qo‘zg‘atishli motor: a-prinsipial sxemasi; b-ishchi tavsifi; d-mexanik tavsifi; 1-tabiiy tavsifi; 2-sun‘iy tavsifi

$$M = C_M k_{\phi} \cdot I_a \cdot I_a = C_M I_a^2.$$

Aylanish tezligi (18.5) quyidagi shaklga keladi

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{C_e k_{\phi} I_a}. \quad (18.15)$$

bunda  $k_{\phi}$  – proporsionallik koeffitsiyenti.

Shunday qilib, magnit tizimi to‘yinmagan bo‘lganda aylantiruvchi moment tokning kvadratiga proporsional, aylanish tezligi esa yuklanish tokiga teskari proporsional ekan.

18.8,b-rasmda ketma-ket qo‘zg‘atishli motorning ishchi tavsiflari  $M = f(I)$  va  $n = f(I)$  keltirilgan. Yuklanish toki  $I_K = I_a = I_{yLK}$  ortishi bilan magnit tizimning to‘yimishi boshlanadi. Bunday vaziyatda yuklanish ortishi bilan magnit oqimi deyarli o‘zgarmay qoladi va motorning tavsifi to‘g‘ri chiziqqa yaqinlashadi.

Motorning tezlik tavsifi ko'rsatadiki, yuklanish o'zgarishi bilan aylanish tezligi keskin o'zgaradi. Bunday tavsifni "yumshoq" tavsif deyiladi.

Ketma-ket qo'zg'atishli motorning yuklanishi kamayganda yakor aylanish tezligi keskin ortadi va valdagi yuklanish nominal yuklanishning 25% dan kichik bo'lganda motor uchun xavfli tezlikka erishish mumkin. Shu sababli, ketma-ket qo'zg'atishli motorning yuklanishi 25% dan kam bo'lganda uni ishlatish yoki ishga tushirish taqiqlanadi.

Motor ishonchli ishlashini ta'minlash maqsadida uning vali ishchi mexanizmga mufta yoki tishli ulatma bilan mahkamlangan bo'lishi shart. Tasmali uzatma qo'llanilishi taqiqlanadi, chunki tasma uzilishi yoki shkivdan chivib ketishida motor o'ta tezlanishga o'tadi.

Ketma-ket qo'zg'atishli motorning mexanik tavsiflari  $n = f(M)$  18.8, s-rasmda keltirilgan. Tavsiflar (1-tabiiy va 2-sun'iy) ning keskin kamayuvchi egri chiziqlari ixtiyoriy yuklanishlar bo'lganda motorga turg'un ishlashni ta'minlaydilar. Bu motorlarning yuklanish toki kvadratiga proporsional bo'lgan aylantiruvchi momentga erishish xususiyati ishga tushirish og'ir bo'lgan sharoitda va o'ta yuklanishlarda muhim ahamiyatga ega. Ketma-ket qo'zg'atishli motorning bunday xususiyati uning transportda tortuvchi motor, ko'taruvchi uskunalarning kran yuritmalari sifatida, ya'ni ishga tushirish sharoitlari og'ir bo'lgan, shu bilan birga, kichik aylanish tezligida katta yuklanishi bo'lgan barcha elektr yuritmalarida keng qo'llanilishiga sabab bo'ldi.

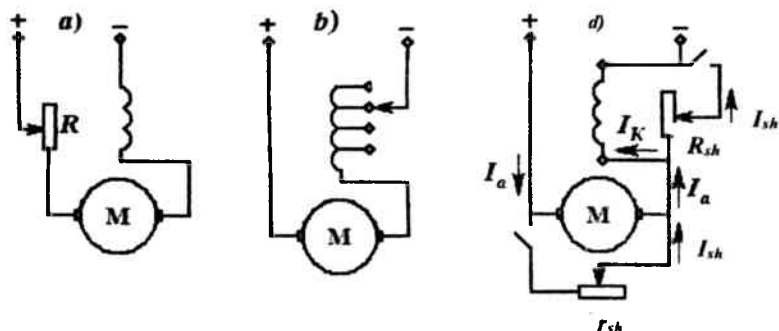
Ketma-ket qo'zg'atishli motori nominal aylanish tezligi o'zgarishi quyidagicha bo'ladi

$$\Delta n = \frac{n_{[0,25]} - n_{NOM}}{n_{NOM}} 100\%, \quad (18.16)$$

bunda [0,25] – nominal yuklanishning 25% ga yuklangandagi aylanish tezligi.

Ketma-ket qo'zg'atishli motor aylanish tezligini yoki kuchlanish yoki qo'zg'atish chulg'ami magnit oqimini o'zgartirib boshqarish

mumkin. birinchi usulda yakor zanjiriga ketma-ket reostat ulanadi (18.9,*a*-rasm).



18.9-rasm. Ketma-ket qo'zg'atishli motor tezligini boshqarish

Bu reostatning qarshiligi ortishi bilan motor kirish qismida yakor kuchlanishi va aylanish tezligi kamayadi. Reostatdan yuklanishning to'la toki oqib o'tgani uchun, reostat hajmi katta va qimmat bo'ladi, shu sababli undan foydalanish katta quvvatli motorlarda samarasiz bo'ladi.

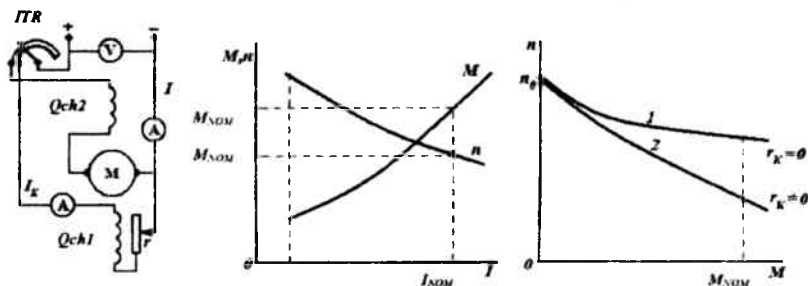
Motor magnet oqimini o'zgartirib boshqarish uch usulda bajarilishi mumkin: yakor chulg'amini  $r_{sh}$  reostat bilan shuntlash, qo'zg'atish chulg'amini seksiyalarga bo'lish va yakor chulg'amini  $R_h$  reostat bilan shuntlash. Qo'zg'atish chulg'amiga  $r_{sh}$  reostati parallel ulanganda – shuntlanganda (18.9,*b*-rasm) hamda uning qarshiligi kamaytirilganda, qo'zg'atish tokining kamayishini  $I_K = I_a - I_{sh}$  kuzatamiz, natijada yakor aylanish tezligi ortadi. Bu usul avvalgi usuldan samaraliroqdir (18.10,*a*-rasm), keng qo'llaniladi va boshqarish koeffitsiyenti  $k_B = (I_{sh} / I_a) \cdot 100\%$  bilan baholanadi. Aksariyat,  $r_{sh}$  reostat qarshiligi shunday qabul qilinadiki, bunda  $k_B \geq 50\%$  bo'lsin.

Qo'zg'atish chulg'ami seksiyalanishida (18.9,*s*-rasm) qo'zg'atish chulg'amining bir qismi uzilishi natijasida aylanish tezligimning ortishi kuzatiladi. Yakor chulg'ami  $R_h$  reostat bilan shuntlashida (18.9,*b*-rasm) qo'zg'atish chulg'amining toki  $I_K = I_a + I_{sh}$  ortadi va aylanish

tezligining kamayishiga sabab bo'ladi. Bu tezlikni boshqarish usuli, motorni "chuqur" (katta diapazonda) boshqarish imkoniyatini bersa ham, kam samarali va kam qo'llaniladi.

## 18.6. Aralash qo'zg'atishli o'zgarmas tok motori

Aralash qo'zg'atishli o'zgarmas tok motorida ikki qo'zg'atish chulg'ami mavjud: parallel va ketma-ket chulg'amlar (18.10, a-rasm). Bu motor yakori aylanish tezligi



18.10-rasm. Aralash qo'zg'atishli motor sxemasi (a), ishchi (b) va mexanik (d) tavsiflari

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{C_e (\Phi_1 \pm \Phi_2)}, \quad (18.17)$$

bunda  $\Phi_1$  va  $\Phi_2$  – mos ravishda, parallel va ketma-ket qo'zg'atish chulg'amlarining magnit oqimlari.

Ifoda (18.17) dagi plus ishorasi qo'zg'atish chulg'amlarining mos ulanishiga (chulg'amlar MYUK lari qo'shiladi) to'g'ri keladi. Bunda yuklanish ortishi bilan umumiy magnit oqim (ketma-ket qo'zg'atish chulg'ami hisobiga) ortadi, natijada yakor aylanish tezligi kamayadi. Chulg'amlar qarama-qarshi ulanganda yuklanish ortishi bilan  $\Phi_2$  magnit oqim (minus ishorali) natijaviy magnit oqimini kamaytiradi (magnitsizlantiradi) va aylanish tezligini oshiradi. Bunda motorning ishiash rejimi noturg'un bo'ladi, chunki yuklanish ortishi bilan aylanish tezligi cheksiz ortadi. Biroq, ketma-ket qo'zg'atish chulg'ami o'ramlari somi kichik bo'lganda, yuklanish ortishi bilan

aylanish tezligi oshmaydi va yuklanishning butun diapazonida o'zgarmasdan qoladi.

18.10.b-rasmda aralash qo'zg'atishli motoming qo'zg'atish chulhamlari mos ulangandagi ishchi tavsiflari keltirilgan, 18.10,s-rasmda esa mexanik tavsiflari tasvirlangan. Ketma-ket qo'zg'atishli motor ishchi tavsiflaridan farqli ravishda, aralash qo'zg'atishli motor tavsiflari yassi joylashgan.

Shuni ta'kidlash o'rinliki, aralash qo'zg'atishli motorlarning ishchi tavsiflari shakliga ko'ra, qaysi chulg'am (parallel yoki ketma-ket qo'zg'atish chulg'amlari) MYUKlari qo'proq bo'lishiga qarab, parallel va ketma-ket qo'zg'atishli motorlar mos ishchi tavsiflarining orasida joylashadi.

Aralash qo'zg'atishli motor yakori aylanish tezligini parallel qo'zg'atish chulg'ami zanjiridagi reostat bilan boshqarish mumkin.

## GLOSARIY

**Almashtirish sxemasi** – elektr jihatdan berilgan mashina sxemasining o‘rnini bosa oladigan ekvivalent elektr sxema;

**Bir qatlamli chulg‘am** – magnit o‘zak bir pazida sektsiyaning faqat bir tomonida joylashadigan chulg‘am;

**Ekvivalent sxema** – haqiqiy elektr sxema o‘rniga boshqa olingan, soddalashtirish natijasida ideallashtirilgan sxema;

**Elektr texnik po‘lat plastinalar** – elektr mashinasi magnit o‘zagini hosil qiluvchi maxsus tarkibda tayyorlangan, jo‘valangan (prokat) po‘lat tunikachalari;

**Foydali ish koeffitsiyenti** – transformator ikkilamchi chulg‘amidagi aktiv quvvatni birlamchi chulg‘amdagi aktiv quvvatga nisbati;

**Gidrogenerator** – gidroelektr stansiyasida suv turbinasi vositasida olingan mexanik energiyani elektr energiyasiga o‘zgartiruvchi elektr mashinasi;

**Ikki qatlamli chulg‘am** – magnit o‘zak bir pazida bir sektsiyaning yuqori qatlami, boshqa sektsiyaning pastki qatlamida ustma-ust joylashadigan chulg‘am;

**Keltirilgan transformator** – ikkilamchi chulg‘am parametrlarini birlamchi chulg‘am o‘ramlar soniga keltirish;

**Kuvvat koeffitsiyenti** – aktiv quvvatni to‘la quvvatga nisbati;

**Oksid plyonkalar** – elektrotexnik po‘lat plastinkani qizdirilib so‘ngra sovitilishi natijasida plastinka yuzasida hosil bo‘ladigan elektr izolyatsion qatlam;

**O‘ta yuklanish qobiliyati** – asinxron mashinalarida maksimal elektr magnit momentning nominal elektr momentga nisbati;

**Radiator** – transformatorning sovitish yuzasini oshiruvchi uskuna;

**Rotor** – o‘zguvchan tok mashinasining aylanuvchi qismi;

**Sektsiya** – bir xil pazlarda joylashgan o‘ramlardan ketma ket ulanib hosil bo‘lgan chulg‘amning bir qismi;

**Sektsiya guruhi** – qo‘shni pazlarda joylashgan sektsiyalar guruhining ketma ket ulanib hosil qilgan chulg‘amining bir qismi;

**Sinxron mashina** – rotor qo‘zg‘atish chulg‘amining o‘zgarmas tok vositasida hosil qilgan aylanuvchi magnit maydoni chastotasi statori chulg‘amidagi o‘zgaruvchan tok hosil qilgan aylanuvchan



magnit maydon chastotasiga teng bo'lgan o'zgaruvchan tok mashinasi;

**Sirpanish** – stator va rotorning aylanuvchi magnit maydonlari aylanish chastotalari ayirmasining sinxron chastotaga nisbati;

**Stator** – o'zguvchan tok mashinasining qo'zg'almas qismi;

**Tashqi tavsif** – ikkilamchi chulg'amdagi kuchlanishning shu chulg'amdagi yuklanish tokiga bog'liqligi;

**Turli xil laklar** – po'lat plastinkalar orasigi elektr izolyatsiyasini qoplash uchun xizmat qiluvchi laklar;

**Termosifon filtr** – transformatoridagi sovutuvchi moy tarkibini tozalaydigan filtr;

**Transformatsiyalash koefitsiyenti** – hirlamchi chulg'am elektr yuriguvchi kuchini ikkilamchi chulg'am elektr yurituvchi kuchiga nisbati;

**Turbogenerator** – issiqlik elektr stansiyasida bug' turbina vositasida olingan mexanik energiyani elektr energiyasiga o'zgartiruvchi elektr mashinasi;

**Qisqa tutashuv** – transformator birlamchi chulg'ami manbaga ulanib, ikkilamchi chulg'am qisqa tutashgan holati;

**Qisqa tutashish kuchlanishi** – qisqa tutashuv tajribasida chulg'am tokining qiymati nominal tokka teng bo'lgungacha pasaytirilgan chulg'am kuchlanishi;

**Yarmo balkasi** – magnit o'tkazgichi mahkamlanadigan balka;

**Yuklanish rejimi** – transformatorning birlamchi chulg'ami manbaga ulanib ikkilamchi chulg'amni iste'molchiga ulangan holati;

**Yakor reaksiyasi** – stator magnit maydonining asosiy magnit maydonga ta'siri.

## FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для бакалавр. – Москва.: Юрайт, 2012. – 675 с.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. Учебник для вузов.– М.: Изд-во МЭИ, 2004. Том. 1 – 652 с, Том 2 – 532 с.
3. Кацман М.М. Электрические машины. –М.:– Изд. центр «Академия». 2012. 354 с.
4. Токарев Б.Ф. Электрические машины. –М.: Изд-во Энергия, 1990. –624 с.
5. Salimov D.S. Pirmatov N.B., Elektr mashinalari. O'quv qo'llanma. -T.: ToshDTU, 2005. –295 b.
6. Pirmatov N.B., Yarmuxamedova Z.A., Mustafakulova G.N. Elektr mashinalari faming transformatorlar qismi boyicha kurs loyihasini bajarishga oid o'quv-metodik qo'llanma. -T.: ToshDTU, 2012. –120 b.
7. Salimov J.S., Pirmatov N.B. Elektr mashinalari. -T.: O'zbekiston faylasuflari milliy jamiyati nashriyoti, 2011. – 408 b.
8. Analysis of Electric machinery and drive systems. Second edition. Paul C. Krause, Oleg Wasyncuk, Scott. D. Sudhoff. IEEE Press series on Power Engineering. 2002. IEEE.

# MUNDARIJA

So'zboshi .....	3
Kirish .....	4
K.1 Elektromexanik energiya o'zgartirish .....	4
K.2 Elektr mashinalari ishlash prinsipi asosida yotuvchi tabiat qonunlari, qoidalari va hodisalari.....	6
K.3 Elektr mashinalari klassifikatsiyasi .....	11

## I QISM. TRANSFORMATORLAR

### 1-bob. TRANSFORMATORLAR HAQIDA UMUMIY TUSHUNCHALAR

1.1 Transformatorning hayotdagi o'rni va qo'llanish sohalari .....	14
1.2 Transformatorning ishlash prinsipi .....	15
1.3 Transformatorning tuzilishi .....	17
1.4 Transformatorning kuchlanish tenglamalari .....	27
1.5 Magnit yurituvchi kuch va tok tenglamalari .....	31
1.6 Ikkilamchi chulg'am parametrlarini keltirish va transformator almashtirish sxemasi .....	37
1.7 Transformatorning vektor diagrammasi .....	40
1.8 Uch fazali transformator va uch fazali chulg'amlarni ulash sxemalari .....	43
1.9 Transformator magnit o'zagini magnitlanishidagi hodisalar .....	47
1.10 Uch fazali transformator yuksiz ishlashiga chulg'amlar ulanishining ta'siri .....	48
1.11 Transformator almashtirish sxemasining parametrlarini tajriba usulida aniqlash .....	53
1.12 Transformator soddalashtirilgan vektor diagrammasi .....	65
1.13 Transformatorning tashqi tavsifi .....	67
1.14 Transformator quvvat isroflari va FIK .....	70
1.15 Transformator kuchlanishini rostdash .....	76
Nazorat savollari.....	

### 2-bob. TRANSFORMATORLAR CHULG'AMLARI ULANISH GURUHLARI VA ULARNING PARALLEL ISHLASHI

2.1 Transformatorning ulanish guruhlari .....	79
2.2 Transformatorlarni parallel ishlashi .....	84
Nazorat savollari.....	90

### 3-bob. UCH CHULG'AMLI TRANSFORMATORLAR VA AVTOTRANSFORMATORLAR

3.1 Uch chulg'amli transformatorlar .....	91
3.2 Avtotransformatorlar .....	93

Nazorat savollari.....	97
<b>II QISM. O'ZGARUVCHAN TOK MASHINALARI UMUMIY MASALALARI</b>	
<b>4-bob. ASOSIY QISM VA STATOR CHULG'AMLARI</b>	
4.1 O'zgaruvchan tok mashinalarining asosiy turlari va aktiv qismlari .....	98
4.2 O'zgaruvchan tok mashinasi stator chulg'ami sxemalari .....	101
4.3 Stator chulg'amini hisoblash .....	104
4.4 Stator chulg'ami EYUKlari .....	109
4.5 G'altak o'ramining EYUK .....	111
4.6 G'altaklar guruhining EYUK .....	112
4.7 Chulg'am fazasining EYUK .....	113
<b>5-bob. O'ZGARUVCHAN TOK MASHINASI CHULG'AMLARINING MAGNIT YURITUVCHI KUCHLARI VA MAGNIT MAYDONLARI</b>	
5.1 Chulg'am magnit yurituvchi kuchlari .....	115
5.2 Mujassamlangan chulg'am MYUK .....	116
5.3 Taqsimlangan chulg'amning MYUK .....	117
5.4 Qadami qisqartirilgan chulg'amning MYUK .....	118
5.5 Pulslanuvchi, elliptik va aylanuvchi magnit maydon .....	119
5.6 Uch fazali chulg'amning aylanuvchi magnit maydoni .....	120
5.7 Ikki fazali chulg'amning aylanuvchi magnit maydoni .....	121
5.8 Elliptik maydon .....	123
<b>III QISM. ASINXRON MASHINALAR</b>	
<b>6-bob. ASINXRON MASHINA TUZILISHI, ISHLASH PRINSIPI VA ISH REJIMLARI</b>	
6.1 Asinxron mashinaning tuzilishi .....	124
6.2 Ishlash prinsipi .....	126
6.3 Asinxron mashinaning ishlash rejimlari .....	127
6.4 Rotor chulg'ami parametrlarini stator chulg'ami o'ramlari soniga keltirish .....	129
6.5 Asinxron mashinaning vektor diagrammalari .....	135
6.6 Almashtirish sxemasi .....	137
<b>7-bob. ASINXRON MASHINA ENERGETIK JARAYONI, ELEKTROMAGNIT MOMENTI VA MEXANIK TAVSIFI</b>	
7.1 Asinxron mashinani energetik diagrammasi .....	140
7.2 Elektromagnit moment .....	142
7.3 Mexanik tavsif .....	144
7.4 Asinxron motorli yuritmaning statik turg'un ishlashi .....	151

## **8-bob. ASINXRON MOTOR AYLANA DIAGRAMMASI VA ISHCHI TAVSIFLARI**

8.1	Asinxron mashina aylana diagrammasini qurish usullari. Yu.i. va q.t. tajribalari .....	155
8.2	Aylana diagrammasini tajriba natijalari bo'yicha qurish .....	163
8.3	Asinxron motor ishchi tavsiflari. Ularni aylana diagrammasi yordamida qurish .....	165

## **9-bob. ASINXRON MOTORNI ISHGA TUSHIRISH VA AYLANISH TEZLIGINI ROSTLASH**

9.1	Faza rotorli asinxron motorni ishga tushirish .....	171
9.2	Qisqa tutashgan rotorli asinxron motorni ishga tushirish .....	176
9.3	Qisqa tutashgan rotorli asinxron motor aylanish tezligini boshqarish .....	180
9.4	Faza rotorli asinxron motor aylanish tezligini boshqarish .....	185

## **IV QISM. SINXRON MASHINALAR**

### **10-bob. QO'ZG'ATISH MAGNIT OQIMINI HOSIL QILISH VA SINXRON MASHINALARNI TUZILISHI**

10.1	Qo'zg'atish magnit oqimini hosil qilish .....	188
10.2	Sinxron mashinalar turlari va tuzilishi .....	191
10.3	Yirik sinxron mashinalarni sovetish .....	196
	Nazorat savollari.....	198

### **11-bob. SINXRON GENERATOR MAGNIT MAYDONI VA TAVSIFLARI**

11.1	Sinxron mashinani magnit zanjiri .....	199
11.2	Sinxron mashinani magnit maydoni .....	201
11.3	Sinxron mashinani yakor reaksiyasi .....	205
11.4	Sinxron generator kuchlanishlar tenglamalari .....	212
11.5	Sinxron generator vektor diagrammalari .....	215
11.6	Sinxron generator tavsiflari .....	216
11.7	Sinxron generator EYUKning amaliy diagrammasi .....	222
11.8	Sinxron mashinalar quvvat isroflari .....	225
	Nazorat savollari.....	228

### **12-bob. SINXRON GENERATORLARNI PALALLEL ISHLASHI**

12.1	Generatorlarni parallel ishga tushirish .....	229
12.2	Parallel ishlashga ulangan generatorlarni yuklanishi .....	232
12.3	Sinxron generator burchak tavsiflari .....	236
12.4	Sinxron generatorning V-simon tavsiflari .....	242
	Nazorat savollari.....	245

### **13-bob. SINXRON MOTOR VA SINXRON KOMPENSATOR**

13.1	Sinxron motor ishlash prinsipi .....	246
------	--------------------------------------	-----

13.2	Sinxron motorlarni ishga tushirish .....	250
13.3	Sinxron motor tavsiflari .....	254
13.4	Sinxron kompensator .....	258
	Nazorat savollari.....	263
<b>V QISM. O'ZGARMAS TOK ELEKTR MASHINALARI</b>		
<b>14-bob. O'ZGARMAS TOK ELEKTR MASHINALARI</b>		
<b>ISHLASH PRINSIPI VA TUZILISHI</b>		
14.1	O'zgarmas tok generatori va motorini ishlash prinsipi .....	265
14.2	O'zgarmas tok mashinasining tuzilishi .....	268
	Nazorat savollari.....	273
<b>15-bob. O'ZGARMAS TOK MASHINASI YAKOR</b>		
<b>CHULG'AMLARI</b>		
15.1	Sirtmoqsimon yakor chulg'amlari .....	275
15.2	Yakorning to'lqinsimon chulg'amlari .....	282
15.3	O'zgarmas tok mashinasi elektr yurituvchi kuchi va elektro- magnit momenti .....	285
	Nazorat savollari.....	289
<b>16-bob. O'ZGARMAS TOK MASHINALARI MAGNIT</b>		
<b>MAYDONI</b>		
16.1	O'zgarmas tok mashinalari magnit zanjiri .....	290
16.2	O'zgarmas tok mashinasida yakor reaksiyasi .....	292
16.3	O'zgarmas tok mashinalari chulg'amlarini ulash turlari .....	295
	Nazorat savollari.....	296
<b>17-bob. O'ZGARMAS TOK GENERATORLARI</b>		
17.1	Asosiy tushunchalar .....	297
17.2	Mustaqil qo'zg'atishli generator .....	300
17.3	Parallel qo'zg'atishli generator .....	304
17.4	Aralash qo'zg'atishli generator .....	306
	Nazorat savollari.....	307
<b>18-bob. O'ZGARMAS TOK MOTORLARI</b>		
18.1	Asosiy tushunchalar .....	308
18.2	Motorni ishga tushirish .....	311
18.3	Parallel qo'zg'atishli motorlar .....	313
18.4	Parallel qo'zg'atishli motor tezligini boshqarish .....	316
18.5	Ketna-ket qo'zg'atishli o'zgarmas tok motori .....	321
18.6	Aralash qo'zg'atishli o'zgarmas tok motori .....	325
	Glossariy .....	327
	Foydalanilgan adabiyotlar .....	329

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	3
Введение .....	4
К.1 Электромеханические преобразователи энергии .....	4
К.2 Законы, правила и явления природы, которые лежат на основе принципа действия электрических машины .....	6
К.3 Классификация электрических машин .....	11
<b>ЧАСТЬ 1. ТРАНСФОРМАТОРЫ</b>	
<b>Глава 1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ТРАНСФОРМАТОРАХ</b>	
1.1 Место трансформатора в жизни и области применения .....	14
1.2 Принцип действия трансформатора .....	15
1.3 Устройство трансформатора .....	17
1.4 Уравнения напряжений трансформатора .....	27
1.5 Уравнения магнитодвижущих сил и токов трансформатора .....	31
1.6 Приведение параметров вторичной обмотки и схемы замещения трансформатора .....	37
1.7 Векторная диаграмма трансформатора .....	40
1.8 Трехфазный трансформатор и схемы соединения трехфазных обмоток .....	43
1.9 Явления при намагничивании магнитопроводов трансформаторов .....	47
1.10 Влияние схемы соединения обмоток на работу трехфазных трансформаторов в режиме холостого хода .....	48
1.11 Опытное определение параметров схемы замещения трансформаторов .....	53
1.12 Упрощенная векторная диаграмма трансформаторов .....	65
1.13 Внешняя характеристика трансформатора .....	67
1.14 Потери мощности и кпд трансформатора .....	70
1.15 Регулирование напряжения трансформатора .....	76
<b>ГЛАВА 2. ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК И ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ</b>	
2.1 Группы соединения трансформаторов .....	79
2.2 Параллельная работа трансформаторов .....	84
<b>ГЛАВА 3. ТРЕХОБМОТОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ</b>	
3.1 Трехобмоточные трансформаторы .....	91
3.2 Автотрансформаторы .....	93

**ЧАСТЬ 2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ  
МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА  
ГЛАВА 4. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ И ОБМОТКИ  
СТАТОРА**

4.1	Основные типы электрических машин переменного тока ....	98
4.2	Схемы обмоток статора машин переменного тока .....	101
4.3	Расчет обмоток статора .....	104
4.4	ЭДС обмоток статора .....	109
4.5	ЭДС витка катушки .....	111
4.6	ЭДС группы катушек .....	112
4.7	ЭДС фазы обмотки .....	113

**ГЛАВА 5. МАГНИТОДВИЖУЩИЕ СИЛЫ И  
МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ОБМОТОК МАШИН  
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

5.1	Магнитодвижущие силы (МДС) обмоток .....	115
5.2	МДС сосредоточенной обмотки .....	116
5.3	МДС распределенной обмотки .....	117
5.4	МДС обмотки с сокращенным шагом .....	118
5.5	Пульсирующие, эллиптические и вращающиеся магнитные поля .....	119
5.6	Вращающееся магнитное поле трехфазных обмоток .....	120
5.7	Вращающееся магнитное поле двухфазных обмоток .....	121
5.8	Эллиптическое магнитное поле .....	123

**ЧАСТЬ 3. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ  
ГЛАВА 6. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ  
АСИНХРОННЫХ МАШИН**

6.1	Устройство асинхронных машин .....	124
6.2	Принцип действия .....	126
6.3	Режимы работ асинхронной машины .....	127
6.4	Приведение параметров обмотки ротора к числу витков обмотки статора .....	129
6.5	Векторные диаграммы асинхронной машины .....	135
6.6	Схемы замещения .....	137

**ГЛАВА 7. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В  
АСИНХРОННЫХ МАШИНАХ.  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ И  
МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

7.1	Энергетическая диаграмма асинхронной машины .....	140
7.2	Электромагнитный момент .....	142
7.3	Механические характеристики .....	144
7.4	Статически устойчивая работа электропривода с асинхронным двигателем .....	151



## **ГЛАВА 8. КРУГОВАЯ ДИАГРАММА И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

- |     |  |     |
|-----|--|-----|
| 8.1 | Способы построения круговой диаграммы асинхронной машины. Опыты холостого и короткого замыкания .....          | 155 |
| 8.2 | Построение круговой диаграммы по данным опытов .....   | 163 |
| 8.3 | Рабочие характеристики асинхронного двигателя.<br>Построение рабочих характеристик по круговой диаграмме ..... | 165 |

## **ГЛАВА 9. ПУСК В ХОД И УПРАВЛЕНИЕ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

- |     |  |     |
|-----|--|-----|
| 9.1 | Пуск в ход асинхронного двигателя с фазным ротором .....                             | 171 |
| 9.2 | Пуск в ход асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором .....                   | 176 |
| 9.3 | Управление частотой вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором ..... | 180 |
| 9.4 | Управление частотой вращения асинхронного двигателя с фазным ротором .....           | 185 |

## **ЧАСТЬ 4. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ**

### **ГЛАВА 10. СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И УСТРОЙСТВО СИНХРОННЫХ МАШИН**

- |      |  |     |
|------|--|-----|
| 10.1 | Способы возбуждения синхронных машин ..... | 188 |
| 10.2 | Типы и устройство синхронных машин .....   | 191 |
| 10.3 | Охлаждение крупных синхронных машин .....  | 196 |

### **ГЛАВА 11. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

- |      |   |     |
|------|---|-----|
| 11.1 | Магнитная цепь синхронной машины .....                  | 199 |
| 11.2 | Магнитное поле синхронной машины .....                  | 201 |
| 11.3 | Реакция якоря синхронной машины .....                   | 205 |
| 11.4 | Уравнения напряжений синхронного генератора .....       | 212 |
| 11.5 | Векторные диаграммы синхронного генератора .....        | 215 |
| 11.6 | Характеристики синхронного генератора .....             | 216 |
| 11.7 | Практическая диаграмма ЭДС синхронного генератора ..... | 222 |
| 11.8 | Потери мощности и кпд синхронных машин .....            | 225 |

### **ГЛАВА 12. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**

- |      |   |     |
|------|---|-----|
| 12.1 | Включение генераторов на параллельную работу .....            | 229 |
| 12.2 | Нагрузка генератора, включенного на параллельную работу ..... | 232 |
| 12.3 | Угловые характеристики синхронного генератора .....           | 236 |
| 12.4 | V-образные характеристики синхронного генератора .....        | 242 |

### **ГЛАВА 13. СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ И СИНХРОННЫЙ КОМПЕНСАТОР**

- |      |  |     |
|------|--|-----|
| 13.1 | Принцип действия синхронного двигателя ..... | 246 |
|------|--|-----|

13.2	Пуск в ход синхронного двигателя .....	250
13.3	Характеристики синхронного двигателя .....	254
13.4	Синхронный компенсатор .....	258

## **ЧАСТЬ 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **ГЛАВА 14. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА**

14.1	Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока .....	265
14.2	Устройство машин постоянного тока .....	268

### **ГЛАВА 15. ОБМОТКИ ЯКОРЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА**

15.1	Петлевые обмотки якоря .....	275
15.2	Волновые обмотки якоря .....	282
15.3	Электродвижущая сила и электромагнитный момент машин постоянного тока .....	285

### **ГЛАВА 16. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА**

16.1	Магнитная цепь машин постоянного тока .....	290
16.2	Реакция якоря в машинах постоянного тока .....	292
16.3	Виды соединений обмоток машин постоянного тока .....	295

### **ГЛАВА 17. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

17.1	Основные понятия .....	297
17.2	Генератор независимого возбуждения .....	300
17.3	Генератор параллельного возбуждения .....	304
17.4	Генератор смешанного возбуждения .....	306

### **ГЛАВА 18. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

18.1	Основные понятия .....	308
18.2	Пуск в ход двигателя .....	311
18.3	Двигатели параллельного возбуждения .....	313
18.4	Управление частотой вращения двигателя параллельного возбуждения .....	316
18.5	Двигатель постоянного тока последовательного возбуж- дения .....	321
18.6	Двигатель постоянного тока смешанного возбуждения .....	325
	Глоссарий .....	327
	Использованная литература .....	329

# CONTENTS

Preface .....	3
Introduction .....	4
K.1 Electromechanical energy converters .....	4
K.2 Laws, regulations and the phenomena of nature, which are based on the principle of operation of electric power mashin ...	6
K.3 Classification electrical machines .....	11
<b>PART ONE. TRANSFORMERS</b>	
<b>Chapter 1. GENERAL CONEPTS ABOUT TRANSFORMERS</b>	
1.1 Transformer station in life and fields of application .....	14
1.2 The principle of operation of the transformer .....	15
1.3 Transformer apparatus .....	17
1.4 Transformer voltage equation .....	27
1.5 Equations magnetomotive force and current transformer .....	31
1.6 Taking the parameters of the secondary winding and equivalent circuit of the transformer .....	37
1.7 Vector diagram of the transformer .....	40
1.8 Three-phase transformer and connection circuits of three-phase windings .....	43
1.9 Phenomena in the magnetization of magnetic cores of transformers .....	47
1.10 Influence of connection of the windings to work three-phase transformers in .....	48
1.11 The experimental determination of equivalent circuit parameters of transformers .....	53
1.12 The simplified vector diagram of transformer .....	65
1.13 The external characteristics of the transformer .....	67
1.14 Power losses and efficiency of transformer .....	70
1.15 Voltage regulation of the transformer .....	76
<b>CHAPTER 2. GROUP WINDING CONNECTION AND PARALLEL OPERATION OF TRANSFORMERS</b>	
2.1 Groups of connection of transformers .....	79
2.2 Parallel operation of transformers .....	84
<b>CHAPTER 3. THREE-WINDING TRANSFORMERS AND AUTOTRANSFORMERS</b>	
3.1 Three-winding transformers .....	91
3.2 Autotransformers .....	93

**PART TWO. GENERAL QUESTIONS OF AC  
MACHINES**

**CHAPTER 4. THE MAIN PART AND THE STATOR  
WINDING**

4.1	The main types of electrical machines of alternating current .....	98
4.2	Schemes of the stator windings of AC machines .....	101
4.3	The calculation of the stator windings .....	104
4.4	The EMF of the stator windings .....	109
4.5	EMF of coil turn .....	111
4.6	EMF groups of coils .....	112
4.7	The EMF of the phase winding .....	113

**CHAPTER 5. MAGNETOMOTIVE FORCE AND  
MAGNETIC FIELD WINDINGS OF AC MACHINES**

5.1	Magnetomotive forces (MMF) of the windings .....	115
5.2	MMF concentrated winding .....	116
5.3	MMF of distributed winding .....	117
5.4	MMF winding with a reduced step .....	118
	Pulsating, elliptical, and the rotating magnetic field .....	119
5.6	A rotating magnetic field three phase windings .....	120
5.7	A rotating magnetic field of the two-phase windings .....	121
5.8	Elliptical magnetic field .....	123

**THE THIRD PART. ASYNCHRONOUS MACHINE**

**CHAPTER 6. THE DEVICE AND PRINCIPLE OF  
OPERATION ASYNCHRONOUS MACHINE**

6.1	The device asynchronous machines .....	124
6.2	The principle of operation .....	126
6.3	The modes of operations of asynchronous machines .....	127
6.4	Taking the parameters of the rotor winding to the number of turns of the stator winding .....	129
6.5	The vector diagram of asynchronous machine .....	135
6.6	Equivalent circuit .....	137

**CHAPTER 7. ENERGY PROCESSES IN  
ASYNCHRONOUS MACHINES. ELECTROMAGNETIC  
TORQUE AND MECHANICAL CHARACTERISTICS**

7.1	Energy diagram of asynchronous machine .....	140
7.2	Electromagnetic torque .....	142
7.3	Mechanical characteristics .....	144
7.4	Statically stable operation of the electric drive with asynchronous motor .....	151

## **CHAPTER 8. THE PIE CHART AND THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF THE INDUCTION MOTOR**

8.1 How to build a circular diagram of asynchronous machine. Experiments no-load and short-circuit .....	155
8.2 The construction of a pie chart according to the experiments ....	163
8.3 The operating characteristics of the induction motor. Building performance for a pie chart .....	165

## **CHAPTER 9. START UP AND REGULIROVANIYE FREQUENCY OF ROTATION OF THE ROTOR OF THE ASYNCHRONOUS ENGINE**

9.1 Start up of the asynchronous engine with a phase rotor .....	171
9.2 Start up the induction motor with squirrel cage rotor .....	176
9.3 The rotation speed control of asynchronous motor with squirrel cage rotor .....	180
9.4 The rotation speed control of the asynchronous engine with a phase rotor .....	185

## **FOURTH PART. SYNCHRONOUS MACHINES**

### **CHAPTER 10. THE DRIVING METHOD AND APPARATUS OF THE SYNCHRONOUS MACHINE**

10.1 Excitation methods synchronous machines.....	188
10.2 Types of synchronous machines and apparatus .....	191
10.3 Cooling large synchronous machines .....	196

### **CHAPTER 11. THE MAGNETIC FIELD AND THE CHARACTERISTICS OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR**

11.1 The magnetic circuit of the synchronous machine .....	199
11.2 The magnetic field synchronous machines .....	201
11.3 The reaction of the armature of the synchronous machine .....	205
11.4 Synchronous generator voltage equation .....	212
11.5 Vector diagram of a synchronous generator .....	215
11.6 Characteristics of a synchronous generator .....	216
11.7 Practical diagram EMF synchronous generator .....	222
11.8 Power losses and efficiency of synchronous machines .....	225

### **CHAPTER 12. PARALLEL OF SYNCHRONOUS GENERATORS.**

12.1 Enabling generators for parallel operation .....	229
12.2 The load generator parallel operation .....	232
12.3 The angular characteristics of the synchronous generator .....	236
12.4 V-shaped characteristics of a synchronous generator .....	242

**CHAPTER 13. THE SYNCHRONOUS MOTORS AND  
SYNCHRONOUS CONDENSERS**

13.1	The principle of operation of the synchronous motor .....	246
13.2	Start-up of the synchronous motor .....	250
13.3	Characteristics of a synchronous motor .....	254
13.4	Synchronous compensator .....	258

**FIFTH PART. DC ELECTRICAL MACHINES**

**CHAPTER 14. OPERATION THE DC ELECTRICAL  
MACHINES**

14.1	The principle of operation of the generator and a DC motor ....	265
14.2	The device DC machine .....	268

**CHAPTER 15. THE ARMATURE WINDING DC  
MACHINES**

15.1	Loop armature winding .....	275
15.2	Wave armature winding .....	282
15.3	Electromotive force and electromagnetic torque DC machines	285

**CHAPTER 16. MAGNETIC FIELD OF DC MACHINES**

16.1	Magnetic circuit DC machines .....	290
16.2	Armature reaction in a DC machines .....	292
16.3	Types of DC machines winding connections .....	295

**CHAPTER 17. DC GENERATOR**

17.1	Basic concepts .....	297
17.2	Separate excitation generator .....	300
17.3	Shunt generator .....	304
17.4	Mixed excitation generator .....	306

**CHAPTER 18. THE DC MOTOR**

18.1	Basic Concepts .....	308
18.2	Start the engine running .....	311
18.3	Shunt motors .....	313
18.4	Engine speed control shunt .....	316
18.5	Engine DC series excitation current .....	321
18.6	DC motor mixed excitation .....	325
	Glosary .....	327
	References .....	329



**ALIMXODJAYEV K. T., PIRMATOV N. B.,  
ZIYOXO‘JAYEV T. I.**

# **ELEKTR MASHINALARI**

**Toshkent – «Fan va texnologiya» – 2018**

Muharrir:	Sh.Kusherbayeva
Tex. muharrir:	A.Moydinov
Musavvir:	F.Tishabayev
Musahhih:	Sh.Mirqosimova
Kompyuterda sahifalovchi:	N.Raxmatullayeva

**E-mail: [tipografiyacent@mail.ru](mailto:tipografiyacent@mail.ru) Tel: 71 245-57-63, 71 245-61-61.**

**Nashr.lits. A1№149, 14.08.09. Bosishga ruxsat etildi 24.11.2018.**

**Bichimi 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. «Timez Uz» garniturası. Ofset bosma usulida bosildi.**

**Shartli bosma tabog‘i 20,75. Nashriyot bosma tabog‘i 21,5.**

**Tiraji 10. Buyurtma № 482.**



**«Fan va texnologiyalar Markazining bosmaxonasi» da chop etildi.  
100066, Toshkent sh., Olmazor ko'chasi, 171-uy.**