

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI  
OLIY VA O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI

ABU RAYHON BERUNIY NOMIDAGI  
TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

**N. B. PIRMATOV, O. E. ZAYNIYEVA**

---

# ELEKTROMEXANIKA ASOSLARI

*O'quv qo'llanma*

TOSHKENT «MA'NAVIYAT» 2015

UO'K 621.3.01(075.8) - *Электротехника асослари*  
KBK 31.21.ya73  
P 46

**Pirmatov N., Zayniyeva O.**

P 46 Elektromexanika asoslari. / O'quv qo'llanma. / O'zbekiston Respublikasi oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligi. Abu Rayhon Beruniy nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti. —T. «Ma'naviyat», 2015. — 104 b.

ISBN 978-9943-04-284-1

Ushbu o'quv qo'llanma texnika oliy o'quv yurtlari uchun mo'ljallangan bo'lib, davlat standarti asosida tayyorlangan.

Qo'llanmada ideallashtirilgan elektromexanik energiya o'zgartgichlarning umumiy nazariyasi asoslari yoritilgan bo'lib, u elektromexanika sohasi bo'yicha mutaxassislar tayyorlashda umumkasbiy va maxsus fanlar uchun baza hisoblanadi.

O'quv qo'llanma texnika oliy o'quv yurtlarining «Elektrotexnika, elektromexanika va elektrotexnologiyalari» yo'nalishi talabalari uchun mo'ljallangan.

**Тақризчи: проф. N. M. Usmonxo'jayev**

Это учебное пособие создано на основе Государственного стандарта и предназначено для технических вузов.

В учебном пособии освещены основы общей теории идеализированной электромеханических преобразователей энергии, и является базой для общих и специальных предметов при подготовке специалистов по электромеханике.

Учебное пособие предназначено для бакалавров по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» технических вузов.

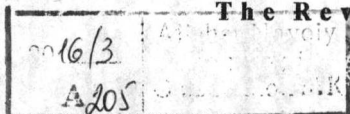
**Рецензент: проф. H. M. Usmanhodjaev**

This textbook is created on base of the State standard. And is intended for technical high school.

In textbook lit bases to general theory idealized electromechanic converters to energy, and is a base for the general and special subject when preparing specialist on electro mechanics.

The Textbook is intended for bachelor on direction «Electrical engineering, electro mechanics and electro technologies» technical high school.

**The Reviewer: проф. N. M. Usmanhodjaev**



ISBN 978-9943-04-284-1

UO'K 621.3.01(075.8)  
KBK 31.21.ya73

© «Ma'naviyat», 2015



## KIRISH

Elektromexanika — elektromagnit kuchlarining hosil bo'lishi va ularning elektromagnit maydonida ta'sirlanishidir. Ammo elektromexanika juda keng tushuncha bo'lib, unga energiyani elektromexanik o'zgartgich (EEO') (elektr mashinalari), elektr yurutmalardan tashqari elektr akustika, magnit gidro va aerodinamika hamda boshqalar kiradi.

EEO' — juda keng turkumli qurilmalar bo'lib, u mexanik energiyani elektr energiyaga yoki elektr energiyani mexanik energiyaga o'zgartirib beradi.

EEO' bir necha MW dan yuz MW gacha bo'lgan quvvatlarga ega bo'ladi.

Ular ishlatiladigan sohalar turli xil bo'lib, juda kichik datchiklardan tortib juda katta quvvatli o'zgaruvchan tok generatori sifatida ishlatiladi.

EEO' larning turli xil bo'lishi ularning konstruksiyasining o'ziga xos xususiyatlarini emas, balki umumiy printsiplarni o'rganishga undaydi.

Elektromexanika elektromagnit holat nazariyasi va mexanika orasidagi chegaraviy bo'lim hisoblanadi. Umumiy holat — jism va zarrachalarning harakati, mexanik kuchlarning o'zaro ta'siri bilangina emas, balki elektromagnit kuchlarining ta'siri bilan ham aniqlanadi. Demak, jism va zarrachalarning harakati elektromagnit maydonida harakatlanayotgan jismning o'zi elektr zaryadini yoki tokini olib yuradi.

Shunday qilib, elektromagnit kuch fazodagi jismning holati va tezligining funksiyasi hisoblanadi. Shuning uchun ham EEO' larning holatini belgilovchi tenglamalar sistemasini elektr yoki mexanik qismlarga bo'lishning iloji yo'q.

Elektromexanikaning masalalarini yechishda umumiy yondashuvchi elektromagnit maydonida tok yoki zaryad tashuvchi jism deb qarash kerak. Bu elektrodinamikaning asosiy tenglamalari hisoblangan Maksvelning elektromagnit maydon tenglamalari yordamida amalga oshirilishi mumkin.

Ammo bu tenglamalarni yechishda chegaraviy shartlarni aniqlash murakkab hisoblanadi. Shu sababli EEO'ni elektr va magnit zanjirlar birligidan iborat, deb qarash qulay hisoblanadi.

## **I bob. ELEKTROMEXANIK SISTEMALARNING ENERGIYASI, KUCHLARI VA ELEKTR YURITUVCHI KUCHLARI**

### **1.1. Energiya turlarining balansi**

EEO' ning harakatlanuvchi qismlarining siljishi natijasida elektr zanjiri, mexanik sistema va elektromagnit maydon orasida energiya almashinuvi sodir bo'ladi.

Bizni foydali energiya o'zgarishi qiziqtirganligi sababli, issiqlik isroflariga to'xtalmaymiz. Aktiv qarshilikni esa tashqi zanjir qarshiligining bir qismi deb hisoblaymiz.

Bundan tashqari real sharoitda elektr maydon energiyasining o'zgarishi, elektr va magnit maydonlarining o'zgarishi natijasida energiyaning nurlanishi sodir bo'ladi, buning oqibatida magnit maydonida energiya isrofi ham bo'ladi.

50 Gts chastotada energiyaning nurlanishini hisobga olmasa ham bo'ladi. Elektromagnit qurilmalardagi elektr maydonining energiyasi juda kam (elektr zanjirlarining elementlari orasida sig'imining kichikligi tufayli masalan, g'altak o'ramlari orasidagi) bo'lganligi sababli, uni ham hisobga olmasa bo'ladi.

Juda ko'pgina elektromagnit qurilmalardagi magnit zanjirlarida gisterezis va uyurma toklar hosil qilgan isroflar uncha katta bo'lmaganligi sababli ularni ham tahlil qilish jarayonida hisobga olmasa bo'ladi.

Yuqoridagilarni hisobga olgan holda elektromexanik sistemasining energiya balans tenglamasini quyidagicha yozish mumkin:

$$\Delta W_{el} \approx \Delta W_m + \Delta W_{mex}, \quad (1.1)$$

bu yerda:  $\Delta W_m$  — magnit maydon energiyasi;

$\Delta W_{mex}$  — mexanik energiya.

(1.1) formuladan shu narsa ko'rinadiki, agarda elektr energiyasi magnit maydon energiyasidan katta bo'lsa, u holda elektr energiyasining bir qismi mexanik energiyaga aylanadi.

Demak, mexanik ish (energiya) ikkita elektr kattalik  $i$  va  $x$  yoki  $\psi$  va  $x$  lar orqali aniqlanar ekan:

$$\Delta W_{mex}(i,x) = \Delta W_{el}(i,x) - \Delta W_{mag}(i,x), \quad (1.2a)$$

yoki

$$\Delta W_{mex}(\psi,x) = \Delta W_{el}(\psi,x) - \Delta W_{mag}(\psi,x) \quad (1.2b)$$

O'zgartirish jarayonidagi o'rtacha kuch quyidagi tenglamadan topiladi:

$$\Delta W_{mex} = f_{o'r} \Delta x, \quad (1.3)$$

(1.2) ga asosan quyidagiga ega bo'lamiz:

$$f_{o'r}(i,x) = \frac{\Delta W_{el}(i,x)}{\Delta x} - \frac{\Delta W_{mag}(i,x)}{\Delta x} \quad (1.4a)$$

yoki

$$f_{o'r}(\psi,x) = \frac{\Delta W_{el}(\psi,x)}{\Delta x} - \frac{\Delta W_{mag}(\psi,x)}{\Delta x} \quad (1.4b)$$

Shunday qilib, elektr va magnit energiyasi sistemalarining tenglamalari yordamida kuch (moment) tenglamasini keltirib chiqarish mumkin, ya'ni dinamikada elektromexanik sistemaning holatini ko'rsatuvchi tenglamaga ega bo'lish mumkin ekan.

## 1.2 Tokli qo'zg'almas o'tkazgichli sistemasining energiyasi

$n$  qo'zg'almas o'tkazgichli (konturli) tok oqayotgan sistemaga kelayotgan energiyani aniqlaymiz. Buning uchun tok  $I_k$  qiymatining noldan qandaydir qiymatga oshgan yoki shu vaqtdagi oqim ilashimligi o'zgarishi davridagi energiyani ko'rib chiqib amalga oshirish mumkin. Qarshiligi  $r_k$  bo'lgan  $k$  konturga tashqi EYuK (kuchlanish)  $u_k$  ulangan deb faraz qilaylik. Tok (oqim ilashimligi)ning o'zgarishi EYuK ning hosil bo'lishiga bog'liq, u holda zanjirning elektr balansi bizga ma'lum bo'lgan tenglama bilan aniqlanadi:

$$u_k + e_k = r_k i_k \quad (1.5a)$$

$$u_k = r_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad (1.5b)$$

(1.5b) tenglamaning chap va o'ng qismini ik ga ko'paytirib manba sarf qilayotgan quvvatni aniqlaymiz:

$$u_k i_k = r_k i_k^2 + i_k \frac{d\psi_k}{dt} \quad (1.6)$$

(1.6) tenglamani  $dt$  ga ko'paytirib, berilgan vaqt intervali davomida  $k$  konturdagi manba bajargan ishni topamiz:

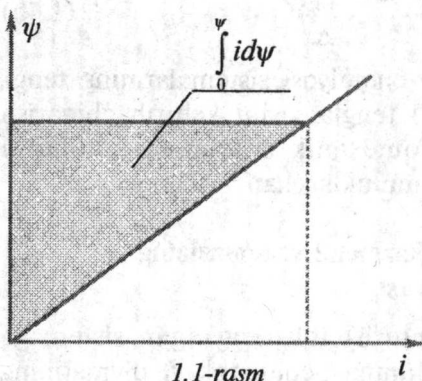
$$u_k i_k dt = dW_{elk} = r_k i_k^2 dt + i_k d\psi_k. \quad (1.7)$$

bu ishning bir qismi ( $r_k i_k^2 dt$ ) issiqlik ko'rinishida yo'qoladi, qolgan qismi ( $i_k d\psi_k$ ) – konturning magnit maydoni ko'rinishida yig'iladi, ya'ni

$$dW_{magnk} = i_k d\psi_k.$$

Shunday qilib,  $n$  ta toklarning magnit energiyasi quyidagiga teng ekan:

$$W_{magnk} = \sum_{k=1}^n \int_0^{\psi_k} i_k d\psi_k. \quad (1.8)$$



Agarda  $i$  va  $\psi$  orasida chiziqli bog'lanish bo'lsa, (1.8) tenglamadagi integralning qiymatini 1.1-rasm yordamida topish mumkin.

Chiziqli sistemalar uchun (1.8) tenglamani konturning induktivligi va o'zaro induktivligi orqali yozish qulay. Ma'lumki,  $k$  konturning oqim ilashimligi konturning barcha toklarining chiziqli funktsiyasi hisoblanadi, ya'ni:

$$\psi_k = \sum_{s=1}^n L_{ks} I_s \quad (1.9a)$$

bu yerda:  $L_{ks}$  –  $k$  va  $s$  konturlarning o'zaro induktivligi;

$L_{kk} = L_k$  –  $k$  konturning induktivligi.

(1.9a) tenglamani boshqacha ko'rinishda ham yozish mumkin:

$$\psi_k = L_k I_k + \sum_{\substack{s=1 \\ k \neq s}}^n L_{ks} I_s. \quad (1.9b)$$

Bundan shu narsa ko'rinadiki,  $k$  kontur oqim ilashimligining o'zgarishini quyidagicha yozish mumkin:

$$\Delta\psi_k = L_k \Delta I_k + \sum_{s=1}^n L_{ks} \Delta I_s.$$

Demak, (1.8) tenglamaning integral osti qismini quyidagicha yozish mumkin:

$$\Delta W_{magk} = I_k \Delta \Psi_k = I_k (L_k \Delta I_k + \sum_{s=1}^n L_{ks} \Delta I_s). \quad (1.10)$$

yoki konturlar bo'yicha qo'shishni hisobga olgan holda (oqim ilashimligi bo'yicha integralsiz):

$$\Delta W_{mag} = \sum_{k=1}^n I_k (L_k \Delta I_k + \sum_{s=1}^n L_{ks} \Delta I_s). \quad (1.11)$$

Bu tenglamani keyingi o'zgartirish uslubida tushintirish uchun ikki konturning yakka holatini ko'rib chiqamiz. Ular uchun (1.11) tenglama quyidagi ko'rinishni egallaydi:

$$\Delta W_{mag} = L_{11} I_1 \Delta I_1 + L_{12} I_1 \Delta I_2 + L_{21} I_2 \Delta I_1 + L_{22} I_2 \Delta I_2.$$

$L_{12} = L_{21}$  ekanligini hisobga olgan holda quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\frac{\Delta W_{mag}}{\Delta t} = \frac{\Delta}{\Delta t} \left( \frac{1}{2} L_1 I_1^2 \right) + \frac{\Delta}{\Delta t} \left( \frac{1}{2} L_2 I_2^2 \right) + \frac{\Delta}{\Delta t} (L_{12} I_1 I_2)$$

yoki

$$dW_{mag} = d \left( \frac{1}{2} L_1 I_1^2 \right) + d \left( \frac{1}{2} L_2 I_2^2 \right) + d (L_{12} I_1 I_2)$$

ya'ni ikki konturda yig'ilgan magnit energiya quyidagicha aniqlanadi:

$$W_{mag} = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + L_{12} I_1 I_2 \quad (1.12)$$

Demak,  $n$  kontur uchun esa quyidagicha yozish mumkin ekan:

$$W_{mag} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n L_k I_k^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{s=1}^n L_{ks} I_k I_s \quad (1.13)$$

(1.13) dagi  $\frac{1}{2}$  ko'paytma  $L_{ks} = L_{sk}$  ekanligini hisobga oladi va bu parametr ikki marta qo'shishda ikki marta uchraydi.

Shuning uchun

$$W_{mag} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n I_k (L_k I_k + \sum_{s=1}^n L_{ks} I_s)$$

yoki

$$W_{mag} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (L_k I_k^2 + \sum_{s=1}^{\ell_n} L_{ks} I_s I_k) \quad (1.14a)$$



(1.19) tenglamani hisobga olgan holda quyidagicha yozish mumkin:

$$W_{mag} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n I_k \psi_k. \quad (1.14b)$$

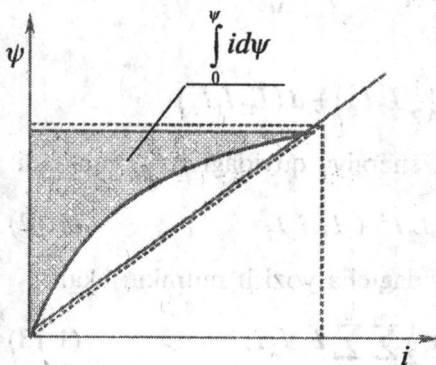
Demak, chiziqli konturli sistemalar uchun quyidagiga ega bo'lamiz:

$$W_{mag} = \sum_{k=1}^n \int_0^{\psi_k} i_k d\psi_k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n I_k \psi_k. \quad (1.15)$$

Bu tenglama to'liq energiyani ifodalaydi.

### 1.3. Nochiziqlikning ta'siri

Agarda g'altakning magnitlanishi egri chizig'i to'g'ri chiziqli bo'lmasa, yuqoridagi (§1.2) tahlil bu erda ham to'g'ri bo'ladi. Ammo (1.8) tenglamadagi integralning yig'ilgan energiya uchun yechimi boshqacha bo'ladi. Agar g'altakning boshlang'ich oqim ilashimligi  $\psi = 0$  bo'lsa, u holda magnitlanish egri chizig'i koordinatalar boshidan o'tadi va (1.8) tenglama to'g'ri hisoblanib nochiziqli sistemada yig'ilgan energiya chiziqli bog'lanish kabi aniqlanadi (1.2-rasm).



1.2-rasm

Elektromagnit qurilmalarni o'rganishni chiziqli sistemalardan boshlash kerak, chunki amaliyotda uchraydigan murakkab fizik holatlar 1.2-rasmda ko'rsatilgan egri chiziqdan ancha farq qiladi (qoldiq oqim, gisterezis va boshqalar tufayli). hattoki ( $\psi$  va  $i$  orasidagi bog'lanish koordinatalar boshidan o'tgan taqdirda ham hisoblash ishlari murakkab bo'ladi.

### 1.4. Kuchning energiya o'zgarish orqali ifodasi

Quyidagi elektromexanik sistemada hosil bo'ladigan kuch (moment)-ning tenglamasini topishni ko'rib o'tamiz.

Bitta qo'zg'atish chulg'ami bo'lgan sistemani ko'rib chiqamiz. Chulg'amning qarshiligini hisobga olmagan holda, elektr tenglikning shartini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$U \approx e = L \frac{di}{dt} = \frac{d\psi}{dt}. \quad (1.16)$$

Energetik balansni esa quyidagi tenglama ifodalaydi:

$$dW_{el} = dW_{mag} + dW_{mex}$$

bu yerda  $dW_{mex} = f dx$ .

Quvvatni topsak

$$f \frac{dx}{dt} + \frac{dW_{mag}}{dt} = \frac{dW_{el}}{dt} = Ui = ei = i \frac{d\psi}{dt}. \quad (1.17)$$

$W_{mag} = \frac{1}{2} \psi i$  ekanligini hisobga olsak va hosilasini ko'rsak:

$$\frac{dW_{mag}}{dt} = \frac{1}{2} \left( \psi \frac{di}{dt} + i \frac{d\psi}{dt} \right). \quad (1.18)$$

Shunday qilib, (1.16), (1.17) va (1.18) - tenglamalarga asosan quyidagiga ega bo'lamiz

$$f \frac{dx}{dt} + \frac{1}{2} I \frac{d\psi}{dt} = I \frac{d\psi}{dt}. \quad (1.19)$$

(1.19) dan shu narsa ko'rinadiki, agarda konturdagi tok  $I = \text{const}$  bo'lsa, u holda (1.19) tenglama quyidagi ko'rinishni egallaydi:

$$f \frac{dx}{dt} + \frac{1}{2} I \frac{d\psi}{dt} = I \frac{d\psi}{dt}. \quad (1.20)$$

(1.20) tenglamadan

$$f = \frac{1}{2} I \frac{d\psi}{dt} \bigg|_{I = \text{const}} = \frac{d\psi}{dt} \bigg|_{I = \text{const}}. \quad (1.21)$$

ga ega bo'lamiz.

Agar ( $\psi = \text{const}$  bo'lsa, (1.19) tenglama quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$f \frac{dx}{dt} + \frac{1}{2} \psi \frac{di}{dt} = 0,$$

bundan

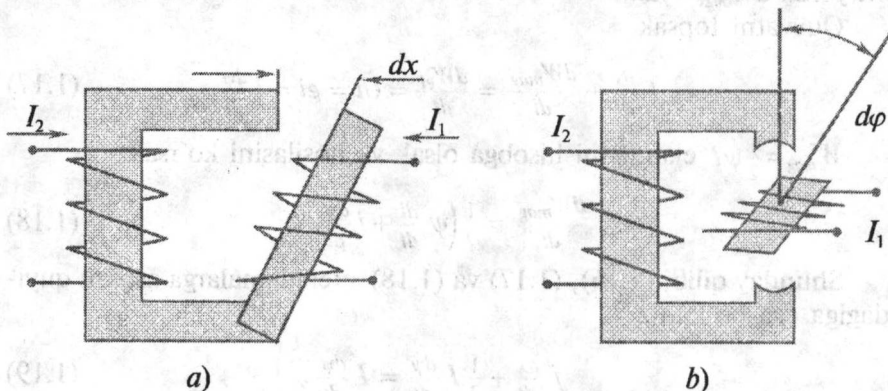
$$f = -\frac{1}{2} \psi \frac{di}{dx} \bigg|_{\psi = \text{const}} = -\frac{dW_{mag}}{dx} \bigg|_{\psi = \text{const}}. \quad (1.22)$$

ga ega bo'lamiz.

## 1.5. O'zaro induktivlik o'zgargan holdagi konturlar orasidagi kuchlar va momentlar

§ 1.4 dagi xulosalarni  $L_1$  va  $L_2$  induktivliklar va  $L_{12} = L_{21} = L$  o'zaro induktivlarga ega bo'lgan 2 ta konturli qurilma uchun qo'llaymiz.

Bunday qurilmaning ko'rinishi 1.3 – rasmda ko'rsatilgan.



1.3-rasm. Ikki konturli qurilma.

Agar konturda  $I_1$  va  $I_2$  toklar oqayotgan bo'lsa, (1.12) tenglamaga asosan magnit maydonida yig'ilgan energiya quyidagicha aniqlanadi:

$$W_{mag} = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + L I_1 I_2.$$

1-konturga (1.3,a- rasm) kichik siljish  $dx$  berilsa, (1.21) tenglamaga asosan quyidagi kuchga ega bo'lamiz:

$$f_1 = \frac{\partial W_x}{\partial x} = \frac{1}{2} I_1^2 \frac{\partial L_1}{\partial x} + \frac{1}{2} I_2^2 \frac{\partial L_2}{\partial x} + I_1 I_2 \frac{\partial L}{\partial x}. \quad (1.23)$$

Xuddi shuningdek 1.3,b-rasmdagi qurilmaning 1-kontur momenti tenglamasini

$$dx = d(PD \frac{\varphi}{2P}) = \frac{D}{2} d\varphi$$

ekanligini hisobga olgan holda 2-konturga nisbatdan tok va burchak siljish orqali aniqlash mumkin:

$$m_{1\varphi} = \frac{1}{2} I_1^2 \frac{\partial L_1}{\partial \varphi} + \frac{1}{2} I_2^2 \frac{\partial L_2}{\partial \varphi} + I_1 I_2 \frac{\partial L}{\partial \varphi} \quad (1.24)$$

Ko'p hollarda induktivlik siljishga bog'liq bo'lmaydi, shu sababli yuqoridagi tenglamalar quyidagi ko'rinishni egallaydi.

$$\begin{cases} f_{1x} = I_1 I_2 \frac{\partial L}{\partial x} \\ m_{1\varphi} = I_1 I_2 \frac{\partial L}{\partial \varphi} \end{cases} \quad (1.25)$$

Oqim ilashimligining tokka bog'lanishi

$$\begin{cases} \psi_1 = L_1 I_1 + L I_2 \\ \psi_2 = L_2 I_2 + L I_1 \end{cases} \quad (1.26)$$

ni hisobga olgan holda (1.25) tenglamani boshqacha yozish mumkin

$$\begin{cases} f_{1x} = I_1 \frac{\partial \psi_1}{\partial x} \\ m_{1\varphi} = I_1 \frac{\partial \psi_1}{\partial \varphi} \end{cases} \quad (1.27)$$

(1.27) tenglama shu narsani ko'rsatadiki, induktivligi o'zgarmas bo'lgan konturda kuch yoki moment, oqim ilashimligi o'zgarishi konturlarning toki yoki guruh konturlari toki ta'sirida sodir bo'lishga qaramasdan hosil bo'ladi.

## 1.6. Elektromexanik sistemaning elektr yurutuvchi kuchi

Yuqorida keltirilgan (1.27) tenglama elektromexanik sistemaning elektr zanjiri mexanik qisimiga qanday ta'sir qilishini ko'rsatadi, ya'ni bog'lanishning bir turi bo'lgan elektr va mexanik bog'lanishni ham tasvirlaydi. Demak, elektromexanik sistema mexanik qismining elektr zanjiriga ta'siri yoki bog'liqligi Faradey qonuniga asoslangan.

Elektromexanik sistemaning EYuK ning fizik mohiyatini ko'rsatish uchun, masalan ikki konturli sistemaning birinchi konturi uchun Faradey qonunini umumiy ko'rinishda yozamiz:

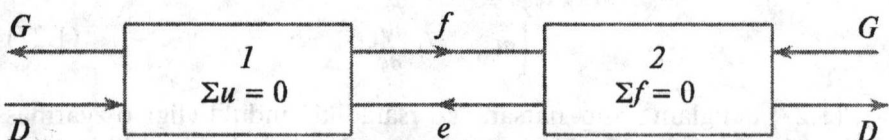
$$e = \frac{d\psi(i_1, i_2, x)}{dt} = \frac{\partial \psi}{\partial i_1} \cdot \frac{\partial i_1}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial i_2} \cdot \frac{\partial i_2}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t}, \quad (1.28)$$

bu yerda: birinchi tashkil etuvchi — chulg'amning toki (oqim ilashimligi) o'zgarishi natijasida hosil bo'lgan EYuK; ikkinchi tashkil etuvchi — qo'shni chulg'am toki (oqim ilashimligi) o'zgarishi natijasida hosil bo'lgan o'zaro induksiya EYuK; uchinchi tashkil etuvchi — sistema qismlarining o'zaro siljishi natijasida hosil bo'lgan EYuK.

Odatda (1.28) tenglamaning birinchi va ikkinchi tashkil etuvchilari birgalikda ko‘riladi va transformatorli EYuK deb ataladi, chunki bunday EYuK mexanik qo‘zg‘atuvchi qismi bo‘lmagan masalan, transformatorlarda ham bo‘ladi.

(1.28) tenglamadagi uchinchi tashkil etuvchi faqat elektromexanik sistema uchun xarakterlidir. U EYuK mexanik siljish oqibatida hosil bo‘lib, harakat tezligiga bog‘liq bo‘lganligi sababli harakat EYuK deb ataladi.

Shunday qilib, har qanday elektromexanik sistema strukturaviy tuzilishi bo‘yicha quyidagi ko‘rinishda bo‘ladi.



**1.4-rasm. Elektromexanik sistemaning strukturaviy tuzilishi:**

1-elektromagnit qurilma (elektr sistemasi (zanjir)); 2-mexanik sistema.

Elektr zanjiri Kirxgof tenglamalari yordamida ifodalanadi va bunda siljish EYuK ham hisobga olinadi.

Mexanik sistema esa dinamik balans tenglamalari (Dalamber printsipi) yordamida ifodalanadi.

Demak, elektromagnit kuch va harakat EYuK ikki xil bog‘lanishni, ya‘ni sistemaning elektr va mexanik qismlari orasidagi bog‘lanishni ifodalar ekan. Bu bog‘lanishning bo‘lishi EMO‘ ning ham generator, ham motor rejimlarida (EMO‘ ning qaytarlik printsipini) ishlashini ta‘minlaydi.

### ***Nazorat savollari***

1. Elektromexanik sistemasi energiya turlarining balansi tenglamasi qanday ko‘rinishga ega?
2. Elektromexanik sistemaning kuchi qanday aniqlanadi?
3. Chiziqli va nochiziqli elektromexanik sistemalarining magnit energiya zaxirasi tenglamasi qanday ko‘rinishga ega?
4. Elektromexanik sistemaning kuchi va momenti uning induktivligi orqali qanday aniqlanadi?
5. Elektromexanik sistemaning qaytarlik printsipi deganda nimani tushunasiz?



## II bob. IDEALLASHTIRILGAN ELEKTROMEXANIK O'ZGARTGICHNING UMUMIY NAZARIYASI

### 2.1. Fizik model

EMO'lar, ya'ni elektr mashinalari — motorlar va generatorlar, tuzilishi bo'yicha turli xil bo'lishi mumkin, ammo ular ayrim jihatlar bo'yicha asosiy o'xshashliklarga ega bo'ladi.

Ko'pgina elektr mashinalari tuzilishi bo'yicha «magnit» turkumi hisoblanadi, ya'ni magnit maydoni asosiy hisoblanadi. Shu sababli fizik strukturaning asosini magnit materiallarda joylashtirilgan o'tkazgichlar tashkil etadi.

Aylanuvchi harakatni amalga oshirish uchun elektr mashinalari o'tkazgichi bo'lgan kontsentrik magnit silindirli qilib tayyorlanadi.

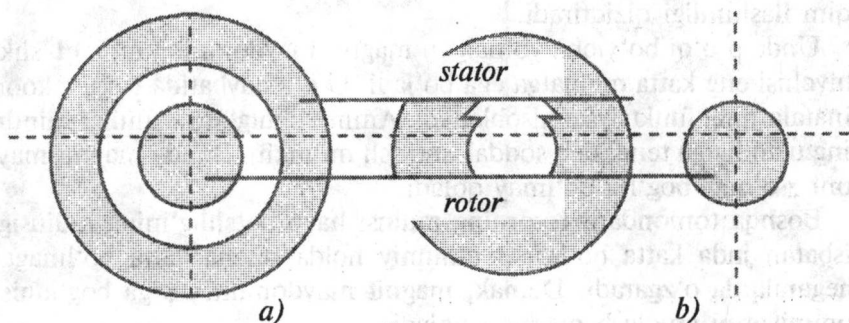
Havo bo'shlig'i istalgan tomonining magnit yuzasida ixtiyoriy shaklda bo'lishi mumkin. Ammo real konstruksiyalarda bu yuzada ikki xil bo'lishi mumkin:

- havo bo'shlig'ining har ikkala tomonida silindrik simmetriyaga ega bo'lgan kontsentrik magnit yuza (2.1,a-rasm).

- havo bo'shlig'ining bir tomoni bo'yicha silindrik simmetriyaga va boshqa tomonidan qutblarga ega bo'lgan kontsentrik magnit yuza (2.1,b-rasm).

Tahlil oson bo'lishi uchun quyidagi cheklashlarni qabul qilamiz:

- silindr materialining magnit singdiruvchiligi havoning magnit singdiruvchiligiga nisbatdan cheksiz katta;



2.1-rasm

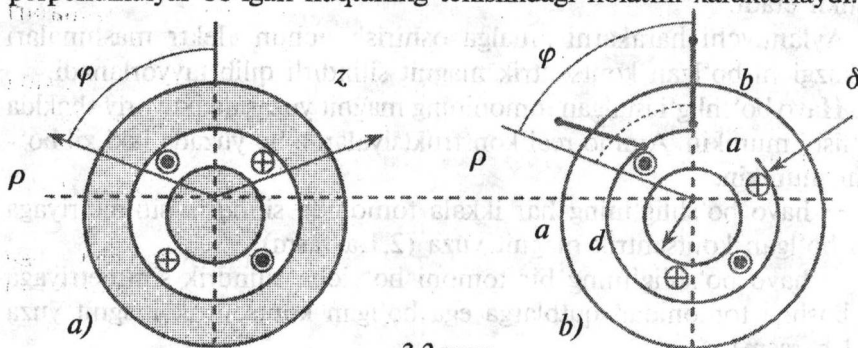
– chulg‘am rotor yoki stator yuzalariga joylashtirilgan simli g‘altaklardan yoki havo bo‘shlig‘ining ikkala tomoni shunday joylashtirilganki, bundan yig‘indi aksial tok har qaysi yuzada nolga teng;

– bir nechta chulg‘am bo‘lganda yig‘indi magnit maydoni maydonlarni oddiy qo‘shish (ustma-ust qo‘yish va superpozitsiya metodlari) metodi yordamida olinadi.

## 2.2. Havo bo‘shlig‘idagi magnit maydon.

### Chulg‘am funktsiyasi

2.2,a-rasmda ko‘rsatilgan modelni ko‘rib chiqamiz. Uni tahlil qilishda  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $z$  o‘qlari bo‘yicha silindrik koordinatalar sistemasi o‘qlaridan foydalanish qulaylikga olib keladi.  $z$  ning koordinata o‘qi modelning o‘qi bilan mos tushadi.  $\rho$  va  $\varphi$  larning qutb koordinatalari  $z$  o‘qiga perpendikulyar bo‘lgan nuqtaning tekislikdagi holatini xarakterlaydi.



2.2-rasm.

Umumiy holda havo bo‘shlig‘idagi magnit maydoni uchta o‘q bo‘yicha tashkil etuvchilarga ega (uch o‘lchamli maydon).

Birinchi navbatda bizni rotor va stator joylashgan chulg‘amlarning oqim ilashimligi qiziqtiradi.

Unda  $\rho$  o‘qi bo‘yicha yo‘nalgan magnit maydonining radial tashkil etuvchisi eng katta qiymatga ega bo‘ladi. U o‘z navbatida  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $z$  koordinatalarning funktsiyasi hisoblanadi. Ammo chulg‘am uzunligi silindrning uzunligiga teng, deb soddalashtirish mumkin. Bunda magnit maydoni  $z$  o‘qiga bog‘liq bo‘lmay qoladi.

Boshqa tomondan, rotorning radiusi havo bo‘shlig‘ining radiusiga nisbatan juda katta bo‘lsa,  $\rho$  umumiy holda uncha katta bo‘lmagan chegaralarda o‘zgaradi. Demak, magnit maydonining  $\varphi$  ga bog‘lanish qonuniyatini aniqlash masalasi qoladi.

To'la tok qonuniga asosan har qanday berk kontur masalan,  $abcd$  (2.2,b-rasm) uchun quyidagini yozish mumkin.

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \text{kontur ichidagi tok} \quad (2.1)$$

Konturning uchastkalari uchun masalan, po'lat qismida ( $bcbaad$ ), integral nolga teng bo'ladi, chunki po'latning cheksiz katta magnit singdiruvchanligida bu uchastkalardagi induksiya oxirgi qiymatga ega bo'lishi uchun magnit maydon kuchlanganligi nolga intilishi lozim.

U holda  $H_b$  ni musbat hisoblab mashina ichiga yo'nalgan deb

$$\delta [H_\delta(\varphi) - H_\delta(0)] = \sum i \quad (2.2)$$

ga ega bo'lamiz.

(2.2) tenglama havo bo'shlig'idagi  $\varphi$  koordinatalari istalgan nuqta uchun to'g'ridir. Havo bo'shlig'idan o'tuvchi hamma konturlar  $\varphi = 0$  nuqta orqali tutashadi u holda  $H_\delta(0)$  har bir tenglamada qatnashadi va konstanta hisoblanadi.

Agar kontur ichidagi tok topilsa va  $H_\delta(0)$  aniq bo'lsa, u holda (2.2) tenglamani  $H_\delta(\varphi)$  ga nisbatan yechib, havo bo'shlig'idagi magnit maydonini aniqlash mumkin.

**1. Sodda chulg'am.** Qo'shni simlarda bir biriga nisbatan toklari teskari oqayotgan 4 ta o'tkazgichdan iborat chulg'amni ko'rib chiqamiz (2.3,a-rasm).

Gauss qonuni (oqimning uzluksizlik qonuni) ga asosan berk yuzani kesib o'tuvchi to'la magnit oqimi nolga teng bo'lishi lozim:

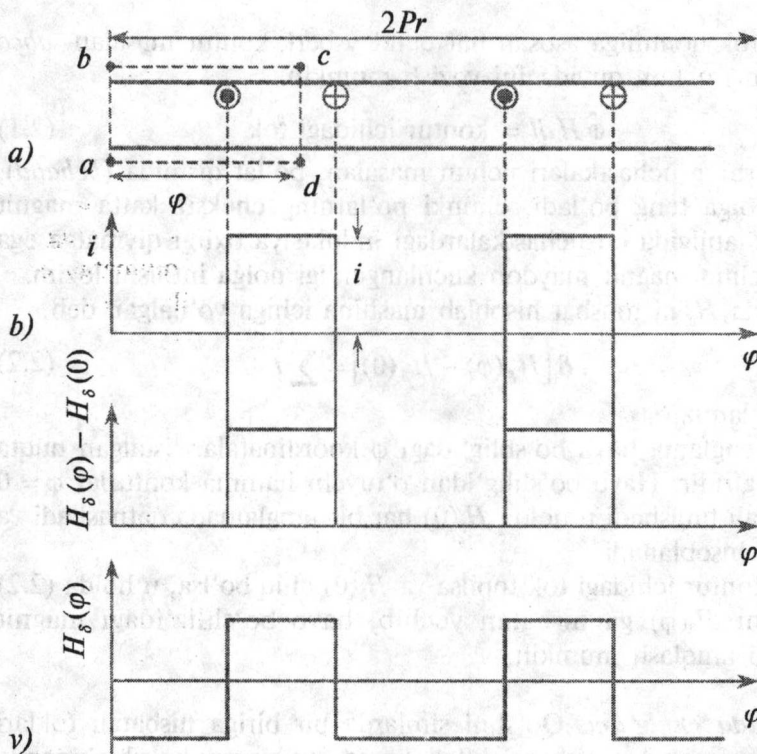
$$\Phi = \oint \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 \oint \vec{H} d\vec{s} = 0. \quad (2.3)$$

Ko'rilayotgan model uchun, havo bo'shlig'ini kesib o'tuvchi to'la oqim nolga teng. Demak,  $H_\delta(\varphi)$  ning o'rtacha qiymati nolga teng bo'lishi kerak.

Shunday qilib,  $H_\delta(\varphi)$  ning nolga teng bo'lgan o'rtacha qiymatini olish uchun 2.3,b-rasmdagi egri chiziq  $\varphi$  o'qiga nisbatan simmetrik bo'lishi kerak. Bu esa  $H_\delta(\varphi)$  doimiy tashkil etuvchisi quyidagiga teng bo'lishini bildiradi:

$$H_\delta(0) = -\frac{i}{2\delta}. \quad (2.4)$$

Havo bo'shlig'idagi magnit maydonining kuchlanganligi 2.3,v-rasmda ko'rsatilgan shaklda bo'ladi.



2.3-rasm.

**2. Ixtiyoriy chulg'am.** Quyidagi ixtiyoriy chulg'amning  $H_s(\varphi)$  o'rtacha qiymatini aniqlashni ko'rib chiqamiz.

Har qanday berk konturning tokini, kontur ichidagi o'tkazgichlarning soni va toklarning yo'nalishiga qarab aniqlash orqali topish mumkin.

Demak, (2.2) tenglamani umumiy holda quyidagicha yozish mumkin:

$$\delta [H_s(\varphi) - H_s(0)] = [n_\varphi(\varphi)] i, \quad (2.5)$$

bu yerda  $n_\varphi$  — kontur tokining musbat yo'nalishi bo'yicha yig'indi o'tkazgichlar soni;  $\varphi$  — boshlang'ich nuqta va ixtiyoriy o'q orasidagi burchak.

$n_\varphi(\varphi)$  funktsiya yordamida o'tkazgichlarning sonini aniqlab, har qanday chulg'amni hisoblab topish mumkin.

(2.5) tenglamani  $H_s(\varphi)$  ga nisbatan yechib quyidagini aniqlaymiz.

$$H_{\delta}(\varphi) = \frac{i}{\delta} n_{\varphi}(\varphi) + H_{\delta}(0). \quad (2.6)$$

Rotor yuzasi uchun Gauss qonunidan foydalanamiz. Uning elementar uchastkalarining yuzasi  $ds = r d\varphi dz$  ga teng.  $H_{\delta}(\varphi)$  u yuzaga normal bo'lgani uchun ikki vektorlarning skalyar ko'paytmasini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$\mu_0 \oint \vec{H} d\vec{s} = \mu_0 r \int_0^{2\pi} \int_0^l H_{\delta}(\varphi) dz d\varphi = \mu_0 r l \int_0^{2\pi} H_{\delta}(\varphi) d\varphi = 0.$$

Bu tenglamaga (2.6) tenglamadagi  $H_{\delta}(\varphi)$  ni qo'yib quyidagini hosil qilamiz

$$\mu_0 r l \int_0^{2\pi} \left[ \frac{i}{\delta} n_{\varphi}(\varphi) + H_{\delta}(0) \right] d\varphi = 0.$$

yoki

$$\int_0^{2\pi} \frac{i}{\delta} n_{\varphi}(\varphi) d\varphi = - \int_0^{2\pi} H_{\delta}(0) d\varphi = -2\pi H_{\delta}(0),$$

bundan

$$H_{\delta}(0) \frac{i}{\delta} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} n_{\varphi}(\varphi) d\varphi = \frac{i}{\delta} n_{\varphi_{o'rt}}. \quad (2.7)$$

U holda (2.6) dan quyidagiga ega bo'lamiz

$$H_{\delta}(\varphi) = \frac{i}{\delta} [n_{\varphi}(\varphi) - n_{\varphi_{o'rt}}]. \quad (2.8)$$

Quyidagi belgilanishni kiritamiz

$$N_{\varphi}(\varphi) = n_{\varphi}(\varphi) - n_{\varphi_{o'rt}}. \quad (2.9)$$

Havo bo'shlig'idagi magnit maydon kuchlanganligi uchun quyidagi formulaga ega bo'lamiz:

$$H_{\delta}(\varphi) = \frac{i}{\delta} H_{\varphi}(\varphi). \quad (2.10)$$

$N_{\varphi}(\varphi)$  ni chulg'am funktsiyasi deb ataymiz. Uni (2.9) tenglamaga asosan  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  interval oraliqlarida topish mumkin.

**3. Sinus chulg'ami.** Elektr mashinalarida turli xil chulg'amlar ishlatiladi, ularning har biri o'z chulg'am funktsiyasiga ega bo'ladi.

Garmonik tahlil (Furye qatoriga yoyish) har qanday chulg'amni tahlil qilishning umumiy metodi hisoblanadi. U metod yordamida har qanday chulg'am funktsiyasini amplitudasi va davri kamayuvchi cheksiz garmonik tashkil etuvchilar yig'indisi ko'rinishida ifodalash mumkin.



Chug'am funksiyasi davriy bo'lib, uning davri  $2\pi$  radianga teng. Ko'p qutbli chulg'amlarda ( $2p \geq 4$ ) u  $2\pi/p$  radianga teng.

Chulg'am funksiyasini Furrye qatoriga yoyganda uni yangi o'zgaruvchi ko'rinishida ifodalash qulay hisoblanadi, chunki har qanday juft qutblar fazoda  $2\pi$  radian burchakka teng bo'ladi. Bu o'zgaruvchi elektr burchagi hisoblanadi va u geometrik burchakka quyidagicha bog'langan bo'ladi:

$$\varphi_y = p\varphi, \quad (2.11)$$

bu yerda  $p$  — real chulg'amning juft qutblar soni.

Shunday qilib argumenti elektr burchagi bo'lgan chulg'am funksiyasining davri  $2\pi$  radianga teng bo'ladi va uni quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$N_\varphi(\varphi) = \sum_v N_v \sin(v\varphi_y) = \sum_v N_v \sin(vp\varphi). \quad (2.12)$$

### 2.3. Chulg'amning oqim ilashimligi va induktivligi

1. *Umumiy hol.* Magnit oqimni quyidagicha aniqlash mumkin:

$$\Phi = \int_S B ds, \quad (2.13)$$

bu yerda  $S$  — yuza.

Magnit maydonining havo bo'shlig'idagi tarqalishini ma'lum deb hisoblab,  $S$  yuzani quyidagicha topish mumkin:  $dS = r \cdot dz \cdot d\varphi$ .

U holda

$$\Phi = r\ell \int_s B_\delta(\varphi) d\varphi. \quad (2.14)$$

Ixtiyoriy chulg'am uchun oqim ilashimligini quyidagi ifodadan aniqlash mumkin

$$\psi = w\phi = r\ell \int_0^{2\pi} n_\varphi(\varphi) \cdot B_\delta(\varphi) d\varphi. \quad (2.15)$$

$n_\varphi(\varphi)$  funksiya faqatgina magnit maydonining tarqalish xarakterini aniqlabgina qolmay, balki oqim ilashimligini hisoblashda integrallash chegaralarini ham aniqlab beradi.

(2.9) tenglamani qo'llab

$$\psi = r\ell \int_0^{2\pi} N_{\varphi}(\varphi) \cdot B_{\delta}(\varphi) d\varphi + n_{\varphi_0\pi} r\ell \int_0^{2\pi} B_{\delta}(\varphi) d\varphi.$$

ga ega bo'lamiz.

Gauss qonuniga asosan  $B_{\delta}(\varphi)$  ning qiymati  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  chegaralarda nolga teng bo'ladi va ikkinchi integral nolga aylanganda biz quyidagiga ega bo'lamiz

$$\psi = r\ell \int_0^{2\pi} N_{\varphi}(\varphi) B_{\delta}(\varphi) d\varphi. \quad (2.16)$$

$a$  chulg'amning induktivligini aniqlashda  $B_{\delta}(\varphi)$  induksiya shu chulg'amning maydoniga bog'liq bo'ladi:

$$B_{\delta a}(\varphi) = \mu_0 H_{\delta a}(\varphi) = \mu_0 \frac{U_a}{\delta} N_{\varphi a}(\varphi). \quad (2.17)$$

(2.16) va (2.17) tenglamalarga asosan chulg'amning induktivligi quyidagiga teng bo'ladi:

$$L_a = \frac{\psi_a}{i_a} = \mu_0 \frac{r\ell}{\delta} \int_0^{2\pi} N_{\varphi a}^2(\varphi) d\varphi. \quad (2.18)$$

Ikki chulg'amning o'zaro induktivligini aniqlashda (2.16) tenglamada  $b$  chulg'amning magnit maydon induksiya bo'lishi shart:

$$B_{\delta a}(\varphi) = \mu_0 \frac{i_{\theta}}{\delta} N_{\varphi \theta}(\varphi).$$

U holda  $a$  va  $b$  chulg'amning o'zaro induktivligi quyidagicha aniqlanadi:

$$L_{a\theta} = \frac{\psi_{a\theta}}{i_{\theta}} = \mu_0 \frac{r\ell}{\delta} \int_0^{2\pi} N_{\varphi a}^2(\varphi) N_{\varphi \theta} d\varphi. \quad (2.19)$$

O'xshashlikka asosan  $b$  va  $a$  chulg'amlarning o'zaro induktivligini quyidagicha yozish mumkin:

$$L_{\theta a} = \frac{\psi_{\theta a}}{i_a} = \mu_0 \frac{r\ell}{\delta} \int_0^{2\pi} N_{\varphi \theta}^2(\varphi) N_{\varphi a}(\varphi) d\varphi$$

Bundan shu narsa ko'rinadiki, aniqlangan o'zaro induktivlik (2.19) tenglama yordamida aniqlangan o'zaro induktivlikdan farq qilmas ekan

$$L_{a\theta} = L_{\theta a} \quad (2.20)$$

Shunday qilib, chulg'am funksiyasini qo'llab ideallashtirilgan elektr mashinalarining ish holatini xarakterlash mumkin.

**2. Sinus chulg'ami.** Istalgan rotor yoki stator chulg'amlari uchun chulg'am funktsiyasining  $\nu$  – garmonikasini quyidagicha yozish mumkin:

$$N_{\varphi\nu}(\varphi) = N_{\nu} \cos(\nu \varphi_e + \gamma_{\nu}) \quad (2.21)$$

Sinus yoki kosinus funktsiyasini tanlash ixtiyoriy, chunki  $\gamma_{\nu}$  burchakning mos qiymatlarida ikkala shakl ham bir xil bo'ladi.

Tahlil uchun kosinus funktsiyasini qo'llash qulay, chunki bunda fazoviy burchak  $\gamma_{\nu}$  garmonik funktsiya o'qining joylashishini ko'rsatadi.

Istalgan chulg'amning induktivligi, masalan chulg'amning  $\nu$  – garmonikasini (2.21) tenglamani qo'llab aniqlashda, chulg'am funktsiyasi garmonikasini (2.18) tenglamaga qo'yish orqali topiladi:

$$L_{\nu} = \mu_0 \frac{r\ell}{\delta} \int_0^{2\pi} N_{\nu}^2 \cos^2(\nu \cdot \varphi_e + \gamma_{\nu}) \cdot d\varphi = \quad (2.22)$$

$$= \mu_0 \frac{r\ell}{\delta} \int_0^{2\pi} N_{\nu}^2 \cos^2(\nu p \varphi_e + \gamma_{\nu}) \cdot d\varphi = \mu_0 \frac{\pi \nu \ell}{\delta} N_{\nu}^2$$

(2.22) tenglamadan induktivlik chulg'amning fazodagi o'qiga bog'liq emasligi ko'rinadi. Sinus chulg'amning induktivligi o'zgarmas bo'lib, u faqat chulg'amning geometrik o'lchamlariga, havo bo'shlig'iga va chulg'amning o'ramlar soniga bog'liq bo'ladi.

Quyidagi chulg'am funktsiyasiga ega bo'lgan yana bitta sinus chulg'am bor deb faraz qilaylik

$$N_{\varphi k}(\varphi) = N_k \cos(k \varphi_e + \gamma_k). \quad (2.23)$$

Umumiy holda bu chulg'am boshqa qutblar soniga va fazoda boshqacha tarqalgan bo'lishi mumkin. Yuqoridagi ikki chulg'am bir yoki ikkita har xil chulg'amlarning garmonik tashkil etuvchilari bo'lishi mumkin. Har qanday holatda ham bu chulg'amlarning o'zaro induktivliklari (2.19) tenglama asosida aniqlanadi:

$$L_{\nu k} = \mu_0 \frac{r\ell}{\delta} \int_0^{2\pi} N_{\nu} \cos(\nu \varphi_e + \gamma_{\nu}) N_k \cos(k \varphi_e + \gamma_k) d\varphi = \quad (2.24)$$

$$= \mu_0 \frac{r\ell}{\delta} N_{\nu} N_k \int_0^{2\pi} \cos x \cos(kp\varphi + \gamma_k) d\varphi = 0$$

bunda  $\nu \neq k$ .

Bu tenglama qutblar soni turlicha bo'lgan sinus chulg'amlar orasida o'zaro magnit ta'sir yo'qligini ko'rsatadi.

(2.24) tenglama bitta real chulg'amga tegishli har xil garmoniklar orasida o'zaro induktivlik bo'lmashini ko'rsatadi.

Shunday qilib, har qanday chulg'amning induktivligi uning sinus chulg'amlari induktivliklarining yig'indisidan iborat bo'lar ekan.

Qutblar soni bir xil bo'lgan ( $v = k$ ) ikkita sinus chulg'amlarining o'zaro induktivligini aniqlaymiz. U ikki chulg'am indekslariga «a» va «v» belgilashlarni kiritamiz. Ikkala sinus chulg'amining chulg'am funktsiyasi quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\left. \begin{aligned} N_{\varphi av}(\varphi) &= N_{av} \cos(v\varphi_e + \gamma_{av}) \\ N_{\varphi bv}(\varphi) &= N_{bv} \cos(v\varphi_e + \gamma_{bv}) \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

Bu funktsiyalarning amplitudalari va fazoda tarqalishi turlicha bo'lishi mumkin.

(2.25) tenglamani (2.19) tenglamaga qo'yib, ayrim o'zgartirishlardan keyin quyidagiga ega bo'lamiz

$$L_{abv} = \mu_0 \frac{\pi r l}{\delta} N_{av} N_{bv} \cos(\gamma_{av} - \gamma_{bv}) \quad (2.26)$$

(2.26) tenglama bir xil qutbli ikkita sinus chulg'amining o'zaro induktivligi real chulg'amlarining asosiy tashkil etuvchilari o'qlari orasidagi burchagi  $v$  marta katta bo'lgan kosinus funktsiyasidan iborat bo'lishini ko'rsatadi. Haqiqatdan ham  $(\gamma_{av} - \gamma_{bv})$  qiymatini yozish mumkin:

$$v \left( \frac{\gamma_{av}}{v} - \frac{\gamma_{bv}}{v} \right) = v\gamma, \quad (2.27)$$

bu yerda  $\gamma$  — asosiy sinus chulg'amlarining o'qlari orasidagi elektr burchak.

Shunday qilib,

$$L_{abv} = \mu_0 \frac{\pi r l}{\delta} N_{av} N_{bv} \cos v\gamma, \quad (2.28, a)$$

yoki

$$L_{abv} = L_{(abv)m} \cos v\gamma. \quad (2.28, b)$$

(2.28, a) va (2.28, b) tenglamalar chulg'amining o'qlari mos tushganda o'zaro induktivlik (magnit bog'lanish) maksimal va o'qlar perpendikulyar bo'lganda esa o'zaro induktivlik minimal bo'lishini ko'rsatadi.

## 2.4. Ideallashtirilgan elektr mashinaning momenti

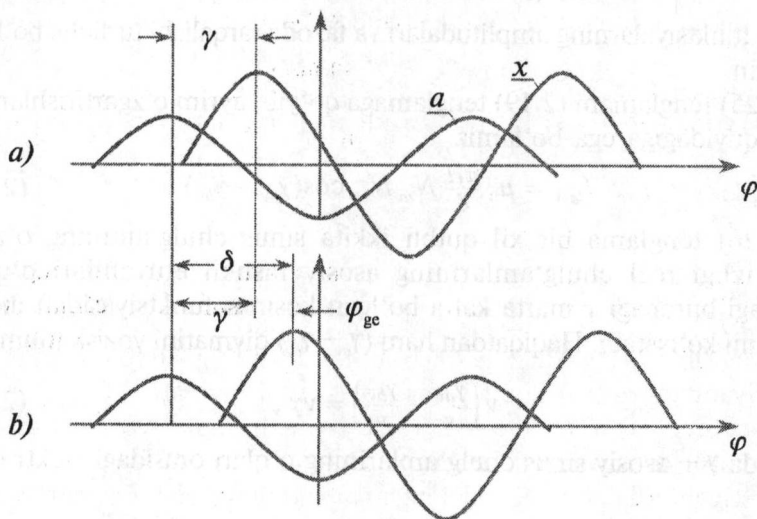
**1. Noayon qutbli mashina.** Ikki chulg'amning o'zaro ta'siridan hosil bo'lgan moment quyidagiga teng

$$M = i_a i_x \frac{dl}{d\varphi}, \quad (2.29)$$

bu yerda  $L = f(x)$  bo'lsa, moment noldan farqli bo'ladi.

Bunday hol chulg'amlardan biri statorda ikkinchisi esa rotorda joylashganda sodir bo'ladi.

Sinus chulg'ami tushunchasi yordamida umumiy hol tahlil qilinadi. Turli qutblarga ega bo'lgan sinus chulg'amlari orasida induktiv bog'lanish bo'lmaydi. Quyida stator va rotorda joylashgan  $v$  garmonikalarni ko'rib o'tamiz.



2.4-rasm.

2.4-rasmda stator ( $a$ ) va rotor ( $x$ ) chulg'amining asosiy garmonikalarning tashkil etuvchilari tasvirlangan ( $g$  burchak rotorning holatini aniqlaydi. Agar ko'rilayotgan chulg'amlar garmonikalari orasidagi burchak  $\gamma$ ,  $t = 0$  bo'lganda  $\varphi_{ge} = p\varphi_g = 0$  bo'lsa (2.4,a-rasm), rotor aylanganda  $t = t_1$  bo'lgan vaqt bu burchak ( $\gamma + \varphi_{ge}$ ) bo'ladi (2.4,b-rasm).

(2.28) tenglamaga asosan chulg'amlarning o'zaro induktivligi quyidagicha yoziladi:

$$L_{axv} = L_{(axv)m} \cos v(\varphi_{ge} + \gamma), \quad (2.30)$$



bu yerda

$$L_{(abv)m} = \mu_0 \frac{\pi r l}{\delta} N_{av} N_{xv}.$$

U holda (2.29) tenglamaga asosan moment quyidagiga teng bo'ladi:

$$M_v = i_a i_x \frac{dL_{avx}}{d\varphi_g} = i_a i_x \frac{d}{d\varphi_g} [\cos v(\varphi_g + \gamma)] = -(vp) i_a i_x L_{(avx)m} \sin v(p\varphi_g + \gamma).$$

$(\varphi_g + \gamma) = \theta$  belgilashni kiritib quyidagiga ega bo'lamiz:

$$M_v = -(vp) i_a i_x L_{(avx)m} \sin v(p\theta). \quad (2.31)$$

$\theta$  burchak chulg'amlarning ikki garmonikasi o'qlari orasidagi oniy elektr burchagi.  $\theta$  burchak momentni aniqlashda muhim rol o'ynaydi. Shu sababli bu burchak moment burchagi deyiladi.

U burchak har bir garmonika uchun har xil bo'ladi, chunki fazoviy burchaklar  $\gamma_{av}$  va  $\gamma_{xv}$  bir xil qiymatga ega emas.

«—» ishora momentning burchak  $\theta$  ni qiymatiga intilishini ko'rsatadi, ya'ni o'zaro ta'sirlashuvchi chulg'amlarni ularning o'qlari mos kelgan holatga keltirish lozim.

(2.31) tenglamaning boshqa shakli ham mavjud. Masalan, (2.30) tenglamani (2.31) tenglamaga qo'yib, ayrim o'zgartirishlardan keyin quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\begin{aligned} M_v &= -(vp)\pi r l \delta i \frac{N_{av} i_a}{\delta} \frac{\mu_0 N_{xv} i_x}{\delta} \sin(v\theta) = \\ &= -(vp)\pi r l \delta i H_{avm} B_{xvm} \sin(v\theta), \end{aligned} \quad (2.32)$$

bu yerda  $H_{avm}$ ,  $B_{xvm}$  — stator va rotor chulg'amlarining havo bo'shlig'ida sinusoida shaklida tarqalgan magnit maydonining kuchlanganlik va induksiyaning  $v$  — garmonikasining maksimal qiymati.

Yuqoridagi momentning ikki xil yozilish shakllarini solishtirib quyidagilarni aytish mumkin:

— birinchi shakli — (2.31) tenglama momenti elektr zanjiri parametrlari va o'zgaruvchilari (toklar, induktivliklar) ning funktsiyasi deb aniqlaydi;

— ikkinchi shakli esa momentni magnit maydonini xarakterlovchi parametrlar bilan bog'laydi.

Demak, (2.32) tenglama stator va rotor qutblari orasidagi o'zaro ta'sir kuchini ko'rsatadi.

(2.32) tenglamani boshqacha ko'rinishda yozamiz:

$$M_v = -(vp)\pi r l \delta i H_{avm} B_{xvm} \sin(v\theta). \quad (2.33)$$

Har qanday holda ham burchak  $\theta$  ikkita magnit maydon o'qlari orasidagi fazoviy burchak hisoblanadi.

Moment tenglamasining uchinchi shaklini magnit oqim orqali ham yozish mumkin.

$$\begin{aligned}\Phi &= \int_s B_v ds = \int_s \int B_v r dz d\varphi = rl \int_0^{\pi/pv} B_\delta N_v \sin v\varphi_e d\varphi = \\ &= rl \int_0^{\pi/pv} B_{vm} \sin(vp\varphi) d\varphi = \frac{2}{vp} rl B_{vm}\end{aligned}\quad (2.34)$$

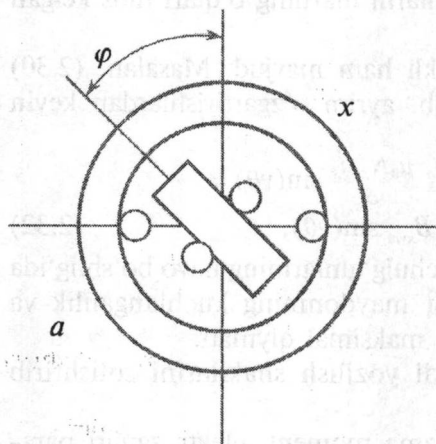
U holda

$$M_v = -\frac{\pi}{2} (vp)^2 \Phi_v F_{vm} \sin(v\theta), \quad (2.35)$$

bu yerda  $F_{vm} = \delta H_{vm} = \delta(\frac{i}{\delta} N_v)$  – havo bo'shlig'idagi maksimal magnit yurituvchi kuch (MYuK).

Moment tenglamasini yana bir shakli mavjud

$$M_v = -\frac{\pi}{2} (vp)^2 N_v \Phi_v i \sin(v\theta) = -c_{mv} \Phi_v i \sin(v\theta). \quad (2.36)$$



2.5-rasm

**2. Ayon qutbli mashina.** Ayon qutbli sinxron mashinaning fizik modeli 2.5-rasmda ko'rsatilgan.

Ma'lumki momentning umumiy tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega:

$$M = \frac{\partial W_m}{\partial \varphi},$$

bu yerdagi ikki konturli sistemaning magnit energiyasi  $W_m$  quyidagicha aniqlanadi:

$$W_m = \frac{1}{2} L_a i_a^2 + \frac{1}{2} L_x i_x^2 + L_{ax} i_x \rightarrow$$

Bu modelda rotorning oqim ilashimligi rotorning fazodagi holatiga bog'liq bo'lmaydi. Shu sababli moment quyidagiga teng bo'ladi:

$$M = \frac{\partial W_m}{\partial \varphi} = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L_a}{\partial \varphi} + i_a i_x \frac{\partial L}{\partial \varphi} = M^{11} + M^1 \quad (2.37)$$

«a» chulg'amning induktivligi rotor burilish burchagining funktsiyasi hisoblanadi, chunki bu chulg'amning oqim ilashimligi havo bo'shlig'ining qiymatiga bog'liq bo'ladi.

Sodda bo'lishi uchun keyingi tahlil garmonik chulg'am funktsiyasiga asoslangan holda amalga oshiriladi.  $\varphi_g$  fazoviy burchak (2.5-rasm)

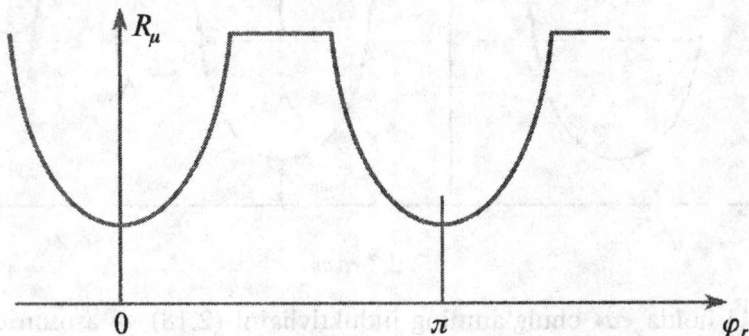
rotorning holatini aniqlaydi va umumiy holda ( $\varphi_{ge} + \gamma$ ) elektr burchak ko'rinishiga ega bo'ladi.  $\gamma$  — chulg'am funktsiyasi asosiy garmonikalar o'qlari orasidagi boshlang'ich burchak ( $t=0$ ),  $\varphi_{ge}$  — fazoviy burchakning vaqt bo'yicha o'zgarishi.

(2.28) tenglamaga asosan ko'rilyotgan chulg'amlar orasidagi o'zaro induktivligi quyidagicha aniqlanadi:

$$L_{ax} = L_{(ax)m} \cdot \cos(p\varphi_g + \gamma) \quad (2.38)$$

bu yerda  $L_{(ax)m} = \mu_0 \frac{\pi r l}{\delta} N_a N_x$ .

Rotorning burilishi bilan havo bo'shlig'ining qiymati o'zgaradi va natijada magnit oqim yo'lidagi qarshilik ham o'zgaradi. Bu magnit qarshilikning o'zgarishi 2.6-rasmda ko'rsatilgan.



2.6-rasm

Magnit qarshilik quyidagicha aniqlanadi:

$$R_m(\varphi_g) = \frac{\delta(\varphi_g)}{\mu_0 S}, \quad (2.39, a)$$

bundan havo bo'shlig'ining o'tkazuvchanligini topish mumkin:

$$\Lambda_m(\varphi_g) = \frac{1}{R_m(\varphi_g)} = \mu_0 \frac{S}{\delta(\varphi_g)}. \quad (2.39, b)$$

Elektr mashinalarida magnit oqim magnit o'tkazgichda yig'ilgan bo'ladi, shu sababli maydoni  $\pi r l / p$  ga teng bo'lgan qutb bo'linmasi oqimning magnit o'tkazuvchanligini aniqlashi mumkin.

$$\Lambda_m(\varphi_g) = \mu_0 \frac{r l}{\delta(\varphi_g)} \cdot \frac{\pi}{p}. \quad (2.40)$$

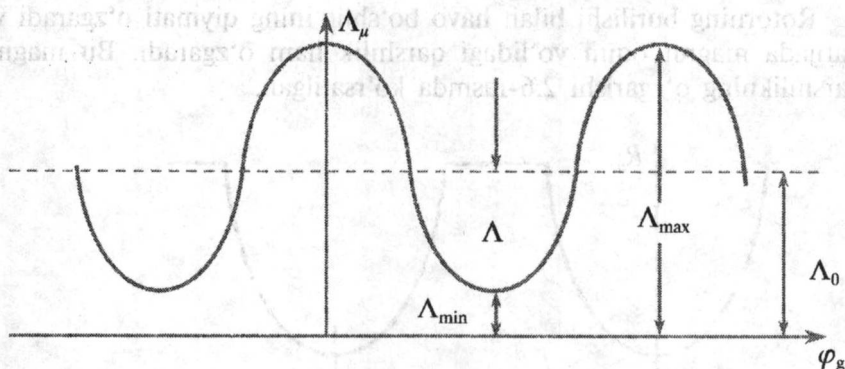
$\Lambda_m(\varphi_g)$  ni Fyurje qatori ko‘rinishda tasavvur etib va qatorning faqat ikkita birinchi tashkil etuvchilari bilan cheklanib quyidagicha yozish mumkin:

$$\Lambda_m(\varphi_g) \approx \Lambda_0 + \Lambda \cos 2p\varphi_g. \quad (2.41)$$

Bu yerda

$$\Lambda_0 = \frac{\Lambda_{\max} + \Lambda_{\min}}{2}; \quad \Lambda = \frac{\Lambda_{\max} - \Lambda_{\min}}{2}.$$

(2.41.) tenglamani grafik o‘zgarishi 2.7-rasmda ko‘rsatilgan.



2.7-rasm.

U holda «a» chulg‘amning induktivligini (2.18) ga asosan quyidagicha yozish mumkin:

$$L_a = \mu_0 r \ell \int_0^{2\pi} \frac{[N_a \cos(p\varphi_g + \gamma)]^2}{\delta(\varphi_g)} \cdot d\varphi_g,$$

yoki (2.40) va (2.41) ni hisobga olganda esa

$$\begin{aligned} L_a &= \int_0^{2\pi} \frac{p}{\pi} \Lambda_m(\varphi) [N_a \cos(p\varphi_g + \gamma)]^2 \cdot d\varphi_g = p \Lambda_0 N_a^2 + p \frac{\Lambda}{2} N_a^2 \cos 2\gamma = \\ &= p N_a^2 (\Lambda_0 + \frac{\Lambda}{2} \cos 2\gamma) \end{aligned} \quad (2.42)$$

U holda  $t=0$  vaqt uchun (2.37), (2.38) va (2.42) tenglamalarga asosan sinus chulg‘amlar asosiy garmonikalarining o‘qlari  $\gamma$  burchakka siljiganda momentning quyidagi tenglamasiga ega bo‘lamiz:

$$\begin{aligned} M &= i_a i_x \frac{\partial L}{\partial \gamma} + \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L_a}{\partial \gamma} = \\ &= - \left[ p \mu_0 \frac{\pi r \ell}{\delta} i_a i_x \cdot N_a N_x \sin \gamma + p i_a^2 \frac{N_a}{4} (\Lambda_{\max} - \Lambda_{\min}) \sin 2\gamma \right]. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Shunday qilib, moment ikki tashkil etuvchidan iborat ekan:

— ulardan biri ikki kontur toklariga bog'liq bo'lib, tuzilishi bo'yicha (2.31) tenglamadan farq qilmaydi;

— ikkinchi tashkil etuvchi esa, rotorda qo'zg'atish bo'lmaganda hosil bo'ladi va faqat stator tokiga bog'lik bo'ladi.

Bu tashkil etuvchi ayon qutbli rotorning perpendikulyar bo'lgan o'qlari bo'yicha hosil bo'lgan magnit oqimlar o'tkazuvchanliklari farqiga ham bog'lik bo'ladi. Bu farq qancha katta bo'lsa, ikkinchi tashkil etuvchi ham katta qiymatga ega bo'ladi.

## 2.5. Chulg'amlar hosil qilgan magnit maydonlar

**1. Bir fazali chulg'am.** Sinus chulg'ami hosil qilgan magnit maydonining induktsiyasini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$B(\varphi) = \mu_0 \frac{i}{\delta} N \cos(\varphi + \gamma).$$

Agarda chulg'amda  $i = I_m \cos \omega t$  tok oqayotgan bo'lsa, u holda

$$B(\varphi) = \mu_0 \frac{I_m}{\delta} N \cos \omega t \cdot \cos(\varphi + \gamma) = B_m \cos \omega t \cdot \cos(\varphi + \gamma) \quad (2.44)$$

bo'ladi.

Shunday qilib, magnit maydon vaqt va fazoviy koordinatalarning funktsiyasi hisoblanadi.

Ma'lum trigonometrik bog'lanishlardan foydalanib o'zgaruvchan tok oqayotgan bitta sinus chulg'ami hosil qilgan magnit maydonini quyidagicha talqin qilish mumkin:

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)].$$

(2.44) tenglama uchun quyidagicha ega bo'lamiz

$$B(\varphi_1 t) = \frac{B_m}{2} [\cos(\omega t - (\varphi + \gamma)) + \cos(\omega t + (\varphi + \gamma))]. \quad (2.45, a)$$

Maydonning alohida tashkil etuvchilarini quyidagicha belgilaymiz:

$$\begin{cases} B_{\text{tug}}(\varphi_1 t) = (B_m / 2) \cdot \cos[\omega t - (\varphi + \gamma)] \\ B_{\text{tes}}(\varphi_1 t) = (B_m / 2) \cdot \cos[\omega t + (\varphi + \gamma)] \end{cases} \quad (2.45, b)$$

(2.45, b) dan induktsiya qiymati doimiy bo'lgan qandaydir ikkita nuqtani kuzatayotgan bo'lsak, u holda quyidagi tenglamalar to'g'ri bo'ladi



$$\begin{cases} \cos[\omega t - (\varphi + \gamma)] = \text{const} \\ \cos[\omega t + (\varphi + \gamma)] = \text{const} \end{cases}$$

bundan

$$\begin{cases} \omega t - \varphi - \gamma = \text{const} \\ \omega t + \varphi + \gamma = \text{const} \end{cases} \quad (2.46,a)$$

Bu tenglamani  $t$  bo'yicha differensiyallab quyidagiga ega bo'lamiz:

$$d\varphi/dt = \omega; \quad d\varphi/dt = -\omega; \quad (2.46,b)$$

(2.46,b) ga asosan (2.45,a) tenglamaning o'ng tomonidagi birinchi tashkil etuvchi to'g'ri to'lqinni ( $d\varphi/dt > 0$ ) ifodalaydi, ya'ni  $\varphi$  burchakning musbat qiymatlari tomonga aylanuvchi to'lqin, ikkinchi tashkil etuvchi esa teskari aylanuvchi to'lqinni ( $d\varphi/dt < 0$ ) ifodalaydi.

(2.46,a) shu narsani ko'rsatadiki, tokning bir davrda o'zgarishi ( $\omega t 2\pi$  ga o'zgaradi), maydon ham  $2\pi$  burchakka (elektr radianga) buriladi. Shu sababli maydonning burchak tezligi  $\Omega$  tarmoqning siklik chastotasi  $\omega$  ga teng:

$$\Omega = \omega = 2\pi f \quad (2.47)$$

Ikkinchi tomondan maydonning aylanish burchak tezligi burchakning mexanik birliklarida quyidagiga teng:

$$\Omega_{MX} = \frac{\omega}{P} = \frac{2\pi f}{P} \quad (2.48)$$

$\Omega_{MX} = 2\pi n$  ni hisobga olib

$$n = f/P \quad (2.49)$$

ega bo'lamiz.

Maydon  $v$  – garmonikasining induktsiyasi quyidagi ko'rinishga ega yoki

$$B_v(\varphi, t) = \frac{B_{ym}}{2} [\cos(\omega t - v(\varphi + \gamma)) + \cos(\omega t + v(\varphi + \gamma))] \quad (2.51)$$

Maydon  $v$  – garmonikasining aylanish burchak tezligi quyidagicha aniqlanadi.

$$\Omega_v = \frac{\omega}{v}; \quad \Omega_{MXv} = \frac{\omega}{vp}. \quad (2.52)$$

**2. Ko'p fazali chulg'am.** Fazoda ikki yoki undan ko'p bir fazali chulg'amlarni teskari maydonni kompensatsiya qiladigan shaklda joylashtirib, bitta aylanuvchi maydonni hosil qilish mumkin.

Buni hal qilishning sodda yo'li ikki fazali simmetrik chulg'am qo'llashdir. Bunday chulg'am ikkita chulg'amdan iborat bo'lib, ularning magnit o'qlari bir-biriga perpendikulyar yo'nalgan va toklar faza bo'yicha  $\pi/2$  burchakka siljigan bo'ladi. Shunday qilib qo'shimcha chulg'am quyidagi tenglama bilan ifodalanuvchi magnit maydonni hosil qiladi:

$$\begin{aligned} B^1(\varphi, t) &= B_m^1 \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \cos(\varphi + \gamma - \frac{\pi}{2}) = \\ &= B_m^1 \sin \omega t \cdot \sin(\varphi + \gamma) \end{aligned} \quad (2.53, a).$$

$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$ , trigonometrik tenglamani qo'llab (2.53, a) tenglamani quyidagicha yozamiz:

$$B^1(\varphi, t) = \frac{B_m^1}{2} [\cos(\omega t - (\varphi + \gamma)) + \cos(\omega t + (\varphi + \gamma))]. \quad (2.53, b)$$

Bunday ikkita bir fazali chulg'amlarning yig'indi magnit maydoni quyidagicha aniqlanadi

$$B_p(\varphi, t) = v(\varphi, t) + v^1(\varphi, t)$$

(2.45, a) va (2.53, b) tenglamalardan  $N^1 = N$  bo'lganda chulg'amlarning teskari aylanuvchi maydonlari teng va teskari yo'nalganligi yaqqol ko'rinadi.

Shu sababli yig'indi magnit maydoni quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$B_p(\varphi, t) = B_m \cos[\omega t - (\varphi + \gamma)]. \quad (2.54)$$

Uch fazali chulg'am ham aylanuvchi magnit maydonini hosil qiladi (soddalashtirish uchun  $\gamma = 0$  deb qabul qilamiz):

$$\begin{cases} B_A(\varphi, t) = B_m \cos \omega t \cdot \cos \varphi = (B_m / 2) [\cos(\omega t - \varphi) + \cos(\omega t + \varphi)] \\ B_B(\varphi, t) = B_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \cdot \cos(\varphi - \frac{2\pi}{3}) = (B_m / 2) [\cos(\omega t - \varphi) + \cos(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3})] \\ B_C(\varphi, t) = B_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \cdot \cos(\varphi + \frac{2\pi}{3}) = (B_m / 2) [\cos(\omega t - \varphi) + \cos(\omega t + \varphi + \frac{4\pi}{3})] \end{cases} \quad (2.55)$$

Yig'indi maydon quyidagiga teng:

$$B(\varphi, t) = B_A(\varphi, t) + B_B(\varphi, t) + B_C(\varphi, t) = \frac{3}{2} B_m \cos(\omega t - \varphi) \quad (2.56, a)$$

$m$  fazali simmetrik chulg'am uchun yig'indi maydon quyidagicha aniqlanadi:

$$B(\varphi, t) = \frac{m}{2} B_m \cos(\omega t - \varphi) \quad (2.56, b)$$

Masalan, ikki fazali simmetrik chulg'am hosil qilgan magnit maydonning 3-garmonikasi bo'lganda

$$B_A(\varphi, t) = B_m \cos \omega t (N_1 \cos \varphi + N_3 \cos 3\varphi)$$

$$\begin{aligned} B_B(\varphi, t) &= B_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \left[ N_1 \cos(\varphi - \frac{\pi}{2}) + N_3 \cos 3(\varphi - \frac{\pi}{2}) \right] = \\ &= B_m \sin \omega t (N_1 \sin \varphi - N_3 \sin \varphi) \end{aligned} \quad (2.57)$$

Uning yig'indi maydoni

$$\begin{aligned} B(\varphi, t) &= B_A(\varphi, t) + B_B(\varphi, t) = \\ &= B_m [N_1 \cos(\omega t - \varphi) + N_3 \cos(\omega t + 3\varphi)] \end{aligned} \quad (2.58)$$

tenglama bilan ifodalanadi.

## 2.6. Chulg'amning elektr yurituvchi kuchi (EYuK)

Har qanday chulg'amning elektr muvozanat tenglamasi Kirxgofning ikkinchi qonuni bilan aniqlanadi. Masalan, «a» chulg'ami uchun:

$$U_a + e_a = r_a i_a,$$

bu yerda  $e_a$  Faradey qonuniga asosan chulg'amning to'la oqim ilashimligi orqali aniqlanadi.

$$\psi_a = L_a \cdot i_a + L_{a\theta} \cdot i_\theta + L_{ac} \cdot i_c + \dots + L_{ax}(\varphi_r) \cdot i_x + L_{ay}(\varphi_r) \cdot i_y + \dots \quad (2.59)$$

Bu tenglamada ayrim o'zaro induktivliklar rotorning burchak holatiga ( $\varphi_g$ ) bog'liq bo'ladi. Bularga havo bo'shlig'ining turli tomonlarida joylashgan chulg'amlarning o'zaro induktivliklari kiradi.

$\varphi_g$  bog'liq bo'lgan oqim ilashimligining tashkil etuvchilari quyidagicha aniqlanadi

$$L_a \frac{di_a}{dt} + L_{a\theta} \frac{di_\theta}{dt} + \dots \quad (2.60)$$

$\varphi_g$  ga bog'liq bo'lgan EYuK quyidagicha aniqlanadi

$$L_{ax}(\varphi_G) \frac{di_x}{dt} + i_x \frac{\partial L_{ax}(\varphi_G)}{\partial \varphi_G} \cdot \frac{\partial \varphi_G}{\partial t} + \dots \quad (2.61)$$

Bu yerdagi birinchi tashkil etuvchi o'zaro induksiya EYuK ni ifodalaydi. Ikkinchi tashkil etuvchi esa energiyani o'zgartirish jarayoni bilan bog'liq bo'lgan EYuK.

Ana shu EYuK ni tadqiq etishda sinus chulg'ami tushunchasidan foydalanamiz.

«a» va «x» chulg'amlariga tegishli bo'lgan sinus chulg'amlari  $v$  – garmonikalarining aylanuvchi EYuK quyidagiga teng:

$$\begin{aligned} e_a &= i_x \frac{dL_{axv}(\varphi_G)}{dt} = i_x \frac{d}{dt} [L_{(axv)m} \cdot \cos v(p \cdot \varphi_G + \gamma)] = \\ &= i_x (vp) L_{(axv)m} \cdot \sin v(\varphi_G + \gamma) \cdot \frac{d\varphi_G}{dt} \end{aligned} \quad (2.62,a)$$

Rotorning aylanish chastotasi o'zgarmas bo'lgan hol uchun:

$$\varphi_{Ge} = p\varphi_G = \omega_G \cdot t$$

U holda (2.62,a) tenglama quyidagi ko'rinishni egallaydi:

$$e_a = -i_x \cdot v\omega_G L_{(axv)m} \cdot \sin v(\omega_1 t + \gamma) \quad (2.62,b)$$

Agar tok  $i_x = \text{const}$  bo'lsa, u holda EYuK ning vaqt bo'yicha o'zgarishi sinusoida shaklida bo'ladi va uning ta'sir etuvchi qiymati quyidagiga teng:

$$E_a = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot I_x \cdot v \cdot \omega_G \cdot L_{(axv)m} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_v \cdot I_x \cdot L_{(axv)m} \quad (2.63,a)$$

bu yerda  $f_v = v \Omega f$ .

(2.63,a) tenglamaga  $L_{(axv)m}$  ning qiymatini qo'yib, EYuK ning boshqacha shaklini yozish mumkin:

$$E_a = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot (v \cdot p) \cdot f_v \cdot N_{av} \cdot \Phi_{vm} \quad (2.63,b)$$

bu yerda  $\Phi_{vm}$  – bir qutbdagi oqim  $v$ -garmonikasining amplitudasi.

To'g'ri burchakli to'lqin  $v$ -garmonikasining Furye qatori bo'yicha garmonik tahlili quyidagi amplituda qiymatini beradi:

$$N_{av} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{W}{2P} \cdot \frac{1}{v}. \quad (2.64)$$

U holda (2.63,b) tenglama quyidagi ko'rinishni egallaydi

$$E_a = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot (v \cdot p) \cdot f_v \cdot \frac{4W}{2\pi \cdot v \cdot p} \cdot \Phi_{vm} = \sqrt{2} \pi f_v W \Phi_{vm}. \quad (2.65)$$

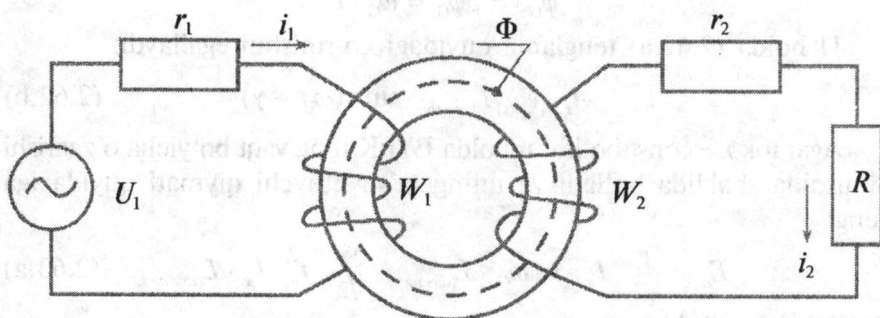
## 2.7. Havo bo'shlig'idagi maydonning chulg'am kuchlanishiga bog'liqligi

Aylanuvchi maydonni ko'rib chiqishda chulg'am toklarini vaqtning funksiyasi deb masalani qulay holga keldirgan edik.

Ammo elektr mashinalarining ko'pchiligida stator chulg'amidan tashqari rotorida ham chulg'am bo'ladi va undan ham tok oqadi. Bu maydonni toklar orqali aniqlashni murakkablashtiradi.

Shu sababli berilgan funktsiya deb chulg'am toklarini emas, balki kuchlanishni hisoblash lozim. Havo bo'shlig'idagi magnit maydon va chulg'am kuchlanishi orasidagi bog'liqlikni ko'rib chiqqanimizda, kuchlanish maydonni aniqlashda muhim parametr ekanligi yaqqol ko'rinadi.

Magnit maydoni pulslanuvchi ikki chulg'amli toroidal shakldagi o'zakni ko'rib chiqamiz (2.8-rasm).



2.8-rasm

Tarqoq oqimni hisobga olmagan holda birlamchi va ikkilamchi zanjirlar uchun quyidagi tenglamalarni yozamiz:

$$\begin{cases} U_1 = r_1 i_1 + W_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ 0 = (r_2 + R) i_2 + W_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{cases}$$

bu yerda  $R$  – yuklamaning qarshiligi.

Agarda  $r_1 i_1 \ll W_1 \frac{d\Phi}{dt}$  va kuchlanish  $U_1$  berilgan bo'lsa, u holda oqimni taxminan topish mumkin. Masalan, birinchi zanjir uchun quyidagiga ega bo'lamiz

$$U_1 \approx W_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.66)$$

Demak, aktiv qarshilik va tarqoq oqimni hisobga olmaganda berilgan kuchlanish o'zakdagi oqimni aniqlaydi.

Agarda kuchlanish

$$U = \sqrt{2}U \cos \omega t,$$

bo'lsa, u holda (2.66) tenglamaning oqimga nisbatan yechimi quyidagicha bo'ladi:

$$\Psi \approx \frac{\sqrt{2}U}{\omega W} \sin \omega t = \Phi_m \sin \omega t. \quad (2.67)$$

Shunday qilib, kuchlanishning ta'sir etuvchi qiymati va oqimning amplituda qiymati orasida quyidagi oddiy bog'lanish mavjud:

$$U \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \omega W \Phi_m = \sqrt{2} \pi f W \Phi_m = 4,44 f W \Phi_m. \quad (2.68)$$

Endi kuchlanish va aylanuvchi magnit maydon orasidagi bog'liqlikni ko'rib chiqamiz.

Agarda chulg'amning aktiv qarshiligi va tarqoq oqimni hisobga olmasak, har bir chulg'am uchun quyidagi tenglamalarni yozish mumkin:

$$\begin{cases} U_a \approx d\Psi_a / dt \\ U_b \approx d\Psi_b / dt \end{cases} \quad (2.69)$$

Ikki fazali simmetrik mashinaning chulg'amlarida quyidagi toklar oqadi

$$\begin{cases} i_a = I_m \cos \omega t \\ i_b = I_m \sin \omega t \end{cases}$$

(2.54) tenglamaga asosan magnit maydoni asosiy garmonikasining induksiyasi quyidagiga teng

$$B(\varphi, t) = \mu_0 \frac{I_m}{\delta} N \cos[\omega t - (\varphi + \gamma)] = B_m \cos[\omega t - (\varphi + \gamma)]$$

Har qanday chulg'amning oqim ilashimligi (2.12) tenglamaga asosan aniqlanadi



$$\Psi = r\ell \int_0^{2\pi} N_\varphi(\varphi) \cdot B(\varphi) d\varphi.$$

Masalan, «a» chulg'am uchun

$$\Psi = r\ell \int_0^{2\pi} N_a \cos(\varphi + \gamma) \cdot B_m \cos[\omega t - (\varphi + \gamma)] d\varphi = \pi r\ell N_a B_m \cos \omega t.$$

Bu chulg'amda hosil bo'lgan EYuK quyidagiga teng:

$$e_a = \frac{d\Psi_a}{dt} = -\pi r\ell N_a B_m \omega \sin \omega t. \quad (2.70,a)$$

Xuddi shuningdek «v» chulg'ami uchun

$$e_v = -\pi r\ell N_v B_m \omega \sin \omega t. \quad (2.70,b)$$

Agarda chulg'amlarga quyidagi kuchlanishlar berilgan bo'lsa

$$\begin{cases} U_a = -\sqrt{2}U \sin \omega t \\ U_v = -\sqrt{2}U \cos \omega t \end{cases}, \quad (2.71)$$

u holda (2.69), (2.70) va (2.71) tenglamalarga asosan kuchlanishning ta'sir etuvchi qiymati va aylanuvchi magnit maydon induktsiyasi amplituda qiymati orasida quyidagi bog'liqlik mavjud

$$\sqrt{2}U \approx \pi r\ell N \omega B_m \text{ ya'ni } U \approx \frac{\pi r\ell N \omega}{\sqrt{2}} B_m \quad (2.72)$$

Asosiy sinus chulg'ami hosil qilgan bitta qutbga to'g'ri keluvchi oqim quyidagiga teng:

$$\begin{aligned} \Psi &= r\ell \int B_m \cos(\omega t - \varphi_e) d\varphi = r\ell \int_0^{\pi/p} B_m \cos(\omega t - p\varphi) d\varphi = \\ &= \frac{2}{p} r\ell B_m \sin \omega t. \end{aligned} \quad (2.73)$$

(2.73) tenglamani hisobga olgan holda (2.72) tenglamani quyidagi ko'rinishda yozish mumkin

$$U \approx \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot P \omega N \Phi_m = \sqrt{2} \pi f \left( \frac{\pi}{2} \cdot PN \right) \cdot \Phi_m.$$

## **Nazorat savollari**

1. Elektr mashinalarining fizik modellari to'g'risida ma'lumot bering.
2. Real elektr mashinasini ideal mashina deb qarashdagi asosiy shartlarni (soddalashtirishni) sanab bering.
3. Chulg'amning chulg'am funksiyasi nima?
4. Sinus chulg'ami deganda qanday chulg'am tushiniladi?
5. Qanday chulg'amga asosiy chulg'am deyiladi?
6. Chulg'amning induktivligi va o'zaro induktivligi deganda nimani tushinasiz?
7. Ikki chulg'amning o'zaro induktivligi nimaga bog'liq?
8. Ayon qutbli mashina momentining fizik ma'nosini tushintirib bering.
9. Noayon qutbli mashina momentining formulasini yozing.
10. Aylanuvchi magnit maydoni hosil qilgan EYuK ning tenglamasini yozing.

### III bob. ELEKTR MASHINASINING UMUMLASHGAN MODELI

#### 3.1. Umumiy tushuncha

Elektr mashinalarining turli xilda bo'lishiga qaramasdan ularning ishlashi o'tkazgichning magnit maydonidagi harakatiga asoslangan. Bu elektr mashinalari uchun umumlashgan nazariyani yaratish imkoniyatini beradi.

Elektr mashinalarining umumlashgan nazariyasi real elektr mashinasini ikki fazali ikki qutbli stator va rotorda ortogonal chulg'amlari bo'lgan mashinaga almashtirish mumkin.

Bunday almashtirish asosida quyidagilar yotadi:

1. Ikkita ortogonal chulg'amlar yordamida statsionar, pulslanuvchi va aylanuvchi magnit maydonlarini hosil qilish mumkin.

2. Ortogonal chulg'amlarni shunday tanlash mumkinki, bunda real chulg'amlar hosil qiladigan elektromagnit momentni hosil qilish mumkin.

3. 1-rasmda tok oqayotgan to'g'ri burchakli g'altak  $d$  va  $q$  koordinata o'qlarida ko'rsatilgan.

Magnit maydon  $q$  o'qi bo'yicha yo'nalgan va tokli g'altak o'qi  $d$  o'qqa  $\gamma$  burchakka siljigan. G'altak  $F = iw$  MYuK ni hosil qiladi. G'altakning  $\ell$  uzunlikka ega bo'lgan tomonlariga  $f = B_q \ell (i \cdot w)$  kuch ta'sir qiladi.

Bu kuch esa quyidagi elektromagnit momentni hosil qiladi

$$m = 2r(B_q i \ell) = \Phi_q \cdot F_d, \quad (3.1)$$

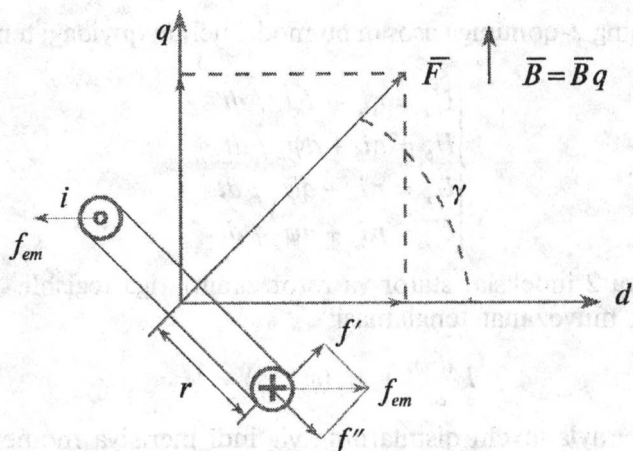
bu yerda  $\Phi_q$  —  $q$  o'qi bo'yicha magnit oqimning maksimal qiymati;  
 $F_d$  —  $d$  o'qi bo'yicha g'altak MYuK ning tashkil etuvchisi.

Magnit maydonning ixtiyoriy yo'nalishi uchun quyidagiga ega bo'lamiz:

$$m = \Phi_q \cdot F_d - \Phi_d \cdot F_q. \quad (3.2,a)$$

Bu tenglamani boshqacha ko'rinishda ham yozish mumkin

$$m = \Psi_q \cdot i_d - \Psi_d \cdot i_q \quad (3.2,b)$$



3.1-rasm.

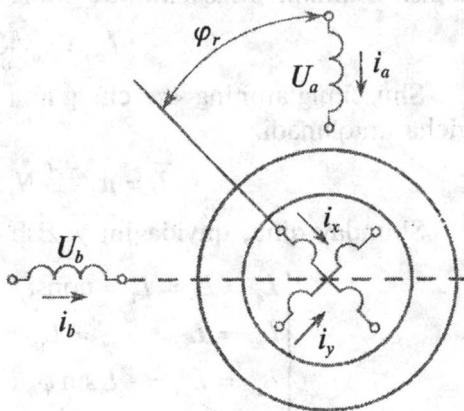
bu yerda  $i_d = i \cdot \cos \gamma$ ;  $i_q = i \cdot \sin \gamma$ ;  $\Psi_d = w \Phi_d$ ;  $\Psi_q = w \Phi_q$ .

Shunday qilib, stator va rotorda ikkitadan ortogonal chulq'amlari bo'lgan mashinaning modeli har qanday real mashinaning elektromagnit momenti va magnit maydonini modellashtirish imkonini berar ekan.

### 3.2. Elektr mashinasining umumlashgan modeli (Vudson va Uayt modeli)

3.2- rasmda ikki qutbli ikki fazali elektr mashinasining printsiptial sxemasi ko'rsatilgan.

Keyingi tahlillarda qabul qilingan shartlar: havo bo'shlig'i bir xil; gisterezis isrofi va uyurma toklari hosil qilgan isroflar yo'q deb qabul qilinadi; po'latning magnit singdiruvchanligi havoning magnit singdiruvchanligiga qaraganda juda katta; stator va rotorning ikki fazali chulq'amlari simmetrik va fazoda sinusoida shaklida joylashtirilgan.



3.2-rasm.

Kirxgofning 2-qonuniga asosan bu model uchun quyidagi tenglamani yozamiz:

$$\begin{cases} U_a = r_1 i_a + d\psi_a / dt \\ U_b = r_1 i_b + d\psi_b / dt \\ U_x = r_2 i_x + d\psi_x / dt \\ U_y = r_2 i_y + d\psi_y / dt \end{cases}$$

bu yerda 1 va 2 indekslar stator va rotor zanjirlariga tegishli.

Mexanik muvozanat tenglamasi:

$$I \frac{d^2 \varphi_r}{dt^2} + M_2(\varphi_r, \frac{\varphi_r}{dt}) = M \quad (3.3, b)$$

bu yerda  $I$  – aylanuvchi qismlarning yig'indi inertsia momenti;

$M_2(\varphi_r, d\varphi/dt)$  – yuklama momenti;

$M$  – elektromagnit moment.

Chulg'amlar toki va induktivliklari orqali oqim ilashimligini aniq-laymiz.

$$\begin{cases} \Psi_a = L_a i_a + L_{ab} i_b + L_{ax} i_x + L_{ay} i_y \\ \Psi_b = L_{ba} i_a + L_b i_b + L_{bx} i_x + L_{by} i_y \\ \Psi_x = L_{xa} i_a + L_{xb} i_b + L_x i_x + L_{xy} i_y \\ \Psi_y = L_{ya} i_a + L_{yb} i_b + L_{yx} i_x + L_y i_y \end{cases}$$

Chulg'am funksiyasi ma'lum bo'lsa chulg'amlarning induktivligini topish mumkin. Masalan, «a» chulg'amning induktivligi:

$$L_a = \mu_0 \frac{\pi r l}{\delta} N_1^2.$$

Shu chulg'amning «x» chulg'ami bilan o'zaro induktivligi quyida-gicha aniqlanadi.

$$L = \mu_0 \frac{\pi r l}{\delta} N_1 N_2 \cos \varphi_r.$$

Shunday qilib, quyidagini yozish mumkin:

$$\begin{cases} L_a = L_b = L_1 = \text{const}; \quad L_x = L_y = L_2 = \text{const} \\ L_{ax} = L_{xa} = L_{by} = L_{yb} = L \cos \varphi_r \\ L_{ay} = L_{ya} = -L \sin \varphi_n : \quad L_{bx} = L_{xb} = L \sin \varphi_r \\ L_{ab} = L_{ba} = L_{xy} = L_{yx} = 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

Bu tenglamani (3.4) va (3.3,a) tenglamalariga qo'yib modelning elektr zanjiri uchun quyidagi mexanik muvozanat tenglamasiga ega bo'lamiz:

$$\begin{cases} U_a = r_1 i_a + L_1 \frac{di_a}{dt} + L \frac{d}{dt} (i_x \cos \varphi_r) - L \frac{d}{dt} (i_y \sin \varphi_r) \\ U_b = r_1 i_b + L_1 \frac{di_b}{dt} + L \frac{d}{dt} (i_x \sin \varphi_r) + L \frac{d}{dt} (i_y \cos \varphi_r) \\ U_x = L_1 \frac{d}{dt} (i_a \cos \varphi_r) + L \frac{d}{dt} (i_b \sin \varphi_r) + L_2 \frac{di_x}{dt} + r_2 i_x \\ U_y = L_1 \frac{d}{dt} (i_a \sin \varphi_r) + L \frac{d}{dt} (i_b \cos \varphi_r) + L_2 \frac{di_y}{dt} + r_2 i_y \end{cases} \quad (3.6)$$

(3.5) tenglamadagi ayrim o'zaro induktivliklar  $\varphi_g$  bog'liq bo'lganligini hisobga olib, moment tenglamasini quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$M = \frac{dW_m}{d\varphi_g} = i_a i_x \frac{dL_{ax}}{d\varphi_r} + i_a i_y \frac{dL_{ay}}{d\varphi_r} + i_b i_x \frac{dL_{bx}}{d\varphi_r} + i_b i_y \frac{dL_{by}}{d\varphi_r}. \quad (3.7)$$

Geometrik va elektr burchaklar orasidagi bog'liqlik quyidagicha bo'ladi:

$$\varphi_e = p\varphi_g.$$

(3.7) tenglamaga (3.5) tenglamadagi o'zaro induktivlikni qo'yib, differentsiallashtirishni amalga oshirib quyidagiga ega bo'lamiz:

$$M = pL [(i_b i_x - i_a i_y) \cos \varphi_{ge} - (i_a i_x - i_b i_y) \sin \varphi_{ge}] \quad (3.7,b)$$

U holda mexanik muvozanat tenglamasi quyidagiga teng bo'ladi.

$$\frac{I}{p} \frac{d^2 \varphi_{ge}}{dt^2} + M_2 = L [(i_b i_x - i_a i_y) \cos \varphi_{ge} - (i_a i_x - i_b i_y) \sin \varphi_{ge}] = \frac{M}{p}. \quad (3.8)$$

(3.6) va (3.8) tenglamalar nochiziqli bo'lganligi sababli, umumiy yechimni topish juda qiyin bo'ladi.



### 3.3. Elektr mashinalarining asosiy turkumlari

(3.7,b) moment tenglamasidagi  $\varphi_{ge}$  burchakni (2.30) tenglama singari quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$\varphi_g = \omega_r t + \gamma_1, \quad (3.9)$$

bu yerda  $\varphi_g, \gamma - t = 0$  bo'lgan vaqtda chulg'amlar o'qlari orasidagi burchak (bizning holda «a» va «x» chulg'amlar o'qlari orasidagi burchak).

Energiyaning o'zgarishi uchun momentning o'rtacha qiymati noldan farq qilishi lozim.

$$\mu_{o'rt} = \int_0^T M dt \neq 0. \quad (3.10)$$

(3.7,b) tenglamadan shu narsa ma'lum bo'ladiki,  $i_1 i_2 \cos(\omega_r t + \gamma)$  va  $i_1 i_2 \sin(\omega_r t + \gamma)$  larni nol qiymat bermasligi lozim.

Masalan, stator toki siklik  $\omega_1$  chastotasiga ega bo'lsin, ya'ni:

$$i_1 = I_{1m} \cos \omega_1 t, \quad (3.11,a)$$

rotor toki esa  $\omega_2$  siklik chastotaga ega, ya'ni

$$i_2 = I_{2m} \cos \omega_2 t. \quad (3.11,b)$$

U holda trigonometrik tenglamaga binoan

$$\cos \omega_1 t \cos \omega_2 t \cos \omega_r t = \cos(\omega_1 \mp \omega_2 \mp \omega_r) t \quad (3.12)$$

bo'ladi va shartda kosinusning integrali noldan farq qiladi.

$$\omega_1 \mp \omega_2 \mp \omega_r = 0 \quad (3.13)$$

Yuqoridagi shartdan quyidagi uchta hol kelib chiqadi.

1. Agar  $i_1 = I_{1m} \cos \omega_r t$  bo'lsa, u holda  $M_{o'rt} \neq 0$  bo'ladi agarda  $i_2 = \text{const}$ , ya'ni  $\omega_1 = \omega$  va  $\omega_2 = 0$  bo'lsa. Bu shartga stator chulg'ami toki burchak chastotasi  $\omega_1$  rotorning burchak aylanish chastotasi  $\omega_r$  bilan bir xil bo'lgan sinxron mashina javob beradi. Bunda rotor chulg'amida o'zgarmas tok oqadi.

2. Agar  $i_1 = \text{const}$  bo'lsa,  $M_{o'rt} \neq 0$  bo'lishini ta'minlash uchun  $i_2 = I_{2m} \cos \omega_2 t$  bo'lishi lozim. Bundan  $\omega_2 = \omega_r$  shartga ega bo'lamiz. Bu shartga o'zgarmas tok mashinasi javob beradi.

3.  $M_{o'rt} \neq 0$  bo'ladi, agarda  $\omega_2 = \omega_1 - \omega_r$  bo'lsa, ya'ni  $i_2 = I_{2m} \cos(\omega_2 - \omega_1) t$  va  $i_1 = I_{1m} \cos \omega_1 t$ . Bu shartga asinxron mashina javob beradi.

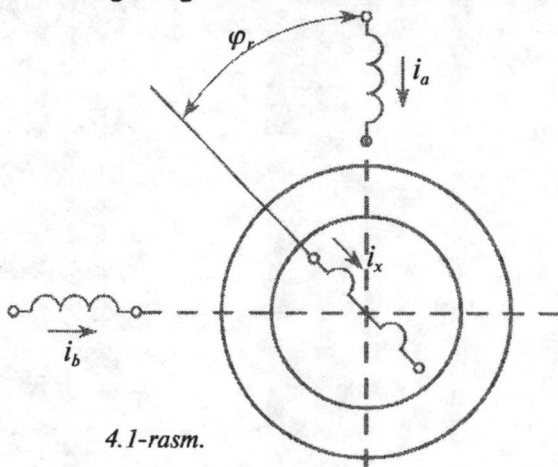
### ***Nazorat savollari***

1. Umumlashgan elektr mashinasi deb qanday mashinaga aytiladi?
2. Vudson va Uayt umumlashgan modelining elektromagnit sxemasi qanday ko'rinishga ega?
3. Umumlashgan modelni o'rganishda qanday shartlar qabul qilinadi?
4. Qanday shartlar bajarilganda model sinxron mashinasiga to'g'ri keladi?
5. Qanday shartlar bajarilganda model o'zgarmas tok mashinasiga to'g'ri keladi?
6. Qanday shartlar bajarilganda model asinxron mashinani ifodalaydi?

## IV bob. TURLI TURKUMDAGI ENERGIYANI ELEKTROMEXANIK O'ZGARTGICHLARDAGI ASOSIY BOG'LANISHLAR

### 4.1. Ko'p fazali sinxron mashina

4.1-rasmda sinxron mashinaning elementlar modeli ko'rsatilgan. Bu model statorda fazoda sinusoida shaklida tarqalgan ikki fazali simmetrik chulg'am va rotorda esa bitta fazada sinusoidal tarqalgan chulg'amdan iborat. Stator chulg'amiga ikki fazali simmetrik kuchlanish berildi.



4.1-rasm.

$$\begin{cases} U_a = \sqrt{2}U_1 \cos \omega_1 t \\ U_b = \sqrt{2}U_1 \cos(\omega_1 t - \frac{\pi}{2}) = \sqrt{2}U_1 \sin \omega_1 t \end{cases} \quad (4.1)$$

Rotor chulg'amida esa o'zgarmas tok oqadi.

$$i_x = I_x. \quad (4.2)$$

Stator magnit maydoni rotor (rotor maydoni) bilan sinxron aylangandagi rejim sinxron rejim deyiladi.

(2.32) tenglamaga asosan elektromagnit momentining asosiy garmonikasi quyidagiga teng

$$M = -p\pi r / \delta H_m B_m \sin \theta. \quad (4.3)$$

Stator va rotor magnit maydonlarinig fazoviy o'qlari mos tushganda elektromagnit moment hosil bo'ladi.

Sinxron mashinalarida magnit maydon kuchlanishi sifatida rotor chulg'am hosil qilgan  $H_m$ ,  $B_m$  sifatida esa havo bo'shlig'idagi yig'indi maydonining induktsiyasi qabul qilinadi.

Rotor maydoni va havo bo'shlig'idagi yig'indi maydon o'qlari orasidagi burchak moment burchagi hisoblanadi.

Rotor chulg'ami fazoda sinusoida shaklida tarqalganligi sababli,  $H_m$  maksimal chulg'am funktsiyasi va  $I_x/\delta$  ning ko'paytmasidan iborat bo'ladi, ya'ni:

$$H_m = \frac{I_x}{\delta} N_x. \quad (4.4)$$

Aktiv qarshilik va tarqoq oqimni hisobga olmagan holda (2.72) tenglamaga asosan quyidagiga ega bo'lamiz:

$$B_m \approx \frac{\sqrt{2}U_1}{\pi r l \omega_1 N_a}. \quad (4.5)$$

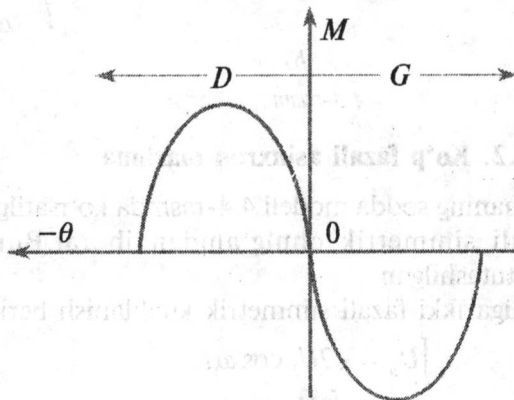
(4.4) va (4.5) tenglamalarini (4.3) tenglamaga qo'yib quyidagiga ega bo'lamiz:

$$M = -\frac{p}{\omega_1} \frac{N_x}{N_a} \sqrt{2}U_1 I_x \sin \theta \quad (4.6,a)$$

yoki

$$M = -\left(\frac{\sqrt{2}}{m_1} \frac{N_x}{N_a}\right) \frac{m_1 U_1 I_x}{\Omega_{mx}} \sin \theta \quad (4.6,b)$$

Shunday qilib, moment – kuchlanishga, qo'zg'atish tokiga va rotor maydoni hamda havo bo'shlig'idagi yig'indi maydonlar orasidagi fazoviy burchakning sinusiga to'g'ri mutanosib ekan.



4.2-rasm

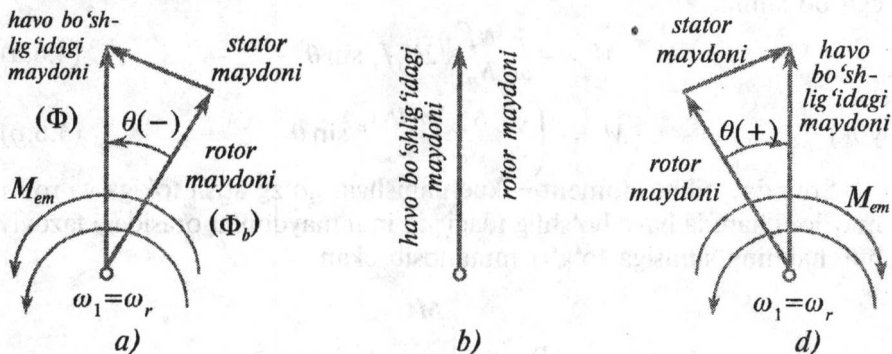
$U_1$  va  $I_x$  larni tashqaridan rostlansa, yuklamani o'zgartirish esa burchak  $\theta$  ni o'zgartirish kabi amalga oshiriladi. Momentning burchak  $\theta$  ga bog'lanishi 4.2-rasmda ko'rsatilgan.

Mashina motor rejimida ishlaganda (4.3, *a*-rasm) yig'indi moment musbat, ya'ni aylanish yo'nalishi bo'yicha ta'sir etadi. Shu sababli (4.3) tenglamada burchak  $\theta$  manfiy bo'ldi.

Salt ishlash rejimiga 4.3, *b*-rasmdagi diagramma to'g'ri keladi. Bunda mashina moment hosil qilmaydi, burchak  $\theta = 0$  bo'ladi, ya'ni havo bo'shlig'idagi maydon va rotorning maydoni o'qlari ustma ust tushadi.

Yuklamani yana kamaytirib, valga teskari yo'nalishda ta'sir etuvchi momentni hosil qilamiz. Momentning qiymati manfiy bo'ladi, ya'ni burchak  $\theta$  musbat bo'ladi. Demak, mashina generator rejimida (4.3, *d*-rasm) ishlaydi.

Real sinxron mashinada magnit maydonining garmonik tashkil etuvchilarini to'la yo'qotib bo'lmaydi, shu sababli turli garmonikalar momentning garmonik tashkil etuvchilarini hosil qiladi va momentning pulslanishiga olib keladi.



4.3-rasm.

## 4.2. Ko'p fazali asinxron mashina

Asinxron mashinaning sodda modeli 4.4-rasmda ko'rsatilgan. Stator va rotor ikki fazali simmetrik chulg'amdan iborat. Bunda rotor chulg'amlari qisqa tutashilgan.

Stator chulg'amiga ikki fazali simmetrik kuchlanish berildi:

$$\begin{cases} U_a = \sqrt{2}U_1 \cos \omega_1 t \\ U_b = \sqrt{2}U_1 \sin \omega_1 t \end{cases}$$

Rotorning sinxron aylanishi chastotasidan boshqa barcha aylanish chastotalar asinxron ish rejimiga to'g'ri keladi. Moment bizga ma'lum bo'lgan umumiy tenglamadan aniqlanadi.

$$M = -\pi r \delta H_m B_m \sin \theta.$$

Stator chulg'ami hosil qilgan aylanuvchi magnit maydoni rotorning qisqa tutashgan chulg'amida EYuK hosil qiladi va chulg'amda tok oqadi. Chulg'am

ikki fazali bo'lganligi sababli, aylanuvchi magnit maydon hosil bo'ladi. Bu maydon rotorga nisbatan rotor toki chastotasiga mutanosib ravishda aylanadi. Bu chastota rotor va havo bo'shlig'idagi maydon aylanish chastotalarining farqiga mutanosib bo'ladi. Demak, rotor va havo bo'shlig'idagi magnit maydonining aylanish chastotalari yig'indisi sinxron aylanish chastotasiga teng bo'ladi. Shu sababli rotorning maydoni bilan rotorning istalgan aylanish chastotalari sinxron aylanadi.

Magnit maydoni induktsiyasining amplituda qiymati sinxron mashinadagi kabi aniqlanadi:

$$B_m \approx \frac{\sqrt{2}U_1}{\pi r l \omega_1 N_a}.$$

Rotor magnit maydoni kuchlanishning amplituda qiymatini rotor toki orqali topish mumkin:

$$H_m = \frac{\sqrt{2}I_x}{\delta} N_x. \quad (4.7)$$

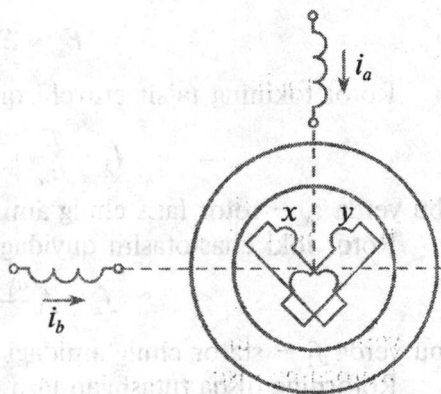
Agar stator chulg'amning aktiv  $r_1$  va induktiv  $x_1$  qarshiliklarini hisobga olmasak, EYuK ni quyidagicha aniqlash mumkin:

$$E_x \approx U_1 \frac{N_x}{N_a} \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1}, \quad (4.8)$$

bu yerda  $(\omega_1 - \omega_r)$  – stator magnit maydoni va rotorning burchak chastotalari farqi

$$S = \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} \quad (4.9)$$

sirpanish deyiladi. Uni hisobga olib EYuK ni quyidagicha topamiz.



4.4-rasm



$$E_x \approx S \frac{N_x}{N_a} U_1. \quad (4.10)$$

Rotor tokining ta'sir etuvchi qiymati quyidagicha topiladi

$$I_x = \frac{E_x}{z_x} \approx S \frac{N_x}{N_a} \frac{U_1}{z_x}, \quad (4.11)$$

bu yerda  $z_x$  — rotor faza chulg'aminging to'la qarshiligi.

Rotor toki chastotasini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin

$$f_x = f_1 \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} = S f_1, \quad (4.12)$$

bu yerda  $f_1$  — stator chulg'amidagi kuchlanishning chastotasi.

Rotorning qisqa tutashgan faza chulg'aminging to'la qarshiligi quyidagiga teng

$$z_x = \sqrt{r_x^2 + (2\pi f_x L_x)^2} = \sqrt{r_x^2 + (S\omega_1 L_x)^2}, \quad (4.13)$$

bu yerda  $\omega_1$  — tarmoqning burchak chastotasi.

U holda rotor tokining ta'sir etuvchi qiymati quyidagicha aniqlanadi:

$$I_x = \frac{N_x}{N_a} \frac{s U_1}{\sqrt{r_x^2 + (S\omega_1 L_x)^2}}. \quad (4.14)$$

Burchak  $\theta$  ni aniqlash uchun 4.5-rasmdagi vektor diagrammadan foydalanamiz. Bu diagrammada rotor chulg'aminging EYuK o'zining maksimal qiymatiga ega.

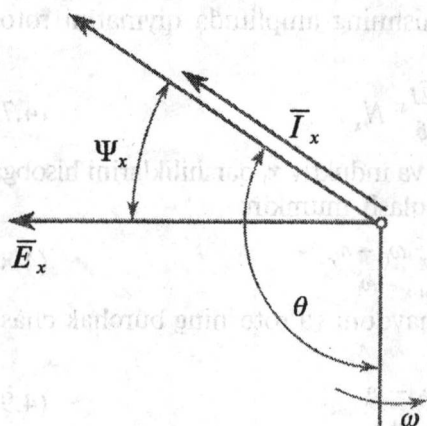
Aylanuvchi magnit maydoni hosil qilgan rotorning EYuK fazasi bo'yicha oqimdan  $\pi/2$  burchakka orqada qoladi. Rotor chulg'amida

hosil bo'lgan tok vektori ham EYuK vektori dan  $\Psi_x$  burchakka orqada qoladi. Demak, rotor maydonining o'qi havo bo'shlig'idagi maydon o'qidan  $(90 + \Psi_x)$  burchakka orqada qoladi.

U holda moment burchagi quyidagiga teng bo'ladi

$$\theta = -(90 + \Psi_l). \quad (4.15)$$

Shunday qilib, yuqoridagi fikrlarni hisobga olgan holda asinxron mashinaning momenti quyidagiga teng bo'ladi:



4.5-rasm

$$M = \frac{2p}{\omega_1} \left( \frac{N_x}{N_a} \right)^2 \frac{sU_1}{\sqrt{r_x^2 + (S\omega_1 L_x)^2}} \cos \psi_x, \quad (4.16)$$

Rotor zanjirining quvvat koeffitsienti quyidagicha aniqlanadi

$$\cos \psi_x = \frac{r_x}{z_x} = \frac{r_x}{\sqrt{r_x^2 + (S\omega_1 L_x)^2}}. \quad (4.17)$$

(4.17) tenglamani hisobga olgan holda momentning tenglamasini quyidagicha yozish mumkin

$$M = \frac{2p}{\omega_1} \left( \frac{N_x}{N_a} \right)^2 \frac{sU_1^2 r_x}{r_x^2 + (S\omega_1 L_x)^2} = \left[ \frac{1}{m} \left( \sqrt{2} \frac{N_x}{N_a} \right)^2 \right] \frac{m_1 U_1^2 r_x S}{\Omega_{mx} [r_x^2 + (S\omega_1 L_x)^2]}. \quad (4.18)$$

Ko'p hollarda asinxron mashina kuchlanishi stabil bo'lgan elektr tarmog'iga ulanadi. Shu sababli (4.18) tenglama faqat ikkita o'zgaruvchi  $S$  va  $M$  ga ega bo'ladi. Ular orasidagi bog'lanishga mexanik xarakteristika (4.6-rasm) deyiladi.

Ordinata o'qida joylashgan sirpanish  $S$  ni uchta zonaga bo'lish mumkin.

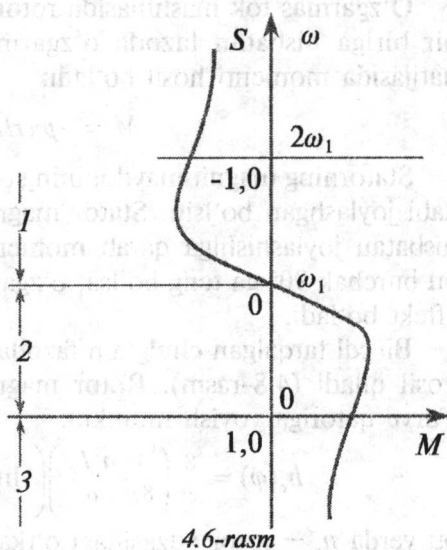
$1 < S < +\infty$  (aylanish chastotasining qiymati manfiy) bo'lganda mashinada hosil bo'lgan moment mashina aylanishiga teskari yo'nalishda ta'sir qiladi va mashina elektromagnit tormoz rejimida (4.6-rasm 3-zona) ishlaydi.

$0 < S < 1$  bo'lganda mashina motor rejimida (4.6-rasm 2-zona) ishlaydi. Bunda moment va mashinaning aylanish chastotasi musbat bo'ladi.

$-\infty < S < 0$  bo'lganda moment manfiy bo'ladi va mashina generator rejimida (4.6-rasm 1-zona) ishlaydi.

Amalda asinxron mashinalar motor rejimida ishlatiladi. Shu sababli motor rejimini ko'rib o'tamiz.

Motorning aylanish chastotasi sinxron aylanish chastotasiga juda yaqin bo'lganda nominal



4.6-rasm

rejim hisoblanadi. Bu rejimda motorning mexanik xarakteristikasi deyarli chiziqli bo'ladi. Bunda sirpanish  $S \rightarrow 0$  intilib  $r_x \gg S\omega_1 L_x$  bo'ladi.

U holda momentning tenglamasi soddalashadi

$$M \approx \frac{2p}{\omega_1} \left( \frac{N_x}{N_a} \right)^2 \frac{U_1^2}{r_x} S. \quad (4.19)$$

Turli parametrlarning momentga ta'sirini baholash uchun, moment maksimal qiymatga ega bo'lganda  $S$  ni topamiz.

Buning uchun (4.18) tenglamani nolga teng deb, momentdan  $S$  bo'yicha hosila olamiz. Natijada quyidagiga ega bo'lamiz:

$$S_m = r_x / \omega_1 L_x. \quad (4.20)$$

Sirpanishning bu qiymatini momentning tenglamasiga qo'yib, uning maksimal qiymatini topamiz:

$$M_m = \frac{p}{\omega_1} \left( \frac{N_x}{N_a} \right)^2 \frac{U_1^2}{\omega_1 L_x}. \quad (4.21)$$

Demak,  $r_x$  o'zgarganda maksimal momentning holati o'zgaradi, qiymati esa o'zgarmay qoladi. Bu  $r_x / \omega_1 L_x$  nisbatni o'zgartirib  $M = f(S)$  bog'lanishni rostdash imkonini beradi.

### 4.3. O'zgarmas tok elektr mashinasi

O'zgarmas tok mashinasida rotor va statorning magnit maydonlari bir biriga nisbatan fazoda o'zgarmas bo'lib, ularning ta'sirlashishi natijasida momenti hosil bo'ladi:

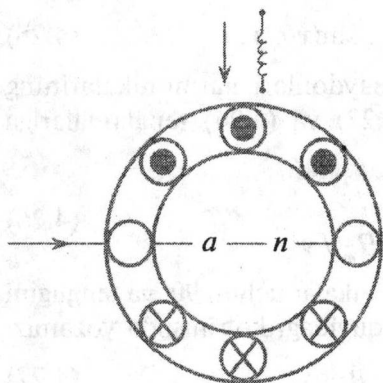
$$M = -p\pi r l H_m B_m \sin \theta. \quad (4.22)$$

Statorning magnit maydonining o'qi fazoda 4.7-rasmda ko'rsatilgani kabi joylashgan bo'lsin. Stator magnit maydonining rotor maydoniga nisbatan joylashishiga qarab moment burchagini aniqlaymiz. Agarda bu burchak  $90^\circ$  ga teng bo'lsa, o'zgarmas tok mashinalarida juda katta effekt bo'ladi.

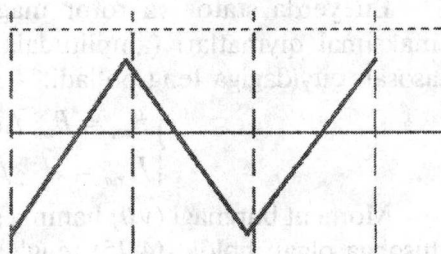
Bir xil tarqalgan chulg'am fazoda uchburchak shaklidagi maydonni hosil qiladi (4.8-rasm). Rotor magnit maydonining kuchlanganligini Fyure qatoriga yoyish mumkin:

$$h_x(\varphi) = \frac{8}{\pi^2} \left( \frac{1}{8p} \frac{n_x I_x}{\delta} \right) \left( \sin \varphi - \frac{\sin 3\varphi}{3^2} + \frac{\sin 5\varphi}{5^2} - \dots \right) \quad (4.23)$$

bu yerda  $n_x$  — rotor yuzasidagi o'tkazgichlarning umumiy soni.



4.7-rasm



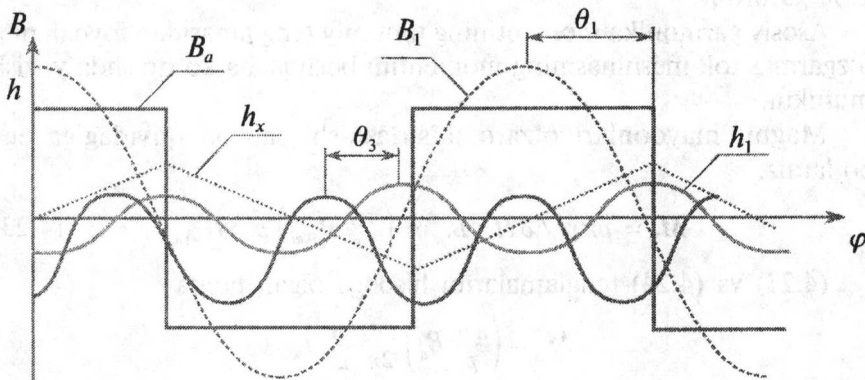
4.8-rasm

O'zgaras tok mashinalari statorida asosan yig'ilgan chulg'am bo'lib, ayon qutblarga joylashtirilgan bo'ladi. Shu sababli to'g'ri burchakli to'liqinni Furiye qatoriga yoyib quyidagiga ega bo'lamiz:

$$B_a(\varphi) = \frac{4}{\pi} B_a \left( \cos \varphi - \frac{\cos 3\varphi}{3^2} + \frac{\cos 5\varphi}{5^2} - \dots \right) \quad (4.24)$$

Shunday qilib, stator va rotorning magnit maydonlari 4.9-rasmda ko'rsatilgan shaklga ega bo'ladi.

4.9-rasmda momentning  $\nu$  - garmonikasining ishorasi asosiy garmonikalarning ishorasi kabi bo'ladi va ta'siri ham asosiy garmonikaniki singari bo'ladi. Bu ikkala garmonikalarning siljish burchaklarining optimal qiymati  $90^\circ$  ga teng bo'ladi. Momentlarning qiymatini mos garmonikalarning asosiy tenglamasidan aniqlash mumkin:



4.9-rasm.

$$M = -(vp)\pi r / \delta H_{xm} B_{xm} \sin(v\theta_{ch}). \quad (4.25)$$

Bu yerda stator va rotor magnit maydonlari garmonikalarining maksimal qiymatlari (amplitudalari) (4.23) va (4.24) tenglamalariga asosan quyidagiga teng bo'ladi:

$$\begin{cases} B_{xm} = B_{xm} / v = B_m / v \\ H_{xm} = H_{xm} / v^2 = H_m / v^2 \end{cases} \quad (4.26)$$

Moment burchagi ( $v\theta$ ) hamma garmonikalar uchun  $90^\circ$  ga tengligini hisobga olgan holda, (4.25) tenglamani quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$M_x = -p\pi r l / \delta H_{1m} B_{1m} \frac{1}{v^2}, \quad (4.27)$$

bundan

$$M = M_1 \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v^2} \quad (4.28)$$

ga ega bo'lamiz.

$v$  – toq bo'lganda

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{v^2} = \frac{\pi^2}{8}$$

va

$$M = \frac{\pi^2}{8} M_1. \quad (4.29)$$

Shunday qilib, o'zgaruvchan tok elektr mashinalaridan farqli ravishda, o'zgarmas tok elektr mashinalarida garmonikalar momenti  $\pi^2/8$  marta oshar ekan, ya'ni asosiy garmonika momentidan taxminan 23% ga ortiq.

Asosiy garmonika momentining umumiy tenglamasidan foydalanib, o'zgarmas tok mashinasining momentini boshqacha ko'rinishda yozish mumkin.

Magnit maydonlari o'zaro ta'sirlashishi sababli quyidagiga ega bo'lamiz:

$$M_1 = p\pi r l / \delta H_{1m} B_{1m} = \left( \frac{\pi r l}{p} B_{a1m} \right) p^2 \delta H_{x1m}. \quad (4.23)$$

(4.23) va (4.24) tenglamalarini hisobga olgan holda

$$M_1 = \left( \frac{\pi r l}{p} B_a \right) \frac{pn_x}{2\pi} \frac{8}{\pi^2} I_x$$

ga ega bo'lamiz. Bundan (4.29) tenglamaga asosan

$$M = k\Phi_a I_x, \quad (4.30)$$

bo'ladi, bu yerda  $\Phi_a = \frac{\pi r l}{p} B_a$  – qutbga to'g'ri keluvchi magnit oqim;  $k$  – o'zgarmas koeffitsient bo'lib, u rotor chulg'aming parametrlariga bog'liq bo'ladi:

$$k = pn_x / 2\pi. \quad (4.31)$$

O'zgarmas tok mashinasining stator (qo'zg'atish) chulg'amida barqarorlashgan rejimda EYuK hosil bo'lmaydi, chunki havo bo'shlig'idagi maydon fazoda qo'zg'almas bo'lib, u bir xil amplitudaga ega.

Rotor (yakor) chulg'ami rotor bilan birga aylanganligi sababli, undagi oqim ilashimligi o'zgaruvchan bo'ladi. Shu sababli yakor chulg'amida EYuK hosil bo'ladi.

EYuK ni aniqlash uchun quvvatlarning balans tenglamasidan foydalanamiz.

O'zgarmas tok mashinasida hosil bo'lgan mexanik quvvat quyidagiga teng

$$P_{\text{mex}} = M\Omega_{bx} = k\Phi_a I_x \Omega_{bx}. \quad (4.32)$$

Stator chulg'amida EYuK hosil bo'lmaganligi sababli, bu quvvat rotordagi EYuK hisobiga hosil bo'ladi. Demak, rotor zanjiridagi elektromagnit quvvat quyidagicha aniqlanadi

$$P_{\text{em}} = E_x I_x. \quad (4.33)$$

(4.32) va (4.33) tenglamalarini tenglashtirib, quyidagiga ega bo'lamiz:

$$E_x = k\Phi_a \Omega_{bx}. \quad (4.34)$$

#### 4.4. Elektromexanik o'zgartgichlarning ekvivalent elektr sxemalari

Ekvivalent elektr sxemalar yoki ekvivalent almashtirish sxemalar elektromexanik o'zgartgichlarning ish rejimlarini tahlil qilishda qo'llaniladi.

Ekvivalent almashtirish sxemalar passiv elementlardan (qarshilik, induktivlik, sig'im) iborat bo'lib, ular shunday ulanadiki, bu sxema tekshirilayotgan sistemaning differentsial tenglamalarini ifoda qilsin.

Agarda almashtirish sxemasining elementlari chiziqli bo'lsa, sxema chiziqli differentsial tenglamalar bilan ifodalanadi. Bunday almashtirish



sxemalari faqat chiziqli sistemalarni tahlil qilishda ishlatiladi. Demak, bunday almashtirish sxemalarni tahlil qilishda dinamik jarayonlarni qo'llash cheklangan bo'ladi.

Misol tariqasida umumlashgan elektromexanik o'zgartgich modeli (3.2-rasm) sinxron mashina bo'lib ishlayotgan bo'lsin.

— stator chulg'aming simmetrik ikki fazali kuchlanishi quyidagicha topiladi:

$$\begin{cases} U_a = \sqrt{2}U \sin \omega t \\ U_b = -\sqrt{2} \cos \omega t \end{cases};$$

— rotor chulg'aming birida tok yo'q, ikkinchisida esa o'zgarmas qo'zg'atish toki bor, ya'ni

$$i_x = -I; \quad i_y = 0;$$

— rotorning o'zgarmas aylanish tezligi

$$\Omega_r = \Omega_{mx} = \frac{\omega}{p},$$

bunda rotor holatining burchagi quyidagiga teng

$$\varphi_r = \omega t + \theta,$$

bu yerda  $\varphi_r, \theta - t = 0$  bo'lgandagi rotor holatining boshlang'ich burchagi.

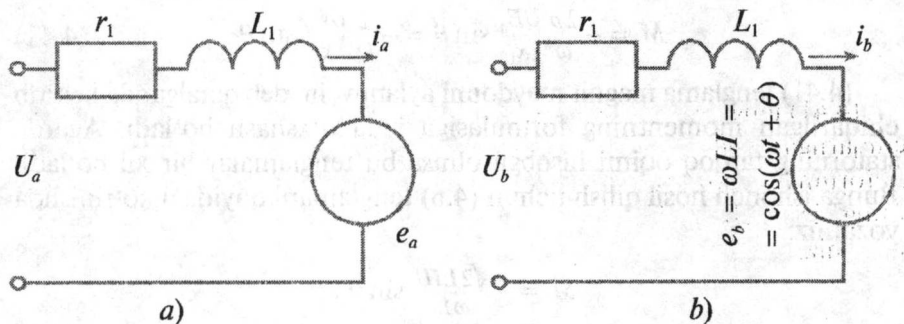
Bu shartlarda (3.6) tenglama quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\begin{cases} U_a = \sqrt{2}U \sin \omega t = r_1 i_a + L_1 \frac{di_a}{dt} + \omega LI \sin(\omega t + \theta) \\ U_b = \sqrt{2}U \cos \omega t = r_1 i_b + L_1 \frac{di_b}{dt} - \omega LI \cos(\omega t + \theta) \\ i_x = -I; \quad i_y = 0 \\ m = pLI [i_a \sin(\omega t + \theta) - i_b \cos(\omega t + \theta)]. \end{cases} \quad (4.35)$$

Bu sistemadagi birinchi ikkita tenglama sinxron mashinaning almashtirish sxemasini ifodalaydi.

4.10-rasmda keltirilgan zanjirlar bu ikkita tenglamaga mos keladi. Bu rasmdagi ikkala zanjir o'xshash bo'lib, farqi shundaki kuchlanish va tok faza bo'yicha  $\pi/2$  burchakka siljigan. Mashinaning momentini almashtirish sxemasi bilan bog'lash mumkin. Buning uchun momentning tenglamasini quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$m = \frac{p}{\omega} [i_a \omega LI \sin(\omega t + \theta) - i_a \omega LI_x \cos(\omega t + \theta)] = \frac{p}{\omega} (e_a i_a - e_b i_b) \quad (4.36)$$



4.10-rasm.

Demak, moment oniy elektromagnit quvvatga proporsional (muntosib) ekan.

Momentning soddalashtirilgan formulasini olish uchun stator chulg'aminin aktiv qarshiligini hisobga olmaymiz.

U holda zanjirning (4.11-rasm) toki quyidagiga teng bo'ladi

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a - \underline{E}_a}{jx_1} = -j \frac{\underline{U}_a}{x_1} + j \frac{\underline{E}_a}{x_1}. \quad (4.37)$$

Bu tenglamaga asosan tokni vaqtning funktsiyasi ko'rinishida yozsak:

$$i_a = -\frac{\sqrt{2}U}{x_1} \cos \omega t + \frac{\omega LI}{x_1} \cos(\omega t + \theta). \quad (4.38)$$

$i_b$  tok esa vaqt bo'yicha  $\pi/2$  burchakka farq qiladi:

$$i_b = -\frac{\sqrt{2}U}{x_1} \sin \omega t + \frac{\omega LI}{x_1} \sin(\omega t + \theta) \quad (4.39)$$

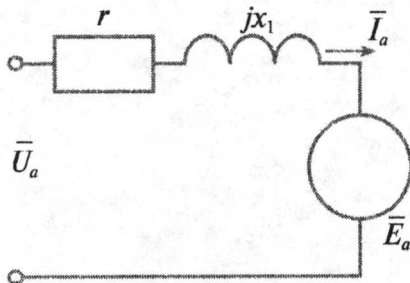
$i_a$  va  $i_b$  toklarini (4.36) tenglamaga qo'yib, soddalashtirishdan keyin quyidagiga ega bo'lamiz:

$$M = -pLI \frac{\sqrt{2}U}{x_1} \sin \theta. \quad (4.40)$$

EYuK ning ta'sir etuvchi qiyamati:

$$E_a = \frac{\omega LI}{\sqrt{2}}.$$

$E_a$  ni (4.40) tenglamaga qo'yib quyidagiga ega bo'lamiz



4.11-rasm

$$M = -\frac{2p}{\omega} \frac{UE_a}{x_1} \sin \theta = -\frac{2}{\Omega} \frac{UE_a}{x_1} \sin \theta. \quad (4.41)$$

(4.41) tenglama magnit maydonni aylanuvchi deb qaralganda keltirib chiqarilgan momentning formulasiga juda o'xshash bo'ladi. Agarda statorning tarqoq oqimi hisobga olinsa bu tenglamalar bir xil bo'ladi. Bunga ishonch hosil qilish uchun (4.6) tenglamani quyidagi ko'rinishda yozamiz:

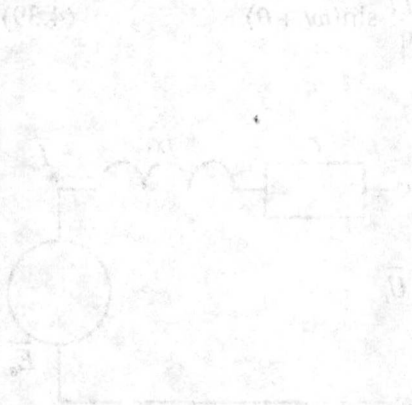
$$M = -\frac{\sqrt{2}LIU}{\omega L_1} \sin \theta.$$

Tarqoq oqim bo'lganda  $L/L_1 = N_2/N_1$  bundan quyidagini aniqlaymiz

$$M = -\frac{2p}{\omega} \frac{N_2}{N_1} \sqrt{2}UI \sin \theta. \quad (4.42)$$

### ***Nazorat savollari***

1. Sinxron mashinaning elektromagnit modeli qanday ko'rinishga ega?
2. Sinxron mashina momentining umumiy tenglamasini yozing.
3. Qanday bog'lanishga sinxron mashinaning burchak xarakteristikasi deyiladi?
4. Asinxron mashinaning elektromagnit modelini chizing.
5. Asinxron mashinaning sinxron mashinadan farqi nimada?
6. Sirpanish deganda nimani tushinasiz?
7. Asinxron mashinada moment burchagi qanday aniqlanadi?
8. O'zgarmas tok mashinasi uchun momentning umumiy tenglamasini yozing.
9. Elektr mashinasining ekvivalent almashtirish sxemasi deganda nimani tushinasiz?



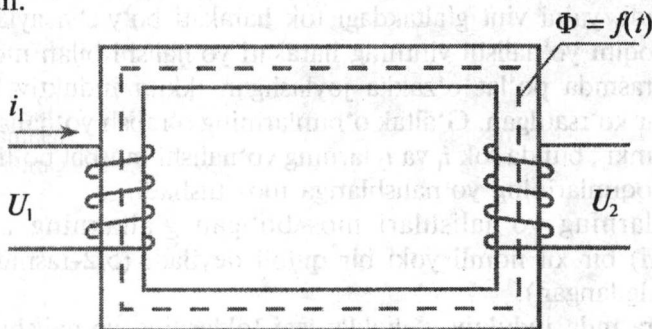
## V bob. ELEKTR ENERGIYASINI TRANSFORMATSIYALOVCHI ELEKTROMAGNIT QURILMALAR

### 5.1. Chulg'amning qutbiyligi

**Magnit oqimining nisbiy yo'nalishi.** Agar chulg'amlar va magnit maydoni bir biriga nisbatan siljimasa (harakatlanmasa) elektr va mexanik energiyalarning o'zaro bir biriga aylanishi sodir bo'lmaydi.

Bu holda elektr energiyasi elektr energiyaga o'zgaradi. Bu funktsiyani bajaruvchi elektromagnit qurilmaga transformator deyiladi.

5.1-rasmda bir fazali ikki chulg'amli transformatorning sxemasi ko'rsatilgan.

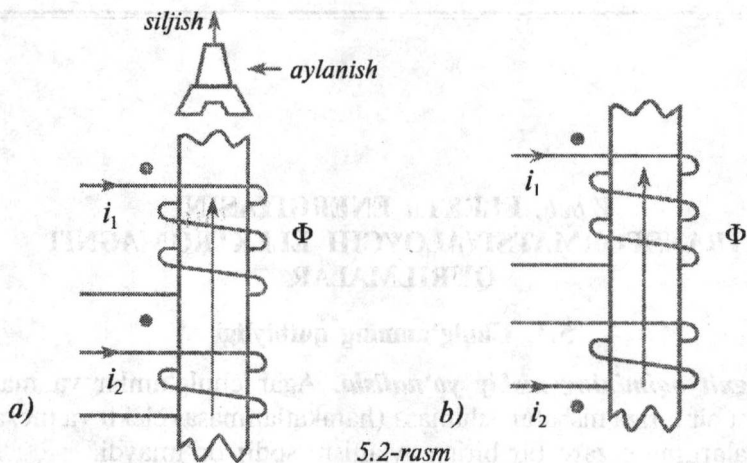


5.1-rasm

Chulg'amdan biri birlamchi, ikkinchisi esa ikkilamchi chulg'am deyiladi. Birlamchi chulg'am elektr tarmog'iga ulansa, ikkilamchi chulg'am esa yuklamaga ulanadi.

Transformatorlar vaqti-vaqti bilan quvvat oqimi yo'nalishi o'zgarib turadigan elektr tarmog'iga ulanishi mumkin. Bunday hollarda chulg'amlarni faqat nomerlash kerak.

Transformatorlar ko'pincha shunday elektr tarmoqlarga ulanadiki, bunda magnit bog'langan chulg'amlar orasida galvanik bog'lanish bo'ladi. Bunday hollarda EYuK lar orasidagi qutbiylikni va toklar yo'nalishini bilish muhimdir.



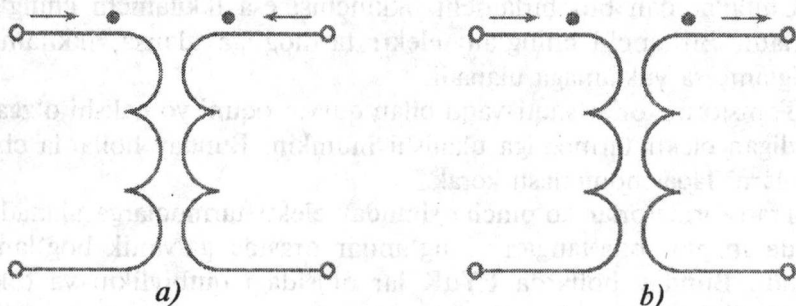
5.2-rasm

Agarda ular hosil qilgan magnit oqimlarning yo'nalishi mos bo'lsa, ikkita induktiv bog'langan g'altaklardagi toklarning yo'nalishini ham mos (musbat) deb qabul qilamiz. Bu hol o'ng yo'lli parma qoidasiga asosan aniqlanadi, ya'ni vint g'altakdagi tok harakati bo'yicha aylantirilganda magnit oqim yo'nalishi vintning harakati yo'nalishi bilan mos bo'ladi.

5.2-rasmda po'lat o'zakka joylashgan ikkita induktiv bog'langan g'altaklar ko'rsatilgan. G'altak o'ramlarining o'ralish yo'nalishi shunday tanlanganki, bunda tok  $i_1$  va  $i_2$  larning yo'nalishi musbat bo'lib, ularning magnit oqimlarining yo'nalishlariga mos tushadi.

Toklarning yo'nalishlari mos bo'lgan g'altakning klemmalari (qismlari) bir xil nomli yoki bir qutbli deyiladi (5.2-rasmda nuqtalar bilan belgilangan).

5.3-rasmda induktiv g'altaklardagi toklarning yo'nalishlari mos va teskari yo'nalgan sxemalari ko'rsatilgan.



5.3-rasm

## 5.2. Transformatorning ekvivalent elektr sxemasi

Bir fazali ikki chulg'amli transformatorning elektromagnit sxemasi 5.4-rasmda ko'rsatilgan.

Transformatorning ikkilamchi chulg'amiga yuklama ulangan. Kirxgofning ikkinchi qonuniga asosan quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\begin{cases} U_1 + e_{L1} + e_L = r_1 i_1 \\ e_{L2} + e_L = r_2 i_2 + z_{yuk} i_2 \end{cases} \quad (5.1,a)$$

yoki

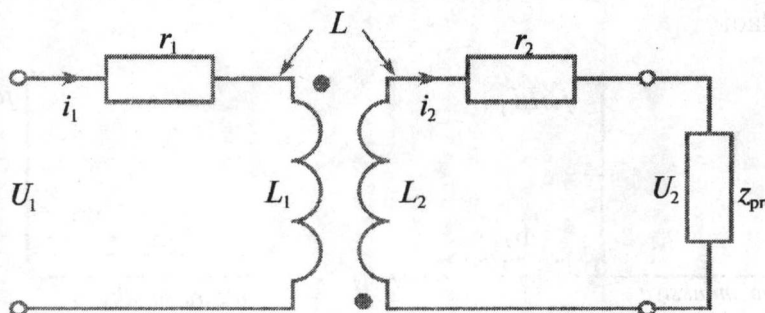
$$\begin{cases} U_1 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} \\ 0 = r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + L_{21} \frac{di_1}{dt} + U_2 \end{cases} \quad (5.1,b)$$

Agarda  $U_1$  garmonik qonunga asosan o'zgarsa, u holda bu tenglamani kompleks ko'rinishda yozish mumkin (bunda  $L_{12} = L_{21} = L$ ).

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = r_1 \underline{I}_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 + j\omega L \underline{I}_2 \\ 0 = r_2 \underline{I}_2 + j\omega L_2 \underline{I}_2 + j\omega L \underline{I}_1 + \underline{U}_2 \end{cases} \quad (5.1,v)$$

Quyidagi belgilashlarni kiritamiz

$$\begin{aligned} \omega L_1 &= x_1 \\ r_2 + R_{yuk} &= r \\ \omega L_2 + x_{yuk} &= x \end{aligned} \quad (5.2)$$



5.4-rasm



U holda (5.1,v) tenglamadan quyidagiga ega bo‘lamiz

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = (r_1 + jx_1)\underline{I}_1 + j\omega L\underline{I}_2 \\ 0 = (r_2 + jx)\underline{I}_2 + j\omega L\underline{I}_1 \end{cases}$$

Bu tenglamalar sistemasini yechib quyidagiga ega bo‘lamiz:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\left[ r_1 + \frac{(\omega L)^2}{r^2 + x^2} r \right] + j \left[ x_1 - \frac{(\omega L)^2}{r^2 + x^2} x \right]} = \frac{\underline{U}_1}{z_k}, \quad (5.3)$$

bu yerda  $z_k = r_k + jx_k$  zanjirning to‘la kompleks kirish (ekvivalent) qarshiligi hisoblanadi.

5.5-rasmda transformatorning ikkilamchi zanjiridagi yuklama reaktiv xarakterga ega bo‘lgan hol uchun vektor diagrammasi ko‘rsatilgan. Tok hosil qilgan magnit oqim o‘zaro induksiya oqimini kamaytiradi (5.5,a-rasm) va natijada birlamchi chulg‘amning reaktiv qarshiligi kamayadi.

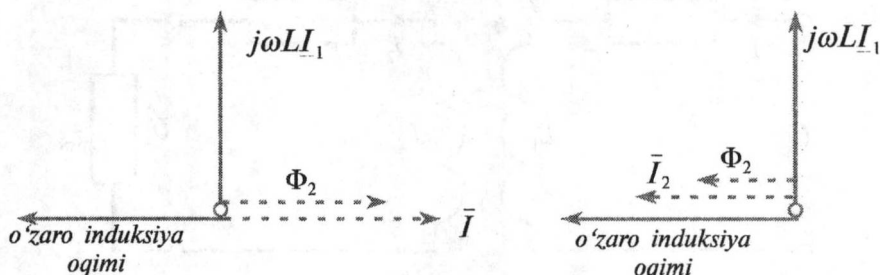
Agarda ikkilamchi chulg‘amdagi yuklama sig‘im xarakterga ega bo‘lsa (5.5,b-rasm), u holda yuqoridagi fikrimizning (5.5,a-rasm) teskarisi bo‘ladi.

(5.1,v) tenglama quyidagi tenglamaga o‘xshash bo‘ladi

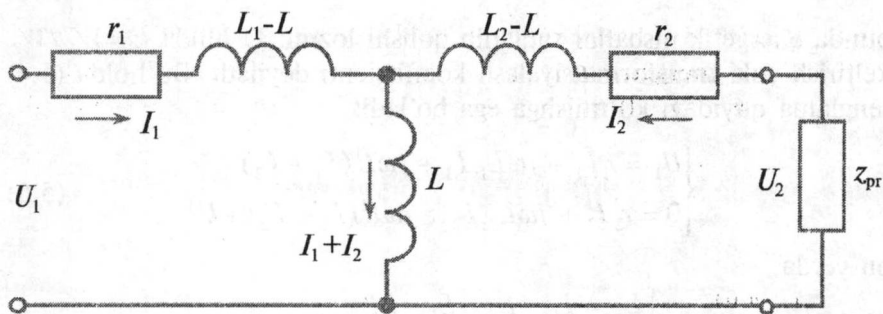
$$\begin{cases} \underline{U}_1 = r_1 \underline{I}_1 + j\omega(L_1 - L)\underline{I}_1 + j\omega L(\underline{I}_1 + \underline{I}_2) \\ 0 = r_2 \underline{I}_2 + j\omega(L_2 - L)\underline{I}_2 + j\omega L(\underline{I}_1 + \underline{I}_2) + z_{yuk} \underline{I}_2 \end{cases} \quad (5.4)$$

(5.4) tenglama mos keluvchi elektr zanjirining sxemasi 5.6-rasmda ko‘rsatilgan.

Bu sxemadagi toklar  $I_1$ ,  $I_2$  va kuchlanishlar  $U_1$ ,  $U_2$  real transformatorning toklari va kuchlanishlarga teng bo‘lganligi sababli, bu sxemaga transformatorning ekvivalent elektr sxemasi (almashtirish sxemasi) deyiladi.



5.5-rasm



5.6-rasm

Ma'lumki konturning magnit bog'lanish darajasi  $c = L / \sqrt{L_1 L_2}$  kattalik bilan xarakterlanadi. Tabiatda magnit izolyatorlari yo'q, shu sababli tarqoq magnit oqim albatta bo'ladi, demak,  $c < 1$ .

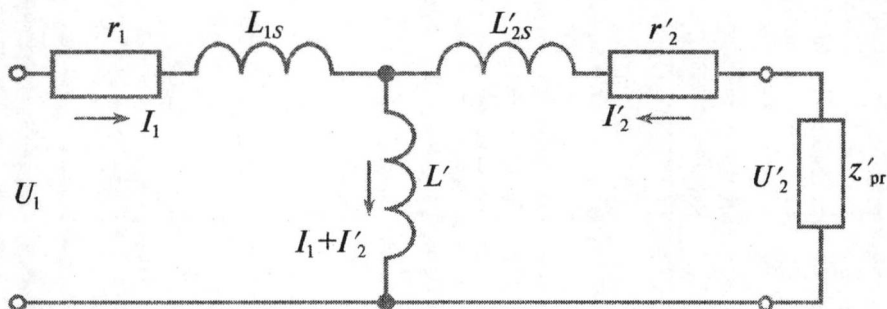
Agar  $L_1 = L_2$  bo'lsa, u holda  $L_1 = L_2 > 0$  va  $L_2 - L > 0$  bo'ladi.  $L_1$  va  $L_2$  larning teng bo'lmagan qiymatlaridan birida bu ayirma manfiy bo'lishi mumkin.

Shunday qilib,  $(L_1 - L)$  va  $(L_2 - L)$  ayirmalar chulg'amlarning o'ramlar soni bir xil bo'lganda fizik ma'noga ega bo'ladi va chulg'amlarning tarqoq induktivlik  $L_{1s}$  va  $L_{2s}$  lari hisoblanadi.

Chulg'amlarning o'ramlar soni har xil ( $W_1 \neq W_2$ ) bo'lganda esa transformatorlarda keltirilgan almashtirish sxemasi qo'llaniladi (5.7-rasm).

Bunday almashtirish sxemasida kuchlanish  $U_2$  va tok  $I_2$  lar birlamchi chulg'am o'ramlar soniga keltiriladi:

$$\begin{cases} \underline{I}_2^1 = \underline{I}_2 / k \\ \underline{U}_2^1 = k \underline{U}_2 \end{cases}, \quad (5.5)$$



5.7-rasm

bunda energetik nisbatlar saqlanib qolishi lozim. U holda  $k = W_1 / W_2$  keltirish yoki transformatsiyalash koeffitsienti deyiladi. Bu holda (5.4) tenglama quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\begin{cases} U_1 = r_1 I_1 + j\omega L_{1s} I_1 + j\omega L^1 (I_1 + I_2) \\ 0 = r_2 I_2 + j\omega L_{2s} I_2 + j\omega L^1 (I_1 + I_2) + U_2^1 \end{cases} \quad (5.6)$$

bu yerda

$$\begin{cases} L_{1s} = L_1 - L^1 = L_1 - kL \\ L_{2s} = L_2 - L^1 = k^2 (L_2 - L / k) = k^2 L_{2s} \\ z_{yuk}^1 = k^2 z_{yuk} \end{cases} \quad (5.7)$$

Ideal transformator va qo'shimcha aktiv hamda induktiv qarshiliklar yordamida ( $c < 1$  bo'lganda) real transformatorni hosil qilish mumkin.

### ***Nazorat savollari***

1. Qanday elektromagnit qurilmaga transformator deyiladi?
2. Transformator chulg'amlarning qanday klemmalariga (qismlariga) bir qutbli deyiladi?
3. Transformatorning almashtirish sxemasini chizing.
4. Transformatorning transformatsiyalash koeffitsienti deb nimaga aytiladi.
5. Qanday transformatorga keltirilgan transformator deyiladi?

## **VI bob. ELEKTROMEXANIK O'ZGARTGICHLARNING (ELEKTR MASHINALARINING) QIZISHI VA ULARNI SOVITISH. ISH REJIMLARI**

### **6.1. Elektr mashinalarining qizishi**

Elektr mashinalarining ish jarayonida energiyaning bir qismi ular-dagi isroflarni qoplashga sarflanadi. Boshqa qismi esa issiqlikka aylanib, asosan mashinaning aktiv qismlari temperaturasi oshirsa, uning bir qismi esa atrof muhitga uzatiladi.

Elektr mashinasi — chulgʻamlar, magnit oʻtkazgich elementlari va kons-truktiv detallar majmuasidan iborat. Bu qismlarning issiqlik oʻtkazuv-chanligi (6.1-jadval), issiqlik sigʻimi (6.2-jadval), va sovitilish sharoitlari har xil boʻladi, bu esa, mashinada issiqlik maydoni taq-simlanishining murakkab xarakterda ekanligini koʻrsatadi. Lekin, mashinaning qizish jarayonidagi umumiy qonuniyatlarni aniqlash maqsadida elektr mashinani bir jinsli jism sifatida qaralsa, qoʻyilgan masalani yechishdagi birinchi yaqinlashish boʻladi. Bunday taxmindagi mashinaning qizishi uning butun hajmi boʻyicha bir tekis yuz beradi va issiqlik mashina sirtining butun yuzasida bir xil tarqaladi deb hi-soblanadi.

Bunday shartlarda issiqlik energiyasining muvozanat tenglamasi (energiyaning saqlanish qonuni) quyidagicha yoziladi:

$$Q \cdot dt = cm \cdot d(\Delta\vartheta) + \alpha S \cdot \Delta\vartheta \cdot dt, \quad (6.1)$$

bu yerda:

$cm \cdot d(\Delta\vartheta)$  — issiqlik energiyaning mashinada yutilib, uning tempe-raturasini oshiradigan qismi;

$\alpha S \cdot \Delta\vartheta \cdot dt$  — issiqlik energiyaning atrof muhitga tarqaladigan qismi;  
 $c$  — mashinaning solishtirma issiqlik sigʻimi (mashinaning 1 kg massasi temperaturasi 1° S ga oshirish uchun zarur boʻladigan issiqlik miqdori), J/(kg · ° S);

$m$  — mashinaning massasi, kg;

$\Delta\vartheta$  — mashina temperaturasi sovitish muhiti tempera-turasiga nisbatan oshishi, ° S;

$\alpha$  — mashina sovitish yuzasining issiqlik berish koeffitsienti,  $W/(m^2 \cdot ^\circ S)$ ;

$S$  — mashinaning sovitish yuzasi,  $m^2$ .

Issiqlik atrof muhitga (yoki sovitish muhitiga) asosan issiqlik o'tkazuvchanlik va konvektsiya vositalarida uzatiladi (issiqlikning nur-lanish ko'rinishida uzatilishi juda ham kam bo'ladi). Elektr mashinasining temperaturasi va  $\Delta\theta$  kattaligi oshgan sari atrof muhitga (sovitish muhitiga) tarqaladigan issiqlik miqdori o'sib, mashina ichki temperaturasini

6.1-j a d v a l

| №   | Material                                                                                         | Issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti $\lambda$ , $W/(m \cdot ^\circ C)$ |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | Mis                                                                                              | 380                                                                       |
| 2.  | Alyuminiy                                                                                        | 220                                                                       |
| 3.  | Elektrotexnikaviy po'lat:<br>a) qatlam bo'ylamasiga bo'yicha<br>b) qatlam ko'ndalangiga bo'yicha | $48 \div 20$<br>$3,1 \div 1,2$                                            |
| 4.  | Shisha                                                                                           | 1,1                                                                       |
| 5.  | Mikanit                                                                                          | 0,2                                                                       |
| 6.  | Lakli mato                                                                                       | 0,15                                                                      |
| 7.  | Paz izolyatsiyasi                                                                                | 0,1                                                                       |
| 8.  | Suv ( $40^\circ C$ da)                                                                           | 0,633                                                                     |
| 9.  | Vodorod ( $40^\circ C$ da)                                                                       | 0,19                                                                      |
| 10. | Transformator moyi ( $40^\circ C$ da)                                                            | 0,164                                                                     |

6.2-j a d v a l

| №  | Sovitish uchun ishlatiladigan havo (yoki gaz) va suyuqlik | Hajmiy solishtirma issiqlik sig'imi $C_v$ , $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$ | Zichligi $\gamma$ , $kg/m^3$ |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1. | Havo ( $0^\circ C$ da va $10^5$ Pa bosimda)               | $1,1 \cdot 10^3$                                                     | 1,3                          |
| 2. | Vodorod ( $0^\circ C$ da va $10^5$ Pa bosimda)            | $1,1 \cdot 10^3$                                                     | 0,09                         |
| 3. | Transformator moyi ( $15^\circ C$ da)                     | $1,5 \cdot 10^6$                                                     | 850                          |
| 4. | Suv ( $15^\circ C$ da)                                    | $4,1 \cdot 10^6$                                                     | 999                          |

oshiradigan issiqlik qismi kamayadi. Bu jarayonning borishida mashina temperaturasi o'zining barqaror qiymatiga yetadi, ya'ni issiqlik muvozanati rejimi vujudga kelib, mashinadan ajralib chiqadigan issiqlikning hammasi atrof muhitga uzatiladi. Bu holda  $cm \cdot d(\Delta\vartheta) = 0$  bo'lib, issiqlikning muvozanat tenglamasi quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot (\Delta\vartheta_b) \quad (6.2)$$

Bundan  $\Delta\vartheta$  ning barqarorlashgan qiymati aniqlanadi:

$$\Delta\vartheta_b = Q / (\alpha \cdot S), \quad (6.3)$$

demak,  $\Delta\vartheta_b$  ning qiymati mashina massasiga bog'liq bo'lmasdan, vaqt birligida mashinadan ajralib chiqadigan issiqlik miqdori  $Q$  ga to'g'ri mutanosib bo'lib sovitish sirti yuzasi  $S$  ga va issiqlik uzatish koefitsienti  $\alpha$  ga teskari mutanosiblikda bo'lar ekan.

Mashina yuklamasi qancha ko'p bo'lsa,  $Q$  ning oshishi tufayli  $\Delta\vartheta_b$  ning qiymati ham mos ravishda ko'payadi. Sovitilish sharoiti yaxshilangan sari  $\Delta\vartheta_b$  kamaya boradi.

Mashinani yaxshi sovitish maqsadida quyidagi usullardan va vositalardan foydalaniladi:

a) o'rta va kam quvvatli mashinalarda staninaning tashqi sirtiga qovurg'asimon shakl berib sovitish yuzasini oshirish;

b) ichki (yoki tashqi) ventilyator qo'yish (ayrim mashinalarda ikkalasi ham qo'yiladi);

d) katta quvvatli mashinalarda sovitgich qurilmalaridan foydalanish;

e) o'ta o'tkazuvchanlikka asoslangan istiqbolli sovitish tizimidan foydalanish.

Mashinaning sovitilishi yaxshilanganda issiqlikni konvektsiya yo'li bilan chiqarishning kuchayishi hisobiga issiqlik uzatish koefitsienti  $\alpha$  oshadi.

Sovitishni sun'iy yo'llar bilan jadallashtirish tufayli ma'lum gabaritdagi mashinadan katta quvvat olishga yoki ma'lum quvvatda mashinaning gabaritini kamaytirishga erishiladi.

(6.1) differentsial tenglamani yechib quyidagini olamiz:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_b [1 - \exp(-t/T)] + \Delta\vartheta_0 \cdot \exp(-t/T), \quad (6.4)$$

bu yerda  $\Delta\vartheta_0$  – mashina temperaturasi oshishining boshlang'ich qiymati;  
 $T = cm/(\alpha S)$  – qizishning vaqt doimiyliigi, ya'ni mashina qizishining tezligini tavsiflovchi kattalik.



Agar mashina ishlashiga qadar qizdirilmagan bo'lsa, ya'ni uning temperaturasi atrof muhit temperaturasiga teng bo'lganda  $\Delta\vartheta_0 = 0$  bo'ladi va qizish tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 [1 - \exp(-t/T)]. \quad (6.5)$$

Qizish jarayonining boshlanishida barcha hosil bo'lgan issiqlik mashinaning o'zida yutiladi va uning temperaturasi tez o'sadi.  $\Delta\vartheta$  ning osha borishi bilan issiqlikning atrof muhitga (sovitish muhitiga) beriladigan qismi ko'payishi tufayli temperaturaning o'sish tezligi kamayadi.

Mashina temperaturasining sovitish muhiti temperaturasidan oshishining barqarorlashgan qiymati  $\Delta\vartheta$  ga yetgunga qadar ketgan vaqt  $T$  ga, ya'ni vaqt doimiysiga bog'liq bo'ladi.  $T$  qancha kam bo'lsa, qizish jarayoni shuncha tez kechadi, ya'ni  $t \approx (3+4)T$ .

Vaqt doimiysi  $T$  mashinaning konstruksiyasiga va quvvatiga bog'liq bo'ladi. O'rta quvvatli mashinalar uchun  $T$  bir necha minutga teng, katta quvvatli mashinalar uchun esa u bir necha soat bo'ladi.

Agar  $\Delta\vartheta_0 < \Delta\vartheta_0$  bo'lsa, (6.3) tenglama mashinaning sovitilish jarayonini tavsiflaydi. Jismning barqarorlashgan temperaturasi sovitish muhitiniki bilan tenglashsa ( $\Delta\vartheta_0 = 0$ ), (6.3) tenglama quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 \cdot \exp(-t/T). \quad (6.6)$$

Yuqorida keltirilgan ma'lumot elektr mashinani bir jinsli jism sifatida qaralganda sodir bo'ladigan qizish va sovish jarayonlarini ifodalaydi. Haqiqatda esa mashinaning ayrim qismlari har xil temperaturaga ega va, shu sababli, elektr mashinani o'zaro issiqlik almashuvi mavjud bo'lgan bir necha bir jinsli jismlarning majmuasidan iborat, deb qaralganda to'g'ri bo'lar edi. Haqiqiy sharoitda temperaturaning kattaligi ham o'zgarmas bo'lmaydi, chunki issiqlik uzatish koeffitsientlari ayrim darajada temperaturaga bog'liq bo'ladi. Undan tashqari havo yoki boshqa sovitish moddasi ventilyatsion kanaldan oqib o'tganda qizish tufayli sovitish yuzasining har xil qismlari uchun sovitish muhitining temperaturasi har xil qiymatga ega bo'ladi.

Shunday qilib, mashinaning qizish va sovish egri chiziqlari eksponentsial o'zgarishiga nisbatan farqli bo'ladi. Lekin ko'pchilik amaliy hollarda yuqorida ko'rilgan nazariyaga asosan mazkur o'zgarishlar eksponenta ko'rinishida o'zgaradi, deb qaralganda katta xato bo'lmaydi.

## 6.2. Elektr mashinalarining asosiy nominal rejimlari

Elektr mashinalarining ish rejimlari ekspluatatsiya sharoitida har xil bo'ladi, ya'ni davomli, qisqa muddatli, takrorlanuvchi qisqa muddatli va normal ish davri salt ishlash bilan almashinib turadigan ish rejimlariga bo'linadi.

Mashina taxminan to'la yuklama bilan uzoq vaqt mobaynida (masalan, elektr stantsiyalarda elektr generatorlari, nasos qurilmalarida elektr motorlari va boshqalar) va nisbatan qisqa muddatda (ba'zi bir yuk ko'tarish kran motorlari) ishlashi mumkin. Zamonaviy avtomatlashtirilgan sanoat va boshqa qurilmalarda elektr mashinalari ko'pchilik hollarda davriy rejimda ishlaydi. Umuman, elektr mashinalari o'zgaruvchan yuklama bilan ishlaydi.

Elektr mashinaning o'zgarmas nominal yuklamadagi ishi sovitish muhiti temperaturasi o'zgarmaganda mashina qismlari temperaturasining oshishi kamida barqarorlashgan qiymatlariga erishgan vaqtga qadar davom qilsa, bunday rejimni elektr mashinaning **davomli nominal ish rejimi** deyiladi (bu rejimning standart bo'yicha shartli belgilanishi  $S1$ ).

O'zgarmas nominal yuklamaning davrlari, sovitish muhitining temperaturasi o'zgarmas bo'lganda mashinaning ishdan to'xtatilish davrlari (pauzalari) bilan almashinib turadigan ish rejimiga **qisqa muddatli** ( $S2$ ) **nominal ish rejimi** deyiladi. Bu rejimda yuklama davrida mashina qismlari temperaturasining oshishi barqarorlashgan qiymatgacha yetadigan vaqtdan ancha kam, mashinani to'xtatish davrlari esa davomli bo'lib, bunda u amaliy ravishda atrof muhit temperaturasigacha sovishtirilgan ulguradi. Bunday mashinalar 15, 30, 60 va 90 min. bo'lgan davomli ish davriga tayyorlanadi.

Mashina temperaturasining qisqa muddatli rejimdagi oshishi  $\Delta\vartheta_{kr} \leq \Delta\vartheta_{max}$  bo'lgandagi qisqa muddatli rejimning ruxsat berilgan davomiyligi  $t_{kr}$  ni quyidagi formuladan aniqlash mumkin:

$$\Delta\vartheta_{kr} = \Delta\vartheta_b [1 - \exp(-t_{kr}/T)]. \quad (6.7)$$

Demak, qisqa muddatli rejimda  $\Delta\vartheta_b$  ning qiymatini davomli ish rejimdagi mashinaga nisbatan  $1/[1 - \exp(-t_{kr}/T)]$  marta oshirish mumkin ekan. Quvvat isroflari  $\Sigma p$  ning ruxsat berilgan qiymatlarini ham shuncha marta oshirsa bo'ladi. Shuning uchun qisqa muddatli rejimga hisoblangan quvvatdagi mashinalarning gabarit o'lchamlari va massasi davomli ish rejimga hisoblangan mashinalarnikiga nisbatan ancha kichik

bo'ladi. Tushuntirishga boshqacha yondoshilganda, mashinalarning berilgan gabaritlarida materiallarning sarflanishida qisqa muddatli ish rejimidagi mashinalarning quvvati ish rejimi davomli bo'lgan mashinalarnikiga nisbatan katta bo'ladi.

O'zgarmas nominal yuklamaning qisqa muddatli davrlari, sovitish muhiti temperaturasi o'zgarmaganda, mashina ishdan to'xtatilishi (pauza)ning qisqa muddatli davrlari bilan almashinib turadigan ish rejimiga **takrorlanuvchi qisqa muddatli (S3) ish rejimi** deyiladi. Mashinaning umumiy ish vaqtini  $t_w = t_{ish} + t_p$  davomiylikda davriy takrorlanadigan sikllarga bo'lib o'rganiladi. Bu rejimda mashinaning normal ish davrlari va pauza davrlari kichik bo'lib, yuklama bilan ishlagan davrida mashina temperaturasining oshishi barqarorlashgan qiymatigacha yetmaydi, pauza davrlarida esa mashinaning temperaturasi atrof muhitnikigacha sovishga ulgurmaydi.

Standartga binoan mashinaning bu rejimda ishlash siklidagi vaqt 10 minutdan oshmasligi kerak. Takrorlanuvchi qisqa muddatli ish rejimi mashina ishining davomiyligi bilan tavsiflanadi (uning standartda belgilanishi  $PV$  — *prodoljitel'nost vklyucheniya*).

$$PV_{\%} = (t_{ish} / t_s) \cdot 100 = [t_{ish} / (t_{ish} + t_p)] \cdot 100. \quad (6.8)$$

$PV$  ning standart qiymatlari 15, 25, 40 va 60 foizlardan iborat.

Mashinaning takrorlanuvchi qisqa muddatli rejimdagi ishida qizish egri chizig'i arrasimon ko'rinishga ega bo'ladi, chunki qizish davrlari sovish davrlari bilan almashinib turadi.

Takrorlanuvchi qisqa muddatli rejimda uzluksiz davomli ish rejimiga nisbatan mashinaning yuklamasini oshirishga ruxsat beriladi.

Amaliyotda elektr mashinasi quvvatini qanchaga oshirish mumkinligini aniqlash uchun ekvivalent tokdan foydalaniladi:

$$I_{ekv} = I_{ish} \cdot \sqrt{t_{ish} / (t_{ish} + t_p)} = I_{ish} \sqrt{PV}, \quad (6.9)$$

bunda  $I_{ish}$  — mashinaning ish davridagi toki.

Agar  $PV_1$  takrorlanuvchi qisqa muddatli rejimdagi ishga mo'ljallangan mashina  $PV_2$  rejimda ishlatilsa, uning quvvati  $P$  ni aniqlovchi tok kuchi qanchaga oshirilishi yoki kamaytirilishi quyidagi nisbatdan aniqlanadi:

$$P_1 / P_2 = I_1 / I_2 = \sqrt{PV_1 / PV_2}. \quad (6.10)$$

Bundan,  $PV = 100\%$  dagi mashina quvvati  $P_{100}$  deb qabul qilinsa, uning  $PV = 60\%$  dagi quvvatini taxminan  $P_{60} = 1,3P_{100}$ ,  $PV = 40\%$  da  $- P_{40} = 1,6P_{100}$ ,  $PV = 25\%$  da  $- P_{25} = 2P_{100}$ ,  $PV = 15\%$  da esa  $P_{15} = 2,6P_{100}$  gacha oshirish mumkin bo'ladi.

**Normal ish davri salt ishlash bilan almashinib turadigan ish rejimi.** Mazkur rejimda mashinaning yuklama bilan qisqa muddatli ish davrlari salt ishlash davrlari (pauzalar) bilan almashinib turadi.

Bu rejim yuklamaning nisbiy davomiyligi (%) bilan tavsiflanadi (bu kattalikning standartda belgilanishi  $PN$  – «prodoljitelnost nagruzki»).

$$PN = (t_{\text{ish}}/t_s) \cdot 100 = [t_{\text{ish}}/(t_{\text{ish}} + t_0)] \cdot 100, \quad (6.11)$$

bu yerda  $t_{\text{ish}}$  – ish vaqti;  $t_0$  – salt ishlash vaqti.

Bu kattalikning standart qiymatlari 15, 25, 40 va 60 % larni tashkil qiladi. Siklning davomiyligi 10 minutga teng, deb qabul qilinadi.

$\vartheta$  va  $\Delta\vartheta$  larning mazkur rejimdagi o'zgarish xarakteri takrorlanadigan qisqa muddatli rejimdagiga o'xshash bo'ladi, ya'ni ular  $t_{\text{ish}}$  va  $t_0$  vaqtda barqarorlashgan qiymatlarga erishmaydi.

### **Nazorat savollari**

1. Elektromexanik o'zgartgichlarning qanday asosiy nominal ish rejimlarini bilasiz?
2. Elektromexanik o'zgartgichlarning qizish jarayonini tushintirib bering.
3. Elektromexanik o'zgartgichlarning issiqlik energiyasining muvozanat tenglamasi (energiyaning saqlanish qonuni)ni yozing.
4. Elektromexanik o'zgartgichning davomli nominal ish rejimi deb qanday rejimga aytiladi?
5. Elektromexanik o'zgartgichning takrorlanuvchi qisqa muddatli ish rejimi deb qanday rejimga aytiladi?

---

## **VII bob. ASINXRON ELEKTROMEXANIK O'ZGARTGICHLARNING ZAMONAVIY TURLARI**

### **7.1. Asinxron motorlarning zamonaviy turlari**

Mustaqil Davlatlar Hamdo'stligi mamlakatlarida (asosan Rossiyada) asinxron motorlarning yangi turkumlari yaratildi. Yaroslavl (Rossiya) «Elektr mashinasozlik» zavodi hozirgi vaqtda quvvati 100 kW gacha bo'lgan RA(PA) yangi turkumli asinxron mashinalarini ishlab chiqarmoqda. Bu mashinalarni ishlab chiqarishda asosan 4A, AIR, AIS turkumli asinxron mashinalarining kamchilik va ijobiy texnik tavsiflari hisobga olindi. RA turkumli asinxron mashinalarining aylanish o'qi balandligi (H) 71–280 mm ni tashkil qiladi.

Vladimir (Rossiya) «Elektromotor» zavodi AI turkumi asosida, uning kamchilik va ijobiy texnik tavsiflari asosida yangi quvvati 315 kW gacha bo'lgan 5A va 5AH turkumli asinxron mashinalarini ishlab chiqarmoqda. Bu mashinalarning 14 ta gabariti mavjud bo'lib, aylanish o'qi balandligi (H) 71–355 mm ni tashkil qiladi.

Hozirgi vaqtda 6A turkumli asinxron mashinalar ham Rossiya Federatsiyasida ishlab chiqarilmoqda. Xorijiy firmalarda ishlab chiqarilayotgan uch fazali asinxron motorlarning quyidagi ayrim seriyalarini ko'rsatish mumkin. Masalan, kuchlanishi  $U = 220/380$  V; ulanish sxemasi –  $\Delta/Y$ ; ikki qatlamli: 2AR90S2 (1,5 kW,  $n = 3000$  ayl/min), AS1 (2,2 kW,  $n = 3000$  ayl/min), DB 55(2 (9 kW,  $n = 3000$  ayl/min), BF4112M (5,5 kW,  $n = 3000$  ayl/min), B3 (30 kW,  $n = 1500$  ayl/min), FEK (37 kW,  $n = 1000$  ayl/min).

### **7.2. Asinxron motorlarning ayrim nosozliklari va ularni bartaraf qilish**

Asinxron motorlarda uchraydigan ayrim nosozliklar va ularni bartaraf qilish yo'llari 7.1-jadvalda ko'rsatilgan.

| Nosozlik turi                                           | Sababi                                                                                                                                                                              | Yo'qotish yo'llari                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Motor ishga tushmaydi, aylanmaydi va shovqin chiqmaydi. | 1. Ishga tushirgich zanjiri ulanmagan.<br>2. Motorning uchta yoki ikkita fazasiga kuchlanish berilmagan.<br>3. Stator chulg'ami ishdan chiqqan.                                     | 1. Sababi aniqlanadi.<br>2. Kuchlanishlar o'lchanib nosozlikka barham beriladi.<br>3. Stator yoki motor almashtiriladi.                                                                                                                                                                                     |
| Motor o'chmaydi.                                        | Ishga tushirish apparati elektr zanjirini ajratmaydi                                                                                                                                | Nosozlik topilib tugatiladi                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Motor aylanmaydi va normal bo'lmagan ovoz chiqaradi.    | 1. Biror fazaga kuchlanish berilmagan.<br>2. Motorning klemmalar qutisidagi simlar kuygan.<br>3. Mexanizmlarda elektr tormozi bo'lgan va u ishdan chiqqan holda motor tormozlangan. | 1. Ishga tushirgichning chiqish qismidan boshlab kuchlanishning bor yo'qligi tekshiriladi.<br>2. Simlar tozalanadi va izolyatsiyalanib, joy-joyiga qo'yiladi.<br>3. Tormozning holati tekshiriladi, agarda u mexanik nosozliklar oqibatida ulangan yoki ajramayotgan bo'lsa, u nosozlik topilib tugatiladi. |
| Motor normal tezlikda aylanmaydi                        | 1. Motor chulg'amlarida o'ramlararo qisqa tutashuv.<br>2. Elektr tarmog'idagi transformatoridan oldin qo'yilgan yuqori kuchlanishli saqlagich kuygan.                               | 1. Stator yoki motor almashtiriladi<br>2. Tarmoqdagi kuchlanish o'lchanadi, agar kuchlanish normal bo'lmasa, bu haqda yuqori kuchlanishli tarmoqqa xizmat ko'rsatuvchi personalga xabar beriladi                                                                                                            |
| Motor tez aylanadi va to'xtab qoladi.                   | Ishga tushirgich kontakti bo'shroq bosilgan                                                                                                                                         | Ishga tushirgich g'altagi zanjiridagi yoki magnit tizimidagi nosozlikka barham beriladi                                                                                                                                                                                                                     |



### 7.3. Mustaqil davlatlar hamdo'stligi mamlakatlarida ishlab chiqarilayotgan asinxron mashinalar va ularning istiqbolli turlari

O'zbekiston Respublikasida faqatgina Andijon shahridagi «Elektro-dvigatel» ishlab chiqarish birlashmasida xalq xo'jaligining turli soha-larida ishlatiladigan asinxron motorlarning bir necha tiplari ishlab chiqarilmoqda.

Kundalik turmushimizda ishlatiladigan avtomat va yarim avtomat kir yuvish mashinalari («EVRIKA-3M») barabanlarini yuritish uchun mo'ljallangan ikki tezlikli kondensatorli asinxron motor ishlab chiqarilmoqda ( $P_{2N} = 120$  va  $60$  W,  $U_N = 220$  V,  $f = 50$  Gts,  $n = 2850$  va  $425$  ayl/min,  $\eta = 24$  va  $21$  %).

Turli xil mexanizmlar, asbob-uskunalar, apparatlar va qurilmalar-ning yuritmasi sifatida ishlashga mo'ljallangan AV-04M turkumli uch fazali asinxron motor, ( $P_{2N} = 16,25$  va  $40$  W,  $U_N = 220/380$  V,  $\eta = 48,55$  va  $64$  %).

Chorvachilik, parrandachilik fermalarida va boshqa ishlab chiqarish ob'ektlarida qo'llaniladigan turli xil mashina hamda mexanizmlarni yuritish uchun 4AM100SU1 tipli uch fazali asinxron motorlar ( $P_{2N} = 2,2; 3; 4$  va  $5,5$  kW,  $U_N = 380$  V,  $\eta = 81; 82; 86,5$  va  $87,5$  %) mo'ljallangan.

4AM100UZ tipli uch fazali asinxron motorlardan foydalanish qulay bo'lganligi sababli ular har xil dastgohlarda, kompressorlar, ventilya-torlar hamda avtomat boshqarish tizimlarida keng qo'llaniladi. Ularning nominal kattaliklari xuddi 4AM100SU1 tipli motorniki singaridir.

To'qimachilik sanoatida ishlatiladigan TO-3 tipli ( $P_{2N} = 0,8$  va  $1,1$  kW,  $U_N = 220(380$  V,  $\eta = 75$  %) uch fazali asinxron motorlari mokili avtomat va boshqa dastgohlarni yuritish uchun mo'ljallangan.  $0,8$  va  $1,1$  kVt, nominal kuchlanishlari  $220/380$  V, foydali ish koeffitsientlari  $75$  %.

Bundan tashqari bu birlashmada uch fazali S-759U2 tipli tok chastotasini o'zgartgich ham ishlab chiqarilmoqda. Uning texnik tavsiflari: kuchlanishlari – birlamchi  $380/220$  V, ikkilamchi  $36$  V; tok: birlamchi –  $2,7/4,7$  A, ikkilamchi –  $9,6$  A; quvvati: iste'mol qilina-yotgan –  $1$  kW, uzatilayotgan –  $0,6$  kW; tok chastotalari: birlamchi –  $50$  Gts, ikkilamchi –  $200$  Gts.

Andijondagi «Elektrodvigatel» zavodidan tashqari MDH mamlakatlaridagi 45 ta zavodda turli xil elektr mashinalari ishlab chiqarilmoqda. Bular jumlasiga «Elektrosila» (Sankt-Peterburg, Rossiya), «Xarkov elektrotexnika», «Xarkov elektromexanika» (Xarkov, Ukraina), «Tyajelektromash», «Kirgizelektrodvigatel» (Bishkek, Kirgi-ziya), «Uralektromotor» (Mednogorsk, Rossiya), «Elektromashina» (Baku, Azerbaydjan), «Elektromotor» (Vladimir, Rossiya), «Elektromashina» (Ulan-Ude, Rossiya), «Armelektrodvigatel», «NII elektromash», «Erevan elektromotori», «Erevan elektrotexnika» (Erevan, Armeniya), «Elektrodvigatel», (Mogilev, Belorussiya), «Elektr mashinasozlik», (Yaroslavl, Rossiya) va boshqalar.

«Erevan elektrotexnika» zavodi 4AAMT, 4ABX, AIRF2P, 4AMAS, 4AMS tipli, «Xarkov elektrotexnika» zavodi 4ABAR tipli, «Kirgizelektrodvigatel» zavodi AII, AIRZT, AIRUT, 4AUT, DAK, DAO, 2DAO tipli, «Elektrodvigatel» zavodi AIR, AIRB, 4AMAS, 4AP, AXVP tipli, «Elektromashina» (Baku) zavodi AIR tipli, «Xarkov elektromexanika» zavodi ADTs, ED, EDK tipli, «Elektr mashinasozlik» zavodi AIR, AIRS, AMK, 4AMR, AXDCh, tipli asinxron mashinalarini ishlab chiqaradi.

***Qishloq xo'jaligi va transportda ishlatiladigan asinxron motorlar.***  
Respublikamizdagi «Andijonelektrodvigatel» ishlab chiqarish birlashmasida qishloq xo'jaligi uchun ishlatiladigan qisqa tutashgan rotorli 4A turkumli asinxron motorlari ishlab chiqarilmoqda. Bunday motorlarning quvvati  $2,2 \div 5,5$  kW ni tashkil qilib, ular 380 V li kuchlanishda ishlaydi. Hozirgi vaqtda 4AM100S2SU1, 4AM100L2SU1, 4AM100S-4SU1, 4AM100L4SU1 va 4AM100L6SU1 tipli asinxron motorlari ishlab chiqarilmoqda.

MDH mamlakatlarida ham qishloq xo'jaligida ishlatiladigan 4A...C, 4A...CX turkumli qisqa tutashgan rotorli asinxron motorlari ishlab chiqarilmoqda. Ularning quvvati  $0,06 \div 315$  kW bo'lib, aylanish chastotalari esa 500, 600, 750, 1000, 1500 va 3000 ayl/min ni tashkil qiladi.

Bundan tashqari qishloq xo'jaligidagi turli xil mexanizmlarni harakatga keltirishda ishlatiladigan A2...CX va A02...CX turkumli qisqa tutashtirilgan rotorli asinxron motorlari ham ishlab chiqariladi. Ularning quvvati  $10 \div 30$  kW ni tashkil qiladi.

Respublikamizda va MDH davlatlarida ishlayotgan teplovozlarda ED-900 turkumli qisqa tutashgan rotorli asinxron tortish motorlari ishlatilmoqda.

ETA-1200, NB-602, NB-607 turkumli qisqa tutashgan rotorli asinxron tortish motorlari esa Respublikamizdagi va MDH davlatlarida ishlayotgan elektrovozlarda ishlatiladi. Bunday motorlarning quvvati 900 va 1200 kW ni tashkil etadi.

### ***Nazorat savollari***

1. Asinxron mashinalarning maxsus turlari to'g'risida ma'lumot bering.
2. Asinxron motorlarni ishlatish jarayonida qanday nosozliklar bo'lishi mumkin?
3. Qishloq xo'jaligi va transportda qanday turkumli asinxron motorlar ishlatiladi?
4. Asinxron motorlarning zamonaviy turlari to'g'risida ma'lumot bering.
5. Asinxron motorlarda uchraydigan ayrim nosozliklar qanday bartaraf qilinadi?

---

## **VIII bob. SINXRON ELEKTROMEXANIK O'ZGARTGICHLARNING ISTIQBOLLI TURLARI**

### **8.1. Bo'ylama-ko'ndalang o'qlari bo'yicha qo'zg'atiladigan sinxron mashinalar**

Bunday sinxron mashinalarning stator tuzilishi an'anaviy sinxron mashinalarnikidan farq qilmaydi. Rotorining tuzilishi quyidagi bilan farq qiladi. Sinxron mashina rotoridagi tinchlantiruvchi (generator) yoki yurgizish chulg'ami (motor) o'rniga ikki yoki m fazali qo'zg'atish chulg'ami o'rnatiladi. Quyida ikki fazali, chulg'ami bo'lgan noayon va ayon qutbli rotorning tuzilishini ko'rib o'tamiz. Bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'yicha qo'zg'atiladigan sinxron mashinaning rotori noayon qutbli bo'lsa, simmetrik ikki fazali qo'zg'atish chulg'ami rotor pazlariga xuddi yakor chulg'ami yoki faza rotorli asinxron motorning rotor chulg'ami kabi o'ralgan bo'ladi. Agar ikki chulg'am «ax» va «bu»lar har xil bo'lsa, ya'ni nosimmetrik bo'lsa, ular har xil hajmni egallaydi.

Noayon qutbli bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'yicha qo'zg'atiladigan sinxron mashinalarda bo'ylama o'qi «ax» qo'zg'atish chulg'amining o'qi bo'yicha yo'nalgan bo'lib, uning musbat yo'nalishi «ax» chulg'amning magnit oqimi bilan bir xilda yo'nalgan bo'ladi. Ko'ndalang o'q q esa «bu» qo'zg'atish chulg'ami o'qi bo'yicha yo'nalgan bo'ladi. Shu sababli «ax» qo'zg'atish chulg'ami — bo'ylama, «bu» qo'zg'atish chulg'amini esa **ko'ndalang qo'zg'atish chulg'amlari** deyiladi.

Bo'ylama-ko'ndalang o'qlar bo'yicha qo'zg'atiladigan sinxron mashinaning rotori ayon qutbli bo'lsa, u holda qo'zg'atish chulg'amlari «ax» va «bu»larni bir xil, ya'ni simmetrik qilish mumkin emas. Asosiy bo'ylama qo'zg'atish chulg'ami «ax» xuddi oddiy sinxron mashinalardagi qo'zg'atish chulg'ami kabi joylashtiriladi, qo'shimcha ko'ndalang chulg'ami «bu» esa dempferlovchi chulg'am o'rnida joylashtiriladi va bu chulg'amning MYuK asosiy chulg'am MYuK ning  $20 \div 30\%$  ni tashkil etishi mumkin.

Bunday sinxron mashinalarning ishlash printsipi oddiy sinxron mashinanikidan farq qilmaydi faqatgina o'tish jarayonlar vaqtida ko'nda-

lang qo'zg'atish chulg'ami «bu» ishga tushiriladi. Ikkala qo'zg'atish chulg'amiga ham o'zgarmas tok manbasidan kuchlanish beriladi. Bu mashinalar motor, generator, sinxron kompensator rejimlarida ishlashi mumkin. Bo'ylama-ko'ndalang o'qlari bo'yicha qo'zg'atiladigan sinxron mashinalarning ekspluatatsion tavsiflari an'anaviy sinxron mashinalarnikidan afzal bo'ladi, chunki yakor reaksiyasining ta'siri ko'ndalang qo'zg'atish chulg'ami MYuK tomonidan kompensatsiyalanadi. Shunday qilib, qo'shimcha ko'ndalang qo'zg'atish chulg'ami mashinaning statik va dinamik turg'unlik ish holatini oshiradi, hamda mashinani boshqarish yaxshilanadi. Ukrainada Rossiya bilan hamkorlikda quvvati 320 MV·A bo'lgan bo'ylama-ko'ndalang qo'zg'atishli noayon qutbli sinxron kompensator ishlab chiqarilgan.

## 8.2. Asinxronlashtirilgan sinxron mashinalar

Agar sinxron mashinada bir-biriga perpendikulyar bo'lgan ikkita qo'zg'atish chulg'ami bo'lib, ularga ikki fazali o'zgaruvchan kichik chastotali kuchlanish manbasi ulansa, u holda bu chulg'amlardan sinusoidal toklar o'tadi va qo'zg'atish chulg'amida aylanuvchi magnit maydonini hosil qiladi. Bu maydon rotorga nisbatan ma'lum bir sirpanish bilan aylanadi.

Shu sababli, bunday mashinalarni *asinxronlashtirilgan sinxron mashinalar* deyiladi. Bunday mashinalarning tuzilishi va ishlash printsi-pi bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'yicha qo'zg'atiladigan sinxron mashinalarniki kabi bo'ladi. Biroq qo'zg'atish chulg'amlariga barqaror ish jarayonida o'zgarmas tok berilsa, o'tish jarayonlar vaqtida esa bu chulg'amlarga o'zgaruvchan chastotali kuchlanish beriladi. Bu mashinalar ham motor, generator, sinxron kompensator rejimlarida ishlashi mumkin.

Bu mashinalarning tavsiflari (sinxron ish rejimida) va ko'ndalang qo'zg'atish chulg'amingi roli ham xuddi bo'ylama — ko'ndalang o'qlari bo'yicha qo'zg'atiladigan mashinalarniki kabi bo'ladi. Ukrainaning Burshtinsk IES da ikkita 200 MW li asinxronlashtirilgan turbogeneratorlar ishlamoqda. Shu bilan birga, hozirda quvvati 800 MW bo'lgan asinxronlashtirilgan turbogeneratorlarning loyihasi ustida ishlar olib borilmoqda.



### 8.3. O'ta o'tkazuvchan chulg'amli sinxron mashinalar

Hozirgi vaqtda qo'zg'atish chulg'amlari o'ta o'tkazuvchan materiallardan tayyorlangan sinxron mashinalarga bo'lgan qiziqish oshib bormoqda. Ayrim metallarda  $0,14 \div 9$  K temperaturada o'ta o'tkazuvchanlik nolga teng bo'ladi. Bu holda ma'lum bir kritik temperatura, kritik magnit induktsiyasi va kritik tok zichligi saqlanib qoladi.

Ayrim sohalarda niobiy va titan yoki niobiy va qalay birikmalaridan o'ta o'tkazuvchan materiallar ishlab chiqarilmoqda. Bunday o'tkazuvchan materiallar uchun kritik temperaturaning qiymati  $4,2 \div 5$  K, kritik tok zichligi  $1000 \text{ A/mm}^2$ , kritik magnit induktsiyasi  $4 \div 7 \text{ Tl}$  ga teng.

Elektr mashinalari chulg'amlarini o'ta o'tkazuvchan materiallardan ishlatilishi kichik kesim yuzasidan juda katta tok oqib, kuchli magnit maydonini hosil qiladi va chulg'amning massasini kamaytirishga imkoniyat yaratadi.

O'ta o'tkazuvchan materiallar asosan o'zgarmas tok manbasiga ulanadigan mashinalarning qo'zg'atish chulg'amlari o'rnida ishlatiladi.

Ularning o'zgaruvchan tok oqadigan chulg'amlar o'rnida ishlatish texnik jihatdan mumkin, lekin elektr isroflar va juda kichik kritik toklar bo'lgani uchun qulay hisoblanmaydi.

Shuning uchun hozirgi vaqtda sinxron va o'zgarmas tok mashinalari qo'zg'atish chulg'amlari uchun ishlatiladigan o'ta o'tkazuvchan materiallarni yaratish ustida ish olib borilmoqda.

Qo'zg'atish chulg'ami o'ta o'tkazuvchan materialdan tayyorlangan bo'lsa, kritik temperaturada bu materialni tutib turish uchun maxsus sovutish qurilmasi ichiga solish kerak. Bunday sovutish qurilmasiga kriostat deyiladi. Kriostat Dyura idishi bo'lib, uning ichida qo'zg'atish chulg'ami joylashtirilib suyuq geliy bilan sovutilib turadi. Issiqlikni kamaytirish maqsadida bu idish azot bilan to'ldirilgan boshqa idish ichiga joylashtiriladi. Sinxron mashinalarda kriostat rotorda, o'zgarmas tok mashinalarda esa kriostat statorda joylashtiriladi.

O'ta o'tkazuvchan materialdan bo'lgan chulg'amda kuchli magnit maydoni hosil bo'lgani uchun, odatdagi magnit o'tkazgichni ishlatlsa magnit isroflar ancha ko'payib ketadi va shu sababli yakor chulg'ami joylashtirilgan muhit pazzsiz yoki nomagnit materialdan yasaladi, natijada mashinaning og'irligi kamayadi va o'lchamlari kichiklashadi.



Ferromagnit po'latning bo'lmashligi esa mashinaning tavsiflariga yakor reaksiyasining ta'siri sezilarsiz bo'lishini ta'minlaydi. Oddiy mashinalarga qaraganda o'ta o'tkazuvchan chulg'amli mashinalarda havo oralig'ida magnit induktsiyasining qiymatini  $3 \div 4$  marta, chizig'iy yuklamani esa  $1 \div 2$  marta oshirish mumkin bo'ladi, natijada mashinaning aktiv hajmi  $4,5 \div 8$  martagacha kichiklashadi.

Elektr mashinalarida o'ta o'tkazuvchan materiallardan tashqari gipero'tkazuvchan materiallarni ham qo'llash ustida izlanishlar olib borilmoqda. **Gipero'tkazuvchan material** deb juda kuchli sovitilganda o'zining qarshiligini kamaytiradigan materialga aytiladi. Gipero'tkazuvchan materialga tozalangan alyuminiy misol bo'ladi. Alyuminiy 20 K temperaturada o'zining qarshiligini  $10^4$  marta kamaytiradi. Gipero'tkazuvchan materiallar transformatorlarning chulg'amlarini tayyorlash uchun ham ishlatiladi.

#### 8.4. Katta quvvatli istiqbolli sinxron mashinalar

**Turbogeneratorlar.** Hozirgi vaqtda elektr mashinasozligidagi muam-molardan biri katta quvvatli elektr mashinalarini yaratishdir. Bu muam-moni amalga oshirish uchun elektr mashinasozligida sifatli elektrotexnik va konstruksion materiallarni va effektiv sovitish tizimlarini qo'llash lozim bo'ladi.

Bu sohada turli xorijiy va MDH mamlakatlarida katta tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Hozirgi vaqtda Rossiyada quvvati 500 va 800 MW, aylanish tezligi 3000 ayl/min bo'lgan turbogeneratorlarni ishlab chiqarish yo'lga qo'yilgan. 1976 yildan buyon Rossiyada quvvati 1200 MW bo'lgan ikki qutbli turbogenerator ishlatib kelinmoqda. Bu turbogeneratorning stator chulg'ami bevosita suv bilan, rotor chulg'ami esa vodorod bilan sovitiladi. Xuddi shuningdek GFR va Shveysariya davlatlarida quvvati 1200 MV·A bo'lgan ikki qutbli turbogenerator, AQSh da esa quvvati 1200 MV·A bo'lgan ikki qutbli turbogenerator va quvvati 1120 MV·A bo'lgan ikki qutbli turbogeneratori yaratilgan. AESda qo'llaniladigan quvvati 500 MW bo'lgan to'rt qutbli turbogeneratori Rossiyada yaratilgan bo'lib, uning chulg'amlari suv bilan sovitiladi. Xuddi shuningdek Rossiyada quvvati 1000 MW bo'lgan to'rt qutbli turbogeneratori ham yaratilgan bo'lib, uning stator chulg'ami suv bilan rotor chulg'ami esa vodorod bilan sovitiladi. Frantsiyada esa eng katta quvvatli 1480 MW, GFR da esa quvvatlari 1360 va 1200 MW bo'lgan to'rt qutbli turbogeneratorlari yaratilgan. Xuddi shunday quvvatli to'rt

qutbli turbogeneratorlar AQSh da ham tayyorlanmoqda. Hozirda Rossiyada chulg'amlari suv bilan sovitiladigan quvvati 800 MW aylanish tezligi 3000 ayl/min bo'lgan ikkita ikki qutbli turbogenerator ishlatilmoqda.

**Gidrogeneratorlar.** Keyingi vaqtlarda Rossiyada Krasnoyarsk GES uchun quvvati 590 MV·A, aylanish tezligi 90 ayl/min va Sayano-Shushensk GES uchun esa quvvati 711 MV·A, aylanish tezligi 142 ayl/min bo'lgan gidrogeneratorlar yaratilgan bo'lib, stator chulg'ami suv bilan rotor chulg'ami esa havo bilan sovitiladi. Bundan tashqari Rossiyada Nurek GES (Tojikiston) uchun quvvati 353 MVA, aylanish chastotasi 200 ayl/min bo'lgan generator ishlab chiqarilgan. Generatorning stator va rotor chulg'amlari suv bilan, stator po'lat o'zagi esa havo bilan sovitiladi. Rogun GES (Tojikiston) uchun quvvati 667 MVA, aylanish chastotasi 167 ayl/min bo'lgan va stator hamda rotor chulg'amlari suv bilan sovitiladigan generatorlar yaratilmoqda.

Shvetsiyada quvvati 190 MVA, aylanish chastotasi 375 ayl/min bo'lgan gidrogeneratori yaratilgan. Agarda bu generator faqat suv bilan sovitilsa uning quvvatini 1000 MW ga oshirish mumkin bo'lar ekan. Eng katta quvvatli gidrogeneratorlarning ayrim parametrlari 8.1-jadvalda keltirilgan.

8.1-jadval

| Generatorlarning turi                | Alstom, Frantsiya | Vestin-gauz, AQSh | Toshiba, Xitachi | Elektrosila, Rossiya | UETM, Rossiya. Simens, Germaniya |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|----------------------|----------------------------------|
| Quvvati MV·A/MW                      | 500/475           | 615/600           | 700/630          | 711/640              | 353/300                          |
| Aylanish chastotasi, ayl/min         | 200               | 72                | 112,5            | 142,8                | 200                              |
| Kuchlanishi, V                       | 15                | 15                | 18               | 15,75                | 15,75                            |
| Stator chulg'amini sovitilish tizimi | havo              | havo              | havo             | suv                  | suv                              |
| Rotor chulg'amini sovitilish tizimi  | havo              | havo              | havo             | havo                 | suv                              |
| Quvvat koeffitsienti FIK, %          | 0,95              | 0,95—98,37        | 0,998            | 0,9—98,3             | 0,85—98,3                        |
| Umumiy massa, T                      | 1000              | 3383              | —                | 1860                 | 1250                             |

**Sinxron kompensatorlari.** Hozirgi vaqtda Rossiyada vodorod bilan sovitiladigan quvvati 160 MV·A bo'lgan sinxron kompensatorlarini ishlab chiqarish yo'lga qo'yilgan. Hozirda esa suv bilan sovitiladigan 350 MV·A quvvatli sinxron kompensatorlarini ishlab chiqarish bo'yicha tadqiqot ishlari olib borilmoqda.

Shvetsiyadagi firmalardan birida suv bilan sovitiladigan quvvati 345 MV·A, aylanish chastotasi 900 ayl(min bo'lgan sinxron kompensatori yaratilgan.

**Respublikamizda amalda ishlatilayotgan yirik sinxron mashinalar.**

Respublikamizdagi ko'pchilik GES va IES larda Rossiyada ishlab chiqarilgan gidrogeneratorlar va turbogeneratorlar ishlatilmoqda. Jumladan Farxod GES da, Chirchiq GES da, Quyi-Bozsu GES da, O'rta-Chirchiq GES da SV 570–145/32 tipli gidrogeneratorlar ishlatilayotgan bo'lsa, Toshkent IES da TVV–165–2 tipli, Sirdaryo IES da TVV–320–2 tipli, Navoiy IES da TVS–30, TVV–165–2, TVF–60–2, TGV–200–2MUZ tipli, Yangi-Angren IES da TVV–320–2UZ, TVV–320–2EUZ tipli turbogeneratorlar ishlatilmoqda.

**8.5. Sinxron mashinalarda uchraydigan ayrim nosozliklar va ularni bartaraf qilish yo'llari**

Amaliyotda sinxron mashinalarni ishlatish jarayonida nosozliklar sodir bo'ladi. Bu nosozliklarni o'z vaqtida topib, ularni oldini olish har bir mutaxassisdan katta malakani talab qiladi. Quyida sinxron mashinalarni ishlatishda tez-tez sodir bo'lib turadigan nosozliklar va ularni bartaraf qilish yo'llari 8.2-jadvalda keltirilgan.

8.2-jadval

| Nosozlik turi                                      | Sababi                                                                                                                                                                          | Yo'qotish yo'llari                                                                                             |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                  | 2                                                                                                                                                                               | 3                                                                                                              |
| Normal yuklamada stator po'lat o'zagining qizishi. | 1. Generator normal kuchlanishdan katta kuchlanish bilan ishlashi.<br>2. Generator normal chastotadan past chastota bilan aylanmoqda (birlamchi motorning chastotasi pasaygan). | Kuchlanish regulyatori yordamida kuchlanishni pasaytirish lozim.<br>Birlamchi motorning chastotasi oshiriladi. |

| 1                                                                                                                                                  | 2                                                                                                                                                                                                                                                  | 3                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Qo'zg'atish chulg'aming qizi-shi.                                                                                                                  | <p>1. Generator normal kuchlanishdan katta bo'lgan kuchlanish bilan va past chastota bilan aylanmoqda.</p> <p>2. Generator past bo'lgan quvvat koeffitsienti, ya'ni katta reaktiv quvvat bilan ishlamoqda, shu sababli qo'zg'atish toki katta.</p> | <p>1. Kuchlanish qiymati yoki birlamchi motorning aylanish chastotasi rostlanadi.</p> <p>2. Generatordan energiya olayotgan motorlarning yuklamasini oshirish va motorlarning salt ishlashiga yo'l qo'y maslik, ya'ni quvvat koeffitsientini oshirish kerak.</p> |
| Generatorning salt ishlash rejimida kuchlanishning bo'lmashligi.                                                                                   | Qo'zg'atgich kuchlanish bermayapti. Qo'zg'atgich bo'lmaganda esa boshqa qo'zg'atish qurilmalaridan biri ishdan chiqqan.                                                                                                                            | Qo'zg'atgich yoki boshqa qo'zg'atish qurilmasining nosozligiga barham berish lozim.                                                                                                                                                                              |
| Qo'zg'atgich kuchlanish bermayapti, qo'zg'atish zanjirida tok yo'q.                                                                                | Qo'zg'atish zanjiridagi kontaktlar yaxshi tegmagan yoki zanjir uzilgan.                                                                                                                                                                            | Qo'zg'atish zanjirining butunligi tekshirilib nosozlikka barham beriladi.                                                                                                                                                                                        |
| Generatorning salt ishlash holatida bitta fazada kuchlanish yo'q                                                                                   | Stator chulg'ami yulduz ulangan bo'lsa bitta faza uzilgan yoki uchburchak ulangan bo'lsa, ikkita fazaviy chulg'am ulangan joyda kontakt yo'q.                                                                                                      | Chulg'amlarning ulanish joylari tekshiriladi va nosozlikka barham beriladi yoki mashina kapital remontga jo'natiladi                                                                                                                                             |
| Sinxron motor rotorini tebranmaganda stator zanjiriga ulangan ampermetr va vattmetr strelkalari ham tebranmaydi, motor sinxronizmdan chiqib ketadi | <p>1. Yuklama juda tez o'zgargan bo'ladi.</p> <p>2. Tebranish birlamchi mexanizmdan uzatilayotgan bo'ladi.</p> <p>3. Tok chastotasi va kuchlanish katta chegaralarda o'zgaradi.</p>                                                                | <p>1. Qo'zg'atish tokini oshirish lozim.</p> <p>2. Qo'zg'atish tokini oshirish lozim.</p> <p>3. Qo'zg'atish chulg'amiga maksimal kuchlanish beriladi.</p>                                                                                                        |

| 1                                                                                                                                                                         | 2                                                                                                                                                 | 3                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Sinxron motor ulangandan va nominal yuklama o'rnatilgandan keyin stator toki sekin asta o'sib, eng katta qiymatiga erishadi va motor avtomatik ravishda tarmoqdan uziladi | Tezlashgan kommutatsiya tufayli qo'zg'atgichning asosiy qutblari bo'ylama o'q bo'yicha magnitlanadi, natijada rotor toki sekin asta oshib boradi. | Cho'tkalarining geometrik neytralda turganligini tekshirish lozim. |

### ***Nazorat savollari***

1. Bo'ylama va ko'ndalang o'qlari bo'yicha qo'zg'atiladigan sinxron mashinalarning tuzilishi va ishlash printsipini tushuntirib bering.
2. Asinxronlashtirilgan sinxron mashinaning tuzilishi va ishlash printsipi qanday?
3. O'ta o'tkazuvchan chulg'amli sinxron mashinani tuzilishi va o'ziga xos xususiyatlari qanday?
4. Katta quvvatli istiqbolli sinxron mashinalar haqida ma'lumot bering.
5. Sinxron mashinalarda uchraydigan nosozliklar va ularning oldini olish choralari haqida nima bilasiz?

---

## **IX bob. KUCH TRANSFORMATORLARINI EKSPLOATATSIYA QILISHGA OID AMALIY TAVSIYALAR VA ULARNING BELGILANISHLARI**

### **9.1. Kuch transformatorlarini ishlatishga oid umumiy ma'lumot, ularning nosozliklari va amaliy tavsiyalar**

**Umumiy ma'lumot.** Transformatorlarni ishlatishda quyidagi muhim jihatlarga ahamiyat berish lozim:

1) moyli transformator chulg'amlarining izolyatsiyasi «A» klassga tegishli bo'lib, uning normal ishlash temperaturasi standartda  $105^{\circ}\text{S}$  bilan cheklangan;

2) Parallel ulanadigan transformatorlar qisqa tutashuv kuchlanishlarining teng bo'lish shartining bajarilishi yuklamaning transformatorlararo taqsimlanishini normallashtiradi, ya'ni yuklama oshirilganda parallel ishlayotgan transformatorlar nominal quvvatiga bir vaqtda erishadilar. Agar guruhlar bir xil va transformatsiyalash koeffitsientlari teng, lekin qisqa tutashuv kuchlanishlari teng bo'lmagan ikkita transformator parallel ulansa, yuklama oshirilganda qisqa tutashuv kuchlanishi kichik bo'lgan transformator oldin nominal quvvatga erishadi va ikkinchi transformatordan to'la quvvatni olib bo'lmaydi. Chunki ikkinchi transformator nominal quvvatgacha yuklanganda birinchi transformatorning yuklamasi me'yordan oshib ketib, elektr isroflari ko'payadi va foydali ish koeffitsienti nisbatan kamayadi. Demak, bunda ham ish tejimli bo'lmaydi. Shu sababli parallel ulanadigan transformatorning qisqa tutashuv kuchlanishi ( $u_{st}$ ) ishlayotgan transformator(lar) qisqa tutashuv kuchlanishlarining o'rtacha arifmetik qiymatidan farqi 10 foizgacha bo'lishi mumkin. Bu talabni bajarish uchun ularning nominal quvvatlari 3:1 nisbatgacha bo'lishi lozim bo'ladi.

**Kuch transformatorlarini ishlatishda uchraydigan ba'zi bir nosozliklar va ularni bartaraf qilish bo'yicha amaliy tavsiyalar:** 1) o'ramlardagi nosozliklar ko'pchilik hollarda ularning chulg'amlaridagi o'ramlararo qisqa tutashuvi va izolyatsiyaning elektr teshilishidan korpusga beriladigan qisqa tutashuvlar tufayli sodir bo'ladi;



2) o‘ramlardagi qisqa tutashuvning belgilari: me’yordan ko‘p qiziydi, tarmoqqa ulangan chulg‘am toki oshadi hamda transformator chulg‘amiga oid har bitta fazasining o‘zgarmas tokda o‘lchangan qarshiligi har xil qiymatlarga ega bo‘ladi. Megaommetr vositasida izolyatsiyani tekshirish usuli bilan o‘ramlararo qisqa tutashuvini aniqlab bo‘lmaydi. Bu maqsadda Porozov tizimi asboblari komplektini qo‘llaydilar;

3) chulg‘amning fazalararo qisqa tutashuvida ajralib chiqqan gaz bosimi tufayli transformatorning chiqaruvchi truba membranasini buziladi va moyning bir oz qismi to‘plangan gaz bilan birga tashqariga chiqarib tashlanadi. Bunda transformatorlarning barcha himoya turlari (masalan: gaz, differentsial, maksimal tok himoyalari) ishga tushadi;

4) ishlaymay turgan transformator kengaytirgichidagi moy sathi nazorat chiziqlar sathidan past bo‘lmashligi lozim. Moy sathini ko‘rsatuvchi nazorat chiziqlari atrof muhit temperaturasi ( $-45$ ,  $+15$  va  $+40$  °S)ga mos keladi. Trubkali moy ko‘rsatgichda shu raqamlar bilan, strelkali moy ko‘rsatgichda esa «max,  $+15$ , min» belgilar orqali ifodalangan;

5) gaz relesi signal zanjirini ulaganda transformatorni tezda tekshirib, reledagi gazning rangi va yonuvchanlik darajasi bo‘yicha buzilish xarakteri aniqlanadi. Gaz sariq yoki qoramtir-ko‘k bo‘lsa, transformator tezda tarmoqdan o‘chiriladi; agar gaz rangsiz va yonmaydigan bo‘lsa transformatorni ish holatida qoldirish mumkin.

### ***Quyidagi nosozliklarda:***

a) uncha jiddiy bo‘lmagan ichki buzilishlar tufayli kuchsiz gaz hosil bo‘la boshlaganda;

b) transformatorga moyini quyish yoki uning moyini tozalash jarayonida havo aralashganda;

d) atrof muhit temperaturasining pasayishi yoki bakdan moyning ba’zi bir sabablarga ko‘ra tashqariga sizib chiqishi tufayli moy sathining sekin pasayishida gaz relesi signal zanjirini ulaydi.

Transformatorlar deb, ma’lum qiymatdagi o‘zgaruvchan tok kuchlanishini boshqa bir qiymatli o‘zgaruvchan tok kuchlanishiga o‘zgartiruvchi aylanuvchi qismga ega bo‘lmagan statik elektromagnit o‘zgartirgichga aytiladi.

Avtotransformatorlar deb, umumiy qismga ega bo‘lgan ikki yoki undan ko‘p chulg‘amlarga ega bo‘lgan transformatorlarga aytiladi.

Kuch transformatorlari deb, elektr tarmog'idagi elektr energiyani o'zgartirishga yoki to'g'ridan-to'g'ri iste'molchini energiya bilan ta'minlashga xizmat qiluvchi transformatorlarga aytiladi. Kuch transformatorlari umumiy qo'llaniladigan va alohida maqsadlarda qo'llaniladigan turlarga bo'linadi.

Ishlab chiqarilayotgan kuch transformatorlar quyidagi qabul qilingan belgilashlar (shunday ketma-ketlikda) bilan farqlanadi:

*A* — avtotransformator (transformator bo'lsa bu harf qo'yilmaydi);

*T* — uch fazali yoki *O* — bir fazali;

*P* — *PK* chulg'amining tashkil etuvchi o'ramlarining uchlari chiqarilganligini bildiradi.

Harfiy belgilashlardan keyin yozilgan kasrning suratidagi son transformatorning nominal quvvati kVA ni, mahrajidagi son esa YuK chulg'amining kuchlanish sinfini kV ni anglatadi.

9.1-jadvalda tabiiy moyli (M), moyli puflanuvchi (MD) va majburiy moyli puflanuvchi (DTs) sovitiluvchi ikki va uch chulg'amli umumiy qo'llaniladigan ba'zi kuch transformatorlarining texnik kursatkichlari keltirilgan.

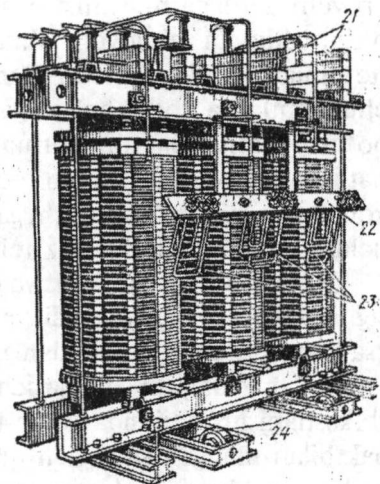
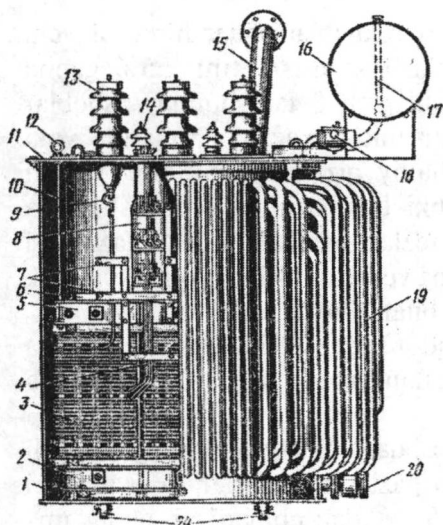
Sanoat korxonalarining kuch va yoritish elektr qurilmalarini elektr energiya bilan ta'minlashda moyli (9.1,*a*-rasm) va havoli (9.1,*b*-rasm) sovitiladigan ikki chulg'amli uch fazali kuch transformatorlari qo'llaniladi.

Tabiiy havo bilan sovitiladigan (ikkinchi nomi quruq) transformatorlar chulg'amlari kanallarining o'lchamlari uzaytirilgan bo'ladi, bu esa transformatorning eng ko'p qiziydigan qismlarini havo bilan sovitish sharoiti va issiqlik uzatilishini yaxshilanadi.

Havoli sovitiladigan transformatorlarning tarkibiy tuzilishi moyli sovitiladigan transformatorlarnikidan deyarli farq qilmaydi. Moyli sovitiladigan ikki chulg'amli uch fazali kuch transformatorini (9.1,*a*-rasm) tashkil etuvchi asosiy qismlari quyidagilardan iborat:

— qalinliga 0,35 yoki 0,5 mm bo'lgan elektrotexnik po'lat listlardan yig'ilgan qattiq konstruksiyali magnit o'tkazgich 6, yuqori va pastdan yarmo bilan mahkamlangan uch vertikal sterjenlardan tashkil topgan bo'ladi va magnit o'tkazgich yarmosining po'lat listlari 2 va 5 po'lat yarmo to'sinlari bilan zichlanadi;

| Rusumi                                                   | $U_k$ , % | Isroflar, kW |           | $I_0$ , % | Og'irligi, kg |       | O'lchamlari, mm |       |      |
|----------------------------------------------------------|-----------|--------------|-----------|-----------|---------------|-------|-----------------|-------|------|
|                                                          |           | $R_{x,yu}$   | $P_{q,t}$ |           | to'liq        | moy   | H               | L     | B    |
| a) Kuchlanish klassi 10 va 35 kV bo'lgan ikki chulg'amli |           |              |           |           |               |       |                 |       |      |
| TM-25/10                                                 | 4,5       | 0,125        | 0,600     | 3,2       | 0,380         | 0,130 | 1225            | 1120  | 460  |
| TM-40/10                                                 | 4,5       | 0,180        | 0,880     | 3,0       | 0,485         | 0,160 | 1270            | 1120  | 480  |
| TM-63/10                                                 | 4,5       | 0,265        | 1,280     | 2,8       | 0,600         | 0,190 | 1400            | 1120  | 450  |
| TM-100/10                                                | 4,5       | 0,36         | 1,970     | 2,6       | 0,720         | 0,220 | 1470            | 1200  | 1800 |
| TM-100/35                                                | 6,5       | 0,46         | 1,970     | 2,6       | 1,300         | 0,460 | 2200            | 1330  | 900  |
| TM-250/35                                                | 6,5       | 0,960        | 3,700     | 2,3       | 2,000         | 0,710 | 2320            | 1500  | 1250 |
| TM-630/10                                                | 6,5       | 2,000        | 7,600     | 2,0       | 3,500         | 1,000 | 2750            | 2100  | 1450 |
| b) Kuchlanish klassi 10 va 35 kV bo'lgan ikki chulg'amli |           |              |           |           |               |       |                 |       |      |
| TM-1000/10                                               | 5,5       | 2,45         | 12,2      | 1,4       | 4,70          | 1,54  | 2700            | 2700  | 1700 |
| TM-2500/10                                               | 6,5       | 4,60         | 25,00     | 1,0       | 8,00          | 2,270 | 3250            | 2350  | 2150 |
| TM-6300/10                                               | 6,5       | 9,00         | 46,5      | 0,8       | 16,90         | 4,91  | 3800            | 4250  | 3650 |
| TM-1000/35                                               | 6,5       | 2,75         | 12,2      | 1,5       | 5,70          | 1,95  | 2850            | 2600  | 1600 |
| TM-2500/35                                               | 6,5       | 5,10         | 25,0      | 1,1       | 9,00          | 2,48  | 3400            | 3550  | 2200 |
| TD-10000/35                                              | 7,5       | 14,50        | 65,0      | 0,8       | 21,20         | 5,20  | 4310            | 3000  | 3760 |
| TDTs-80000/35                                            | 9,0       | 65,00        | 330,0     | 0,6       | 78,50         | 12,00 | 6050            | 5940  | 4550 |
| d) Kuchlanish klassi 110 kV bo'lgan ikki chulg'amli      |           |              |           |           |               |       |                 |       |      |
| TMN-2500/110                                             | 10,5      | 6,5          | 22,0      | 1,5       | 24,5          | 10,2  | 4090            | 5120  | 3540 |
| TRDN-25000/110                                           | 10,5      | 36,0         | 120,0     | 0,8       | 67,2          | 20,0  | 5820            | 6580  | 4650 |
| TRDTsN-63000-110                                         | 10,5      | 73,0         | 260,0     | 0,65      | 107,2         | 28,5  | 6417            | 8300  | 4450 |
| e) Kuchlanish klassi 110 kV bo'lgan uch chulg'amli       |           |              |           |           |               |       |                 |       |      |
| TDTN-10000/110                                           | -         | 23           | 80        | 1,1       | 57B0          | 22B35 | 5865            | 7150  | 3380 |
| TDTN-25000/110                                           | -         | 45           | 145       | 1,00      | 77,7          | 23,6  | 6400            | 7400  | 4600 |
| TDTsTN-80000/110                                         | -         | 102          | 390       | 0,8       | 146,3         | 37,3  | 7200            | 9600  | 4800 |
| e) Kuchlanish klassi 220 kV bo'lgan ikki chulg'amli      |           |              |           |           |               |       |                 |       |      |
| TRDNG-32000/220                                          | 12,0      | 125          | 215       | 4,5       | 150           | 50,5  | 8350            | 8900  | 3500 |
| TDTs-400000/220                                          | 10,7      | 330          | 1300      | 1,5       | 297           | 50,5  | 8070            | 14600 | 8490 |



a)

b)

**9.1-rasm. Ikki chulgʻamli uch fazali transformatorlar:**

*a* – moy bilan sovutiladigan, *b* – tabiiy havoda sovutiladigan; 1 – bak, 2 va 5 – magnit oʻtkazgichning pastki va ustki yarmo toʻsinlari, 3 – YuK chulgʻami, 4 – almashlab ulagichga ulanuvchi rostlash uchlari, 6 – magnit uzatkich, 7 – yogʻoch plankalar, 8 – almashlab ulagich, 9 – dempfer (kompensator), 10 – koʻtariluvchi shpilka, 11 – bak qopqogʻi, 12 – koʻtaruvchi halqa, 13 va 14 – YuK va PK chulgʻamlarining chiqish qismlari, 15 – saqlagich quvuri, 16 – kengaytirgich (konservator), 17 – moy koʻrsatkich, 18 – gaz relesi, 19 – moy harakatlanuvchi quvurlar, 20 – moy chiqaruvchi quvur. 21 – PK chulgʻami chiqish qismlari mahkamlanadigan chini moslama, 22 – YuK chulgʻami rostlanuvchi chiqish uchlari oʻrnatilgan taxtacha, 23 – YuK chulgʻami rostlanuvchi chiqish qismlari, 24 – dumalagichlar.

– silindrik karkasga yassi yoki dumaloq izolyatsiyali simlardan bir yoki bir necha qatlamli qilib oʻralgan chulgʻamlar tashqi qismiga 3 joylashtiriladi;

– silliq, qovurgʻali yoki quvurgʻa devorchali oval shakldagi poʻlat bak 1, bakni germetik qilish maqsadida hamda turli oʻlchov asboblarni oʻrnatish uchun xizmat qiluvchi qopqogʻ 11.

Moyli sovutiladigan kuch transformatorlarga xizmat qilishni yengillashtir, ichki qismlarini shikastlanishdan va transformator moyining tez eskirishdan asrash maqsadida asboblardan jihozlangan boʻladi.

Transformator baki ichidagi moyning ustki qatlamidagi haroratni nazorat qilishga moʻljallangan termometr va termometrik signalizator,

past kuchlanishli elektr apparatlarni yuqori kuchlanishdan himoyalovchi eruvchi saqlagich, transformatsiyalash koefitsientini  $\pm 5\%$  gacha o'zgarishini ta'minlovchi almashlab ulagich 8 lar shunday asboblarch turkimiga kiradi. Bundan tashqari magnit o'tkazgich po'latida yoki chulg'amlarda sodir bo'ladigan mahalliy qizish qiymatining yuqori bo'lishi natijasida transformator ichki qismlarining emirilishini va natijada ularni o'rab turgan moyning tezkor parchalanishi va gaz relesi kontakt tizimiga ta'sir etuvchi gazlarning yuzaga kelishiga yo'l qo'ymaslik uchun transformatorlar gaz relesi 18 bilan jihozlanadi.

Arzimas shikastlanishlar va oz miqdorda gazlarning hosil bo'lganida signalizatsiya ishga tushadi va shikastlanishlar o'ta havfli bo'lganida esa transformator tarmoqdan uziladi.

Po'lat «yong'ini» natijasida va boshqa ichki qismlarining sezilarli shikastlanishi natijasida sodir bo'lgan gazlarni atmosferaga uzatuvchi bak bilan ulangan saqlagich quvuri 15, bakdan chiqarilgan chulg'am-larning uchlarni izolyatsiyalashga xizmat qiluvchi va taqsimlovchi qurilma shinalariga ulashni osonlashtiruvchi chinni izolyatorlar ichidan o'tkazilgan mis simlarning 13 va 14 chiqish qismlari, shuningdek, haroratning o'zgarib turishi natijasida moy hajmining o'zgarib turishini (ko'payishi yoki kamayishini) kompensatsiya qilish va bakning transformator moyi bilan to'liq to'ldirilganligini ta'minlashga xizmat qiluvchi kengaytirgich (konservator) 16 lar ham transformatorning asboblari turkumiga kiradi. Kengaytirgichning bo'lishi moyning atmosfera havosi bilan tegib turish yuzasining kamayishiga va shunday qilib moyning oksidlanishi va ho'llanishidan muhofazalanishi amalga oshiradi.

## **9.2. Transformatorlarning nuqsonlari va transformatorni bo'laklarga ajratish**

Transformatorning nuqsonlari deb, alohida qismlarining ishdan chiqish darajasi va tavsifini belgilovchi ishlar yig'indisiga aytiladi. Nuqsonlar sababini aniqlash juda mas'uliyatli ish bo'lib, bu jarayonda ta'mirlash ishlari hajmini aniqlash bilan bir qatorda ta'mirlash ishlarining texnologik ketma-ketligini ham belgilaydi. Shuning uchun transformatorlarda yuz beradigan nuqsonlarning belgilari va sabablarini bilish bilan birga ularni tez aniqlash va bartaraf etish usullarini ham bilish lozim. Transformatorlarda eng ko'p uchraydigan nuqsonlar va ularni yuzaga keltiradigan sabablar 9.2-jadvalda keltirilgan.



## Kuch transformatorlarida uchraydigan eng ko'p nuqsonlar

| Transformatorning elementlari  | Nuqson                                                                                                          | Nuqsonning sababi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                              | 2                                                                                                               | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Chulg'am                       | O'ramlar orasidagi qisqa tutashuv.<br>Korpusga ulanib qolishi, fazalararo qisqa tutashuv<br>Zanjirning uzilishi | Izolyatsiyaning tabiiy eskirishi va yemirilishi, transformatorning mun-tazam nominaldan yuqori yuklanishda ishlashi, teshib o'tgan qisqa tuta-shuvlardagi dinamik zo'riqishlar.<br>Izolyatsiyaning eskirishi yoki moy-niing namlanishi.<br>Chulg'am chiqish qismlarining ku-yishi, chiqish qismlarining sifatsiz kavsharlash yoki payvandlash natijasida ulanishlarning buzilishi.      |
| Kuchlanishni almashlab ulagich | Kontaktning yo'qligi.<br>Kontaktli yuzaning erishi.                                                             | Almashlab ulagich qurilmasi rost-lanishi buzilgan.<br>Qisqa tutashuv vaqtida kontaktlarga bo'lgan termik ta'sir.                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Chiqish qismlari.              | Korpusga ulanib qolish.<br><br>Ba'zi fazalarning chiqish qismlarining o'zaro ulanib qolishi.                    | Izolyatorlarda darz ketishi, izol-yatorning ichki qismi ifloslanishi bilan bir paytda transformatoridagi moy dara-jasining kamayishi.<br>Chiqish qismlariga yoki almashlab ulagichga ulangan chiqish simlari izolyatsiyasining ishdan chiqishi.                                                                                                                                         |
| Magnit o'tkazgich              | Salt yurish tokining oshishi.<br>Po'lat «yong'ini».                                                             | Magnit o'tkazgich po'lat listlari orasidagi zichlik buzilgan.<br>Ba'zi po'lat plastinkalar orasidagi izolyatsiyaning yoki tortuvchi boltlar-niing izolyatsiyalari ishdan chiqqanligi; plastinkalarning zichligi buzilgan, mag-nit o'tkazgich va yarmo orasidagi izol-yatsion oraliq material izolyatsiyasining ishdan chiqqanligi natijasida qisqa tu-tashgan konturning hosil bo'lishi |
| Bak va uning moslamalari.      | Flanetsli birikmalar-dan, kranlardan va payvand choklaridan moyning sizishi.                                    | Harorat va mexanik ta'sirlar nati-jasida payvand choklarining buzilishi, kran probkasi yaxshi tortilmagan, fla-nets ichki qatlami ishdan chiqqan.                                                                                                                                                                                                                                       |



Transformator tashqi qismlarining (kengaytiruvchi, bak, bak moslamalari, simlarning chiqish uchlarining tashqi qismi, teshuvchi saklagich) nosozligini ko'zdan kechirish orqali oson aniqlash mumkin. Ichki qismlarining nosozligini aniqlash uchun esa turli sinovlarni o'tkazishga to'g'ri keladi. Biroq sinovlar hamisha ham nosozliklar to'g'risida to'liq axborot bera olmaydi. Shuning uchun nosozlik sabablarini aniqlashda odatda transformator bo'laklarga ajratiladi, nosozlikning tavsifi, sababi va nosozlik ko'lamini aniqlash bilan bir qatorda ta'mirlash uchun qancha materiallar sarf bo'lishi va qanday asbob-uskunalar kerak bo'lishi ham aniqlanadi.

Transformatorni bo'laklarga ajratishdagi ketma-ketlik transformatorning konstruksiyasiga bog'liq. Transformatorni to'liq bo'laklarga ajratishda kengaytirgich orqali moy transformator qopqog'ining zichlovchi qatlamidan quyi sathigacha bo'shatiladi va avval kengaytiruvchi qopqoqdan ajratilib olinadi, so'ngra yechib olinadi. Agar kengaytiruvchidan qopqoqqa ketuvchi trubkachaga gaz relesi o'rnatilgan bo'lsa, u holda bo'laklarga ajratishni gaz relesini demontaj qilish bilan boshlanadi. Trubkachani olib bak qopqog'idagi teshik, bakdagi moy ifloslanmasligi va namlanmasligi uchun tiqin (zaglushka) bilan berkitiladi. Transformatorni bo'laklarga ajratishda gaz relesi, termometr, termosignalizator, moy ko'rsatkich, rezina qatlamchalar va mahkamlovchi detallarni ehtiyot qilish choralari ko'riladi.

Qopqoq va u bilan birga chiquvchi qismlari mahkam ushlagichlar va ko'tarish mexanizmlari (tal, kran) yordamida ko'tariladi. Ko'tarish halqalari yordamida mahkam ushlagichlar qopqoqqa mahkamlanadi. Transformator konstruksiyasida bunday halqachalarning bo'lishi ko'zda tutilmagan bo'lsa, u holda qopqoqni bakka mahkamlashda qo'llaniladigan teshikchalarga vaqtincha o'rnatilgan halqachalarga metall tros maxkamlanadi. Qopqoqni ko'tarish uchun qopqoq perimetri bo'yicha gaykalar bo'shatiladi va boltlar olinadi. Qopqoq 10–15 mm ga ko'tariladi, zichlovchi qatlamning holati ko'zdan kechiriladi va undan keyin ham foydalanish maqsadida ehtiyotlik choralari ko'riladi. Ko'pincha qatlamga bakelitli lak suriladi va shuning uchun ham u bak ramasiga yoki transformator qopqog'iga mustahkam yopishgan bo'ladi. Qatlamni shikastlantirib qo'ymaslik uchun uni bak ramasidan pichoq yordamida asta ajratiladi. Bu ish bak bilan qopqoq orasidagi tirqishga barmoqlar kirib qolishiga yo'l qo'ymaslik uchun ehtiyot bo'lib bajariladi.

Chulg'amlarning chiqish qismlari qopqoqda emas, balki bak devoriga o'rnatilgan transformatorlarda qopqog'ini olishdan oldin chiqish qismlari izolyatorlar o'rnatilgan teshikchalar sathidan 80–100 mm pastga tushguncha bakdagi moy chiqarib tashlanadi, chiqish qismlari chulg'amlardan uziladi, izolyator demontaj qilinadi va shundan so'nggina o'zakni bakdan ko'tarib olinadi.

Transformatorni ko'zdan kechirish, bo'laklarga ajratish va ichki qismlarining nuqsonlarini aniqlash bino ichida amalga oshiriladi. Transformatorni bo'laklarga ajratish, atrof-muhit harorati transformator ichki qismlari haroratidan past yoki juda bo'lmaganda teng bo'lganda amalga oshiriladi. Atrof-muhit harorati transformator ichki qismlari haroratidan yuqori bo'lganida havodagi namlik chulg'amlarning yuzasida suv tomchilari holatiga keladi va natijada chulg'amlar izolyatsiyasining elektr mustahkamligini buzadi.

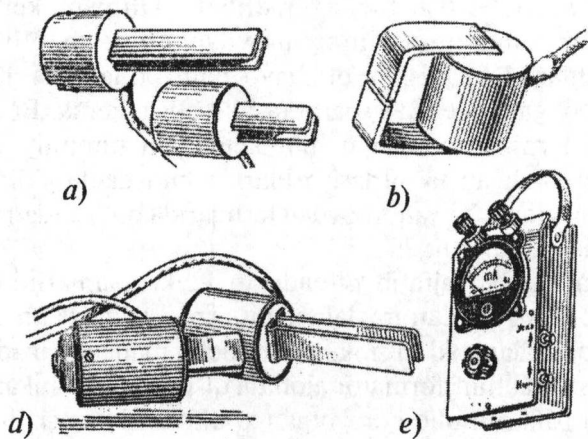
Transformatorni bir necha soat bo'laklarga ajratish uchun mo'ljallangan xonada saqlanib yoki o'zakni qisqa tutashuv usuli bilan qizdirish natijasida transformator ichki qismlarining harorati oshiriladi va keyin o'zakni ko'tarish amalga oshiriladi. O'zakni qisqa tutashuv usuli bilan qizdirish uchun PK chulg'ami qismlari qisqa tutashtiriladi va YuK chulg'ami uchlariga 127, 220 yoki 380 V kuchlanish beriladi. Transformator ichki qismlari haroratining qiymati atrof-muhit haroratidan 10–15 °S yuqori bo'lishigacha erishiladi. Olinishi kerak bo'lgan transformator ichki qismlarining moydan chiqarib olingandan to ta'mirlash ishlarini tugatish vaqti havo nam bo'lganida 12 soatni va havo quruq bo'lganida esa 16 soatni tashkil etishi kerak. Bu cheklashlar transformatorlarni ta'mirlash uchun ketadigan umumiy vaqt 10–15 soatni tashkil etadigan ta'mirlash ishlari uchun taalluqlidir, aks holda chulg'amlarning qancha vaqt moydan tashqarida bo'lishidan qat'iy nazar baribir quritish talab etiladi.

Transformatoridan ajratib olinadigan ichki qismlarini ko'tarishda troslar va mexanizmlardan foydalaniladi. Tros va maxkam ushlagichlar ko'tarish halqachalar yoki to'sinlarga ishonchli mahkamlanadi. Ko'tarish ishlarini bajarishda transformator alohida qismlarining shikastlanishidan va ta'mirlash ishlarini olib borayotgan xodimlarni baxtsiz hodisalardan saqlash choralari ko'rilishi lozim. O'zak bakdan to'liq 200 mm dan kam bo'lmagan balandlikka ko'tariladi va bakni chetga surib qo'yiladi. Ko'tarilgan o'zak tagiga kirish va uni shu vaqt ichida ko'zdan kechirish qat'iy man etiladi. Ko'zdan kechirish, keyinchalik bo'laklarga ajratish

va ta'mirlash uchun transformatorning ichki qismlari randalangan yog'och taxtadan yasalgan supacha ustiga qo'yiladi. Supachaning balandligi 0,3–0,5 m bo'lishi kerak. Chulg'amlarni ko'zdan kechirishdan oldin iflosliklardan tozalanadi va 35–40 °S gacha qizdirilgan transformator moyi oqimi bilan yuviladi.

Transformator to'liq bo'laklarga ajratilganidan keyin har bir qismi sinchkovlik bilan ko'zdan kechiriladi. Aniqlangan nosozliklar nosozliklar xaritasida qayd etiladi.

Chulg'amlarning nosozliklarini aniqlashda o'ramlar orasidagi qisqa tutashuvlarning borligi va qayerda sodir bo'lganligini bilish ma'lum qiyinchiliklar tug'diradi. Shu qiyinchiliklarni bartaraf etish uchun konstruktiv sodda, ishlatish uchun qulay asboblarga qo'llaniladi (misol uchun Porozov asbobi). Bu o'lchov asbobi ko'p chulg'amli g'altakka kiygizilgan *P* – shaklli o'zak-sektsiyali izlagich (9.2, *a*-rasm) yoki uchlari tor tirqishli *S* – ko'rinishli o'zaktirqishli izlagich (9.2, *b*-rasm) ko'rinishda bo'lishi mumkin. Bu asbobning ta'minlovchi qismi ikki xil ko'rinishda bo'ladi: *P* – shakldagi o'zakli ta'minlovchi nisbatan quvvatliroq g'altakli bo'lib, sektsiyali izlagichga monand, yon chekkasida qisqa muddatga ulanishni bajaruvchi tugmasi ham bor (9.2, *d*-rasm). Asbobning indikator qismi bir korpusga to'g'irlagich, kuchaytirgich va sezgirlik rostlagichi o'rnatilgan hamda mikroampermetrdan iborat bo'ladi.

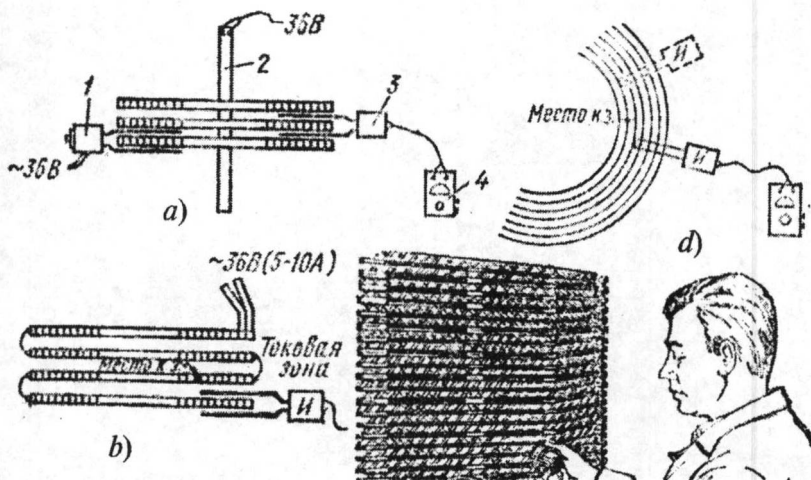


9.2-rasm. Transformatorlarning chulg'amlaridagi qisqa tutashuv joylarini aniqlovchi asboblari:

*a* – sektsiyali izlovchi; *b* – tirqishli izlovchi; *d* – sektsiyali ta'minlovchi;  
*e* – indikator

Bir simli seksiyali chulg'amlardagi qisqa tutashuvlarni aniqlash quyidagicha amalga oshiriladi. Sterjenli ta'minlovchi 2 kuchlanishi qiymati 36, 127 yoki 220 V bo'lgan tarmoqqa ulanadi va tekshiriliyotgan chulg'amga qistiriladi (9.3,a-rasm), so'ngra ta'minlovchi qo'yilgan tomonning teskari tomoniga navbatma-navbat har bir seksiyasiga izlovchi 3 ulab chiqiladi. O'ramlar orasida qisqa tutashuv bo'lsa, o'lchov asbobi mili siltanib og'adi. Radius yo'nalishi bo'yicha qisqa tutashgan joyini aniqlash uchun, izlovchini shikastlangan seksiyaning yonidagi seksiyasiga qistirilib va mikroampermetr milini kuzatgan holda uni asta harakatlantiriladi (9.3,b-rasm). Izlovchi uchlarning chulg'am ichkarisiga kirib borishi natijasida mikroampermetrning ko'rsatishi ham oshib boradi va izlovchining uchlari xuddi qisqa tutashtirilgan o'ramlar ustiga kelganida bu ko'rsatkich eng katta qiymatga ega bo'ladi. Izlovchining qanchalik ichkariga kirib borganligi va chulg'am o'ramlari kengligini bilgan holda chulg'amlarning har qanday diametridagi uramlarning qisqa tutashgan joyini aniqlash mumkin.

Silindrlı bir qatlamli chulg'amni tekshirish uchun kuchlanish qiymati rostlanadigan har qanday manbaga ulanilib undan 5–10 A o'zgaruvchan



9.3-rasm. Kuch transformatorlari chulg'amlari o'ramlaridagi qisqa tutashuv joyini aniqlash:

a — chulg'am vertikalı bo'yicha, b — radius yo'nalishi bo'yicha, d — chulg'amning gorizontali bo'yicha; 1 — seksiyali ta'minlovchi, 2 — sterjenli ta'minlovchi, 3 — izlovchi, 4 — indikator

tok o'tkaziladi. So'ngra tirqishli izlovchini chulg'am o'ramlari ustidan gorizontaal bo'yicha chulg'am boshidan to manba ulangan tomonga qarab sekin harakatlantiriladi (9.3, *d*-rasm). Mikroampermetrning birinchi eng katta qiymatni ko'rsatishi tok «chegasini» bildiradi. Shundan so'ng izlovchi uchini o'ram qadami bo'yicha mikroampermetr ko'rsatishi kamayishi boshlanguncha harakatlantiriladi. O'ramlarning qisqa tutashuv nuqtasi, mikroampermetr ko'rsatishi pasaygan nuqtada, vertikal yo'nalishdagi bitta sim tepasidagi simda bo'ladi. Bu usulni har qanday parallel sonli chulg'amlar uchun ham qo'llash mumkin.

Ikki qatlamli chulg'amlarni tekshirish ham xuddi seksiyali chulg'amlarni tekshirishdagi kabi ketma-ketlikda amalga oshiriladi.

### ***Nazorat savollari***

1. Transformatorlarni ishlatishda ularga qo'yiladigan asosiy talablar nimalardan iborat?
2. Kuch transformatorlarini ishlatishda uchraydigan asosiy nosozliklar nimalardan iborat?
3. Transformatorning moy ko'rsatkichidagi belgilar nimalar?
4. Qanday nosozliklarda gaz relesi signal zanjirini ulaydi?
5. Kuch transformatorlari tiplarini sharhlang.

# I L O V A

## Xalqaro birliklar sistemasi (SI)dagi «elektr va magnetizm» birliklariga oid namunalar

| №  | Kattalik nomi                              | Birliklar                 |                  |                  |                                                                                                                                                                                                    |
|----|--------------------------------------------|---------------------------|------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                                            | Nomi                      | Belgisi          |                  | Ta'rif va aniqlash<br>formulasi                                                                                                                                                                    |
|    |                                            |                           | Xalqaro          | O'zbekcha        |                                                                                                                                                                                                    |
| 1  | 2                                          | 3                         | 4                | 5                | 6                                                                                                                                                                                                  |
| 1. | Elektr zaryad                              | Kulon                     | C                | Kl               | 1 s vaqt ichida ko'ndalang kesimdan o'tadigan 1 A tok kuchiga ega elektr miqdori.<br>$q = I \cdot t$                                                                                               |
| 2. | Elektr maydon kuchlanganligi               | Volt taqsim metr          | V/m              | V/m              | Kuchlanganligi.<br>$E = F / q$                                                                                                                                                                     |
| 3. | Elektr kuchlanish; elektr yurituvchi kuch; | Volt                      | V                | B                | Elektr zanjirida quvvat 1 W, elektr kuchi 1 A bo'lganda o'zgarmas tok hosil qg'ladi-gan elektr kuchlanish.<br>$U = -E = \varphi_1 - \varphi_2$                                                     |
| 4. | Elektr sig'imi                             | Farad                     | F                | F                | Zaryadi 1 Kl bo'lganda qat-lamlari orasidagi kuchla-nish 1 V ga teng konden-sator sig'imi.<br>$C = q / U$                                                                                          |
| 5. | Elektr tok zichligi                        | Amper taqsim metr kvadrat | A/m <sup>2</sup> | A/m <sup>2</sup> | 1 m <sup>2</sup> ko'ndalang kesim yuza-ga teng taqsimlangan 1 A elektr tok kuchi zichligi.<br>$J = I / S$                                                                                          |
| 6. | Magnit maydon kuchlanganligi               | Amper taqsim metr         | A/m              | A/m              | Tekis taqsimlangan o'ram-laridan 1/w A tok kuchi o'tadigan (bu yerda w – so-lenoidning 1 m uzunligidagi o'ramlari soni) uzun sole-noid markazadagi magnit maydon kuchlanganligi.<br>$H = I / \ell$ |



| 1   | 2                                           | 3                 | 4   | 5   | 6                                                                                                                                                                                                                             |
|-----|---------------------------------------------|-------------------|-----|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7.  | Magnit yurituvchi kuch                      | Amper             | A   | A   | O'zgarmas 1 A tok o'tib turgan kontur bilan tutashgan yopiq zanjirning magnit yurituvchi kuchi.<br>$F_{\max} = wI$                                                                                                            |
| 8.  | Magnit induktsiyasi                         | Tesla             | T   | Tl  | Ko'ndalang kesimi 1 m <sup>2</sup> bo'lgan yuzadan 1 Vb magnit oqimi o'tganda hosil bo'ladigan magnit induktsiyasi.<br>$B = F / (qv)$                                                                                         |
| 9.  | Magnit oqimi; oqim ilashishi                | Veber             | Wb  | Vb  | Magnit oqimi nolgacha kamaya borayotganida u bilan tutashgan, qarshiligi 1 Om bo'lgan elektr zanjiri o'tkazgichining ko'ndalang kesimi orqali o'tadigan 1 Kl elektr miqdoridir.<br>$\Phi = B \cdot S, \quad \Psi = w \cdot F$ |
| 10. | Induktivli; O'zaro induktivlik              | Genri             | H   | Gn  | 1 A o'zgarmas tok kuchida 1 Vb magnit oqimi bilan tutashadigan elektr zanjirining induktivligi.<br>$L = \Psi / I, \quad M = \Psi / I$                                                                                         |
| 11. | Magnitlanganlik (magnitlanganlik jadalligi) | Amper taqsim metr | A/m | A/m | Magnit momenti 1 A·m <sup>2</sup> ga teng bo'lgan 1 m <sup>3</sup> hajmli moddaning magnitlanganlik miqdori.<br>$J = p_m / V,$<br>(bunda $p_m$ – tokli zanjirning magnit momenti)                                             |
| 12. | Elektr qarshilik                            | Om                | Ω   | Om  | O'zgarmas tok kuchi 1 A bo'lganda ikki uchi orasida 1 V kuchlanish hosil bo'ladigan o'tkazgichning qarshiligi.<br>$R = U / I$                                                                                                 |

| 1   | 2                                  | 3                  | 4                | 5            | 6                                                                                                                                                                              |
|-----|------------------------------------|--------------------|------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 13. | Elektr o'tkazuvchanlik             | Simens             | S                | Sm           | Qarshiligi 1 Om bo'lgan o'tkazgichning elektr o'tkazuvchanligi.<br>$G = 1/R = I/U$                                                                                             |
| 14. | Solishtirma elektr qarshilik       | Om-metr            | $\Omega \cdot m$ | Om $\cdot$ m | Ko'ndalang kesim yuzasi 1 m <sup>2</sup> , uzunligi 1 m, 1 Om qarshilikka ega o'tkazgichning solishtirma elektr qarshiligi.<br>$\rho = RS/\ell$                                |
| 15. | Solishtirma elektr o'tkazuvchanlik | Simens taqsim metr | S/m              | Sm/m         | Ko'ndalang kesim yuzasi 1 m <sup>2</sup> , uzunligi 1 m, 1 Sm elektr o'tkazuvchanlikka ega o'tkazgichning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi.<br>$\gamma = 1/\rho' = G\ell/S$ |
| 16. | Magnit qarshilik                   | Amper taqsim veber | A/Wb             | A/Vb         | Magnit zanjirining 1 A magnit yurituvchi kuchi 1 Vb magnit oqimi hosil qilgandagi magnit qarshiligi.<br>$R_m = F_m / \Phi$                                                     |
| 17. | Magnit o'tkazuvchanlik             | Veber taqsim amper | Wb/A             | Vb/A         | Magnit zanjirining qarshiligi 1 Gn <sup>-1</sup> bo'lgandagi magnit o'tkazuvchanlik.<br>$G_m = 1/R_m = \Phi / F_m$                                                             |
| 18. | Aktiv quvvat                       | Vatt               | W                | W            | Elektr zanjiridagi 1 W mexanik quvvatga ekvivalent bo'lgan bir fazali o'zgaruvchan tokning aktiv quvvati.<br>$P = UI \cos \varphi$                                             |
| 19. | Elektromagnit energiya             | Joul               | J                | J            | 1 J ishga ekvivalent bo'lgan elektromagnit energiya.<br>$W = P_{cm} \cdot t$                                                                                                   |

## FOYDALANGAN ADABIYOTLAR

1. Копылов И.П. Электрические машины. —М.: «Высшая школа», 2000.
2. Иванов — Смоленский А. В. Электрические машины. В двух томах. —М.: МЭИ, 2004.
3. Сукманов В. И. Электрические машины и аппараты. —М.: «Колос», 2001.
4. Бут Д. А. Основы электромеханики. —М.: изд-во МАИ, 1996.
5. Епифанов А. П. Электромеханические преобразователи энергии. —СПб.: изд-во «Лань», 2004.
6. Беспалов В. Я., Котеленец Н. Ф. Электрические машины. —М.: Издательский центр «Академия», 2006.
7. Грищенко А. В., Стрекопытов В. В. Электрические машины и преобразователи подвижного состава. —М.: Издательский центр «Академия», 2005.
8. Salimov J.S., Pirmatov N.B. Elektr mashinalari. —T.: «O'qituvchi», NMIU, 2005.
9. Salimov J.S., Pirmatov N.B. Elektr mashinalari. —T.: «O'zbekiston faylasuflari milliy jamiyati» nashriyoti, 2011. 408-b.
10. Salimov J.S., Pirmatov N.B. Transformatorlar va avtotransformatorlar. —T.: «Vektor-Press», 2010. 224-bet.
11. Pirmatov N.B. Transformatorlarni ta'mirlash. —T.: «Cho'lpon» nashriyot-matbaa ijodiy uyi, 2007. 62-bet.
12. Pirmatov N.B. Transformatorlarni ishlab chiqarish texnologiyasi. —T.: «Cho'lpon» nashriyot-matbaa ijodiy uyi, 2006. 56-bet.

---

---

## MUNDARIJA

|                     |   |
|---------------------|---|
| <b>Kirish</b> ..... | 3 |
|---------------------|---|

### **I bob. ELEKTROMEXANIK SISTEMANING ENERGIYASI KUCHLARI. ELEKTR YURUTUVCHI KUCHLAR**

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1. Energiya turlarining balansi .....                                                     | 4  |
| 1.2. Tokli qo'zg'almas o'tkazgichli sistemaning energiyasi .....                            | 5  |
| 1.3. Nochiziqlikni ta'siri .....                                                            | 8  |
| 1.4. Kuchning energiya uzgarishi orqali ifodasi .....                                       | 8  |
| 1.5. O'zaro induktivlik o'zgargan holdagi konturlar orasidagi<br>kuchlar va momentlar ..... | 10 |
| 1.6. Elektromexanik sistemaning elektr yurutuvchi kuchi .....                               | 11 |
| <i>Nazorat savollari</i> .....                                                              | 12 |

### **II bob. IDEALLASHTIRILGAN ELEKTROMEXANIK O'ZGARTGICHNING UMUMIY NAZARIYASI**

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Fizik model .....                                                    | 13 |
| 2.2. Havo bo'shlig'idagi magnit maydoni. Chulg'am funktsiyasi .....       | 14 |
| 2.3. Chulg'amning oqim ilashimligi va induktivligi .....                  | 18 |
| 2.4. Idiallashtirilgan mashinaning momenti .....                          | 22 |
| 2.5. Chulg'amlar hosil qilgan magnit maydonlar .....                      | 27 |
| 2.6. Chulg'amning elektr yurituvchi kuchi .....                           | 30 |
| 2.7. Havo bo'shlig'idagi maydonning chulg'am kuchlariga bog'likligi ..... | 32 |
| <i>Nazorat savollari</i> .....                                            | 35 |

### **III bob. ELEKTR MASHINANING UMUMLASHGAN MODELI**

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Umumiy tushuncha .....                                                | 36 |
| 3.2. Elektr mashinanig umumlashgan modeli<br>(Vudson va Uayt modeli) ..... | 37 |
| 3.3. Elektr mashinaning asosiy turkumlari .....                            | 40 |
| <i>Nazorat savollari</i> .....                                             | 41 |

**IV bob. TURLI TURKUMDAGI ENERGIYANI  
ELEKTROMEXANIK O'ZGARTGICHDAGI  
ASOSIY BOG'LANISHLAR**

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1. Ko'p fazali sinxron mashina .....                                   | 42 |
| 4.2. Ko'p fazali asinxron mashina .....                                  | 44 |
| 4.3. O'zgarmas tok elektr mashinasi .....                                | 48 |
| 4.4. Elektromexanik o'zgartgichlarning ekvivalent elektr sxemalari ..... | 51 |
| <i>Nazorat savollari</i> .....                                           | 54 |

**V bob. ELEKTR ENERGIYASINI TRANSFORMATSIYALOVCHI  
ELEKTROMAGNIT QURILMALAR**

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| 5.1. Chulg'amlarning qutbiyligi .....                  | 55 |
| 5.2. Transformatorning ekvivalent elektr sxemasi ..... | 57 |
| <i>Nazorat savollari</i> .....                         | 60 |

**VI bob. ELEKTROMEXANIK O'ZGARTGICHLARNING  
(ELEKTR MASHINALARINING) QIZISHI VA  
ULARNI SOVITISH. ISH REJIMLARI**

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 6.1. Elektr mashinalarining qizishi .....             | 61 |
| Elektr mashinalarining asosiy nominal rejimlari ..... | 65 |
| <i>Nazorat savollari</i> .....                        | 67 |

**VII bob. ASINXRON ELEKTROMEXANIK O'ZGARTGICHLARNING  
ZAMONAVIY TURLARI**

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.1. Asinxron motorlarning zamonaviy turlari .....                                                                                     | 68 |
| 7.2. Asinxron motorlarning ayrim nosozliklari va ularni bartaraf qilish .....                                                          | 68 |
| 7.3. Mustaqil davlatlar hamdo'stligi mamlakatlarida ishlab chiqarilayotgan<br>asinxron mashinalar va ularning istiqbolli turlari ..... | 70 |
| <i>Nazorat savollari</i> .....                                                                                                         | 72 |

**VIII bob. SINXRON ELEKTROMEXANIK O'ZGARTGICHLARNING  
ISTIQBOLLI TURLARI**

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 8.1. Bo'ylama — ko'ndalang o'qlari bo'yicha qo'zg'atiladigan<br>sinxron mashinalar ..... | 73 |
| 8.2. Asinxronlashtirilgan sinxron mashinalar .....                                       | 74 |
| 8.3. O'ta o'tkazuvchan chulg'amli sinxron mashinalar .....                               | 75 |

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 8.4. Katta quvvatli istiqbolli sinxron mashinalar .....                                             | 76 |
| 8.5. Sinxron mashinalarda uchraydigan ayrim nosozliklar<br>va ularni bartaraf qilish yo'llari ..... | 78 |
| <i>Nazorat savollari</i> .....                                                                      | 80 |

***IX bob. KUCH TRANSFORMATORLARINI EKSPLUATATSIYA  
QILISHGA OID AMALIY TAVSIYALAR VA  
ULARNING BELGILANISHLARI***

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 9.1. Kuch transformatorlarini ishlatishga oid umumiy ma'lumot,<br>ularning nosozliklari va amaliy tavsiyalar ..... | 81 |
| 9.2. Transformatorning nuqsonlari va transformatorni<br>bo'laklarga ajratish .....                                 | 86 |
| <i>Nazorat savollari</i> .....                                                                                     | 92 |

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I l o v a. Xalqaro birliklar sistemasi (SI)dagi «elektr va magnetizm»<br>birliklariga oid namunalar ..... | 93 |
| Foydalanilgan adabiyotlar .....                                                                           | 96 |



---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение .....                                                                                      | 3  |
| <b>Глава 1. ЭНЕРГИЯ, СИЛЫ И ЭДС В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ</b>                                  |    |
| 1.1. Баланс видов энергии .....                                                                     | 4  |
| 1.2. Энергия системы неподвижных проводников с током .....                                          | 5  |
| 1.3. Влияние нелинейности .....                                                                     | 8  |
| 1.4. Выражение сил через измерение энергии .....                                                    | 8  |
| 1.5. Силы и момент между контурами, выражение через изменение взаимной индуктивности .....          | 10 |
| 1.6. ЭДС в электромеханической системе .....                                                        | 11 |
| Контрольные вопросы .....                                                                           | 12 |
| <b>Глава 2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ИДЕАЛИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ</b>         |    |
| 2.1. Физическая модель .....                                                                        | 13 |
| 2.2. Магнитное поле в воздушном зазоре. Обмоточная функция .....                                    | 14 |
| 2.3. Потокосцепление и индуктивности обмотки .....                                                  | 18 |
| 2.4. Момент идеализированной электрической машины .....                                             | 22 |
| 2.5. Магнитные поля, создаваемые обмотками .....                                                    | 27 |
| 2.6. ЭДС обмотки .....                                                                              | 30 |
| 2.7. Связь поля в воздушном зазоре с напряжением обмотки .....                                      | 32 |
| Контрольные вопросы .....                                                                           | 35 |
| <b>Глава 3. ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ</b>                                              |    |
| 3.1. Общее соображение .....                                                                        | 36 |
| 3.2. Обобщенная модель электрической машины<br>(модель Вудсона и Уайта) .....                       | 37 |
| 3.3. Основные типы электрических машин .....                                                        | 40 |
| Контрольные вопросы .....                                                                           | 41 |
| <b>Глава 4. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ</b> |    |
| 4.1. Многофазная синхронная машина .....                                                            | 42 |
| 4.2. Многофазная асинхронная машина .....                                                           | 44 |
| 4.3. Электрическая машина постоянного тока .....                                                    | 48 |
| 4.4. Эквивалентные электрические схемы электромеханических преобразователей .....                   | 51 |
| Контрольные вопросы .....                                                                           | 54 |

## **Глава 5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭНЕРГИИ (ТРАНСФОРМАТОРЫ)**

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| 5.1. Полярность обмоток .....                               | 55 |
| 5.2. Эквивалентная электрическая схема трансформатора ..... | 57 |
| <i>Контрольные вопросы</i> .....                            | 60 |

## **Глава 6. НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ (ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН). РАБОЧИЕ РЕЖИМЫ**

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 6.1. Нагрев электрических машин .....                      | 61 |
| 6.2. Основные номинальные режимы электрических машин ..... | 65 |
| <i>Контрольные вопросы</i> .....                           | 67 |

## **Глава 7. СОВРЕМЕННЫЕ ТИПЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.1. Современные типы асинхронных двигателей .....                                | 68 |
| 7.2. Некоторые неисправности асинхронных двигателей и<br>пути их устранения ..... | 68 |
| 7.3. Асинхронные машины выпускаемых в странах СНГ и<br>их современные типы .....  | 70 |
| <i>Контрольные вопросы</i> .....                                                  | 72 |

## **Глава 8. СОВРЕМЕННЫЕ ТИПЫ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 8.1. Машины продольно-поперечного возбуждения .....                         | 73 |
| 8.2. Асинхронизированные синхронные машины .....                            | 74 |
| 8.3. Сверхпроводниковые синхронные машины .....                             | 75 |
| 8.4. Синхронные машины большой мощности .....                               | 76 |
| 8.5. Некоторые неисправности синхронных машин и<br>пути их устранения ..... | 78 |
| <i>Контрольные вопросы</i> .....                                            | 80 |

## **Глава 9. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ЭКСПЛУАТАЦИЮ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ИХ ОБОЗНАЧЕНИЯ**

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 9.1. Общие сведения по эксплуатации силовых трансформаторов,<br>их неисправности и практические рекомендации ..... | 81 |
| 9.2. Неисправности трансформаторов и разделение<br>трансформатора к частям .....                                   | 86 |
| <i>Контрольные вопросы</i> .....                                                                                   | 92 |
| Приложение. Международных системах единиц (СИ)<br>«электричество и магнетизм» .....                                | 93 |
| Использованные литературы .....                                                                                    | 96 |

## CONTENTS

|                                                                                                           |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Introduction .....</b>                                                                                 | <b>3</b> |
| <br><b>Chapter 1. ENERGY, POWER AND EDS IN ELECTROMECHANIC SYSTEM</b>                                     |          |
| 1.1. Balance type to energy .....                                                                         | 4        |
| 1.2. Energy of the system still conductor with current .....                                              | 5        |
| 1.3. Influence .....                                                                                      | 8        |
| 1.4. Expression of power through measurement of the energy .....                                          | 8        |
| 1.5. Power and moment between sidebar, expression through change<br>the mutual inductance .....           | 10       |
| 1.6. EDS in electromechanic system .....                                                                  | 11       |
| <i>Checking questions</i> .....                                                                           | 12       |
| <br><b>Chapter 2. GENERAL QUESTIONS TO THEORIES IDEALIZED<br/>ELEKROMECHANICHESKOGO CONVERTER</b>         |          |
| 2.1. Physical model .....                                                                                 | 13       |
| 2.2. Magnetic field in air clearance. Obmotochnaya function .....                                         | 14       |
| 2.3. Potokosceplenie and inductances windings .....                                                       | 18       |
| 2.4. Moment idealized electric machine .....                                                              | 22       |
| 2.5. Magnetic fields, created winding .....                                                               | 27       |
| 2.6. EDS windings .....                                                                                   | 30       |
| 2.7. Relationship of the field in air clearance with voltage windings .....                               | 32       |
| <i>Checking questions</i> .....                                                                           | 35       |
| <br><b>Chapter 3. GENERALIZATION ELECTRIC MACHINE MODEL</b>                                               |          |
| 3.1. Physical premiseses .....                                                                            | 36       |
| 3.2. Generalised model of the electric machine<br>(the model Vudsona and Uayta) .....                     | 37       |
| 3.3. Main types of the electric machines .....                                                            | 40       |
| <i>Checking questions</i> .....                                                                           | 41       |
| <br><b>Chapter 4. MAIN CORRELATION IN DIFFERENT TYPES OF THE<br/>ELECTROMECHANIC CONVERTERS TO ENERGY</b> |          |
| 4.1. Poliphase synchronous machine .....                                                                  | 42       |
| 4.2. Poliphase anisochronous machine .....                                                                | 44       |
| 4.3. Electric machine of the direct current .....                                                         | 48       |
| 4.4. Notion about equivalent electric system of the<br>electromechanic converters .....                   | 51       |
| <i>Checking questions</i> .....                                                                           | 54       |

## **Chapter 5. ELECTROMAGNETIC DEVICE FOR TRANSFORMATION OF THE ENERGY (TRANSFORMERS)**

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1. Polarity of the windings. The Relative direction of the flow ..... | 55 |
| 5.2. Main correlations. The Equivalent circuitry .....                  | 57 |
| <i>Checking questions</i> .....                                         | 60 |

## **Chapter 6. THE HEATING AND COOLING THE ELECTROMECHANIC CONVERTERS (THE ELECTRIC MACHINES).OPERATING DUTY**

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 6.1. Heating of electric machines .....         | 61 |
| 6.2. Main nominal modes electric machines ..... | 65 |
| <i>Checking questions</i> .....                 | 67 |

## **Chapter 7. MODERN TYPES OF ANISOCHRONOUS ELECTROMECHANIC CONVERTERS**

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.1 Modern types an isochronous engines .....                                     | 68 |
| 7.2 Some faults of anisochronous engines and way their removal .....              | 68 |
| 7.3 An isochronous machines released in countries C.I.S.<br>and their types ..... | 70 |
| <i>Checking questions</i> .....                                                   | 72 |

## **Chapter 8. MODERN TYPES of SYNCHRONOUS ELECTROMECHANIC CONVERTERS**

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 8.1. Machines is longitudinal-transverse excitement .....            | 73 |
| 8.2. Asynchronized Synchronous machines .....                        | 74 |
| 8.3. Superconductive Synchronous machines .....                      | 75 |
| 8.4. Synchronous machines big powers .....                           | 76 |
| 8.5. Some faults of synchronous machines and way their removal ..... | 78 |
| <i>Checking questions</i> .....                                      | 80 |

## **Chapter 9. THE PRACTICAL RECOMMENDATIONS ON USAGE OF POWER TRANSFORMERS AND THEIR INDICATIONS**

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 9.1. General provisions on usage of power transformers, their faults and<br>practical the recommendations ..... | 81 |
| 9.2. Types power and avtotransformers, their conditional indications .....                                      | 86 |
| <i>Checking questions</i> .....                                                                                 | 92 |
| Exhibit .....                                                                                                   | 93 |
| Used literature .....                                                                                           | 96 |

4500 c

*O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim  
vazirligining 2009-yil 26-fevraldagi 51-son buyrug'i  
bilan nashrga ruxsat etildi.*

O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI  
ABU RAYXON NOMIDAGI TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

**N. B. FIRMATOV, O. E. ZAYNIYEVA**  
**ELEKTROMEXANIKA ASOSLARI**

*O'quv qo'llanma*

*Toshkent «Ma'naviyat» 2015*

Muharrir R. Qo'chqorov  
Rassom S. Shuhrat  
Musahhihlar: S. Toshqulova  
Komputerda tayyorlovchi Sh. Sohibov

Litsenziya AI №189, 2011-yil 10-mayda berilgan. Bosishga 04.12.2015-yilda ruxsat  
etildi. Bichimi 60×84 1/16. Tayms garnituras. Ofset bosma usulida bosildi.  
Shartli bosma tabog'i 6,04. Nashr tabog'i 6,06. Adadi 250 nusxa. Buyurtma №15-106.

«Ma'naviyat» nashriyoti bosmaxonasida bosildi.  
Toshkent, Taraqqiyot 2-berkko'cha, 2-uy. Shartnoma №71-15.