

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ
ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ**

**АБУ РАЙҲОН БЕРУНИЙ НОМИДАГИ
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**ҚАРШИ МУҲАНДИСЛИК – ИҚТИСОДИЁТ
ИНСТИТУТИ**

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА (ЭЛЕКТР МАШИНАЛАРИ)
фанидан масалалар тўплами**

ЎҚУВ ҚЎЛЛАНМА

Тошкент 2004

УДК 621.313.

Пирматов Н.Б., Юлдашева О.Э.

“Электромеханика” (“Электр машиналари”) фанидан масалалар тўплами. Ўқув қўлланма. Тошкент. 2004. 76 бет.

Ушбу ўқув қўлланмада “Электр машиналари” курсининг ўзгармас ток машиналари, трансформаторлар, асинхрон машиналар ва синхрон машиналарга оид масалалар келтирилган.

Масалаларни ечишдан олдин қисқача назарий маълумотлар ҳам берилган.

Абу Райҳон Беруний номидаги Тошкент давлат техника университети илмий-методик кенгашининг қарорига асосан чоп этилди.

Тақризчи :

Имомназаров А.Т.

Кириш

Кўпгина энергетика соҳасидаги йўналишлар талабалари учун тузилган ўқув дастурларида “Электромеханика” фани бўйича амалий соатлар белгилаб қўйилган.

Шу сабабли, бу қўлланманинг ёзилиши талабалар учун жуда қўл келади. “Электромеханика” фанининг назарий қисмини масалалар ечиш билан биргаликда ўрганиш, талабалар билим доираларини кенгайтишига, ишлаб чиқаришнинг электромеханикага оид масалаларини ҳал этиш учун зарур билимларни эгаллашга ёрдам беради.

“Электромеханика” фанини мустақил ўрганувчи сиртки бўлим талабаларига ёрдам бериш мақсадида курснинг барча бўлимлари бўйича ечимлари батафсил баён этилган намунали масалалар ҳам кўрсатилган.

1 – БОБ. ЎЗГАРМАС ТОК МАШИНАЛАРИ

1.1. ЭЮК, кучланиш ва момент тенгламаси

Ўзгармас ток машиналарининг тезлигини бошқариш текис амалга оширилади. Шу сабабли ҳам бкндай машиналар кенг куламда ишлатилади.

Ўзгармас ток машинаси генератор режимида ишлаганда кучланишлар мувозанат тенгламаси куйидагича булади:

$$E = U + I_a R_a (1)$$

бу ерда: U – якордаги кучланиш; E – якордаги ЭЮК; I_a – якор токи; R_a – якор чулгамининг актив каршилиги.

Агарда ўзгармас ток машинаси мотор режимида ишласа, унинг кучланишлар мувозанат тенгламаси куйидагича топилади:

$$U = E + I_a R_a (2)$$

Якор чулгамидаги момент куйидагича топилади:

$$M = C_m \Phi I_a (3)$$

бу ерда: C_m – момент доимийси; $C_m = C_e / 2\pi$; Φ – магнит оими.

Якор чулгамидаги ЭЮК куйидагига тенг:

$$E = z n \Phi p / a = C_e n \Phi, (4)$$

бу ерда: n – машинанинг айланиш частотаси; C_e – машина чулғамини характерловчи доимий; z – якор чулғами переметри; p – жуфт параллел шохобчалар сони.

Узгармас ток машинасининг айланиш частотаси куйидагича топилади:

$$n = U \cdot 60 / C_e \Phi - I_a \cdot R_a \cdot 60 / C_e \Phi = U \cdot 60 / C_e \Phi - R_a \cdot M \cdot 60 / C_e K_m \cdot \Phi^2 (5)$$

1.2. Ўзгармас ток машиналарида қуйидаги қувват исрофлари ва ФИК

Ўзгармас ток машиналарида қуйидаги қувват исрофлари мавжуд:

Пўлатли исроф

$$P_n = \kappa \cdot [P_{1.ог} \cdot f \cdot B^2 / 50 + P_{1.оу} \cdot (f \cdot B / 50)^2] \cdot m_n (6)$$

бу ерда: κ – исроф ўзиш коэффиценти ($\kappa \approx 2 \div 2,5$); $P_{1.ог}$, $P_{1.оу}$ – пластинкалардан йиғилган ўзак учун характерли бўлган уярма тоқлар ҳосил қилган солиштира исроф ва гистерезис солиштира исрофи (бунда $f = 50$ Гц ва $B = 1$ Тл); B – индукциянинг максимум қиймати; m_n – пўлат массаси;

Чўткалардаги исроф

$$P_k = 9,819 v_k A_k p \mu (7)$$

бу ерда: v_k – коллекторнинг айланма тезлиги; A_k – чуткаларнинг коллекторга тегиб турган юзаси; p – пружиналарнинг босими; μ – тмтраш коэффиценти

Чўтка контактларидаги исроф

$$P_k = \Delta U_k I_a (8)$$

бу ерда: ΔU_k – чўнтакдаги кучланиш пасайиши (электрографит чўнтақлар учун $2B$).

Механик исроф $P_{\text{мех}}$ машинанинг айланувчи кисмида булади.

Якор чулғамидаги исроф

$$P_{\text{я.ч}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} \quad (9)$$

Қўшимча исрофлар

$$P_{\text{куш}} = (0,005 \div 0,01) P_{\text{н}} \quad (10)$$

бу ерда: $P_{\text{н}}$ – машинанинг номинал қуввати.

Қўзғатиш чулғамидаги исроф

$$P_{\text{к}} = U_{\text{к}} I_{\text{к}} = U_{\text{к}} I / R_{\text{к}} \quad (11)$$

Йиғинди қувват исрофи

$$\Sigma P = P_{\text{н}} + P_{\text{ч}} + P_{\text{к}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{я.ч}} + P_{\text{куш}} + P_{\text{к}} \quad (12)$$

Машинанинг ФИК

$$\eta = P_{\text{н}} / (P_{\text{н}} + \Sigma P) \quad (11)$$

1.3. Намунавий масалалар ечиш

1.3.1. Чиқиш клемларида $U = 200$ В бўлган параллел қўзғатишли ўзгармас ток генератори номинал юклама $P_{\text{н}} = 120$ кВт, $n = 1440$ айл/мин тезлик билан ишламоқда. Агарда генераторнинг мотор режимида $P = 60$ кВт юклама билан ишлатилса, моторни айланиш частотасини топинг. Якор чулғамининг ички қаршилиги $R_{\text{я}} = 0,011$ Ом, қўзғатиш чулғамининг қаршилиги $R_{\text{к}} = 38$ Ом, чўнтақлардаги кучланиш пасайиши $\Delta U_{\text{к}} = 2$ В.

Генератор режимидаги ЭЮК $E = U + I_{\text{юк}} R_{\text{я}} + \Delta U_{\text{к}}$

бу ерда

$$I_{\text{юк}} = I_{\text{я}} + I_{\text{к}} = P_{\text{н}} / U + U / R_{\text{к}} = 120 \cdot 10^3 / 220 + 220 / 38 = 551 \text{ А.}$$

ЭЮК ни топамиз:

$$E = 220 + 551 \cdot 0,011 + 2 = 228 \text{ В.}$$

бу ерда

$$C_{\text{е}} = E \cdot 60 / n = 228 \cdot 60 / 1440 = 9,5 \text{ В} \cdot \text{с.}$$

Мотор режимида ЭЮК қуйидагича топилади:

$$E = U - I_{\text{я}} R_{\text{я}} - \Delta U_{\text{к}}$$

Бундан

$$I_{\text{я}} = I_{\text{ист}} - I_{\text{к}} = P / U - U / R_{\text{к}} = 60 \cdot 10^3 / 220 - 220 / 38 = 267 \text{ А.}$$

$$E = C_{\text{е}} n \quad \text{тенгликдан фойдаланиб,}$$

$$n = (U - I_{\text{я}} R_{\text{я}} - \Delta U_{\text{к}}) \cdot 60 / C_{\text{е}} = (220 - 267 \cdot 0,011 - 2) \cdot 60 / 9,5 = 1358 \text{ айл/мин.}$$

1.2.3 Мустақил қўзғатишли генераторнинг техник маълумотлари қуйидагича: номинал қуввати $P_{\text{н}} = 16$ кВт, номинал кучланиши $U_{\text{н}} = 230$ В, якор чулғамининг қаршилиги $R_{\text{я}} = 0,12$ Ом, қўзғатиш занжирининг қаршилиги $R_{\text{к}} = 18$ Ом, қўзғатиш занжирининг кучланиши $U_{\text{к}} = 110$ В.

Механик ва магнит исрофлар генератор номинал қувватининг 4,5% ни ташкил этади. Генераторнинг ЭЮК, ФИК аниқлансин.

Ечиш. Генераторнинг ЭЮК

$$E = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}}$$

Мустақил қўзғатишли генераторда

$$I_{\text{я}} = I_{\text{к}}$$

Генераторнинг номинал токи

$$I_H = \frac{P_H}{U_H} = \frac{16 \cdot 10^3}{230} = 69,57 \text{ A},$$

у холда

$$E = 230 + 69,57 \cdot 0,12 = 138,35 \text{ В.}$$

Генераторнинг номинал режимидаги ФИК

$$\eta = \frac{P_H}{P_H + \Sigma P}.$$

Кўзгатиш чулғамидаги қувват исрофи

$$P_K = \frac{U_K^2}{R_K} = \frac{110^2}{18} = 672 \text{ Вт} = 0,672 \text{ кВт.}$$

Якор чулғамидаги қувват исрофи

$$P_{я} = I_{я,н}^2 R_{я} = 69,57^2 \cdot 0,12 = 581 \text{ Вт} = 0,581 \text{ кВт.}$$

Шарт бўйича

$$P_{мех} + P_{маг} = 0,045 \cdot P_H = 0,045 \cdot 16 \cdot 10^3 = 720 \text{ Вт} = 0,72 \text{ кВт.}$$

ФИК

$$\eta = \frac{P_H}{P_H + P_K + P_{я} + P_{мех} + P_{маг}} = \frac{16}{16 + 0,672 + 0,581 + 0,72} = 0,89.$$

1.3.3. Тўлқинсимон чулғамли ўзгармас ток машинасининг қуйидаги параметрлари берилган: якор пазлари сони $z = 25$; жуфт қутблар сони $p = 2$, секциядаги (ғалтакдаги) ўрамлар сони $\omega = 4$, битта пазга ва битта қатламга тегишли ғалтак томонлари сони $U = 3$, магнит оқими $\Phi = 0,65 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$, якор токи $I_{я} = 27 \text{ А}$, айланиш частотаси $n = 1500 \text{ айл/мин}$. Машинанинг электромагнит қуввати аниқлансин.

Ечиш. Машинанинг электромагнит қуввати $P_{эм} = EI_{я}$

ЭЮК

$$E = z p n \Phi / a = C_e n \Phi.$$

Якор чулғамининг эффикив симларини сонини топамиз

$$Z = 2 p \omega z = 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 25 = 600.$$

Машина чулғамини характерловчи доимий

$$C_e = \frac{z p}{a} = \frac{600 \cdot 2}{1} = 1200, \text{ бу ерда } a = 1.$$

ЭЮК ни аниқлаймиз

$$E = C_e \Phi n / 60 = 1200 \cdot 0,0065 \cdot 1500 / 60 = 195 \text{ В.}$$

Электромагнит қувват

$$P_{эм} = EI_{я} = 195 \cdot 27 = 5265 \text{ Вт.}$$

1.3.4. Мустақил кўзгатишли генератор салт ишлаганда унинг клеммаларидаги (учларидаги) кучланиш $U_0 = 248 \text{ В}$. Якорнинг айланиш частотаси $n = 1000 \text{ айл/мин}$, якор чулғамининг қаршилиги $R_{я} = 0,19 \text{ Ом}$. Юклама уланганда ток $I = 53 \text{ А}$, кучланиш $U = 220 \text{ В}$ бўлди. Юклама улангандан кейинги якорнинг айланиш частотаси аниқлансин. Магнит оқимининг ўзгариши эътиборга олинмасин.

Ечиш. Генераторнинг сатл ишлагандаги ЭЮК

$$E_0 = U_0 = 248 \text{ В.}$$

Юклама билан ишлагандаги ЭЮК

$$E = U + I_{я} R_{я} = 220 + 53 \cdot 0,19 = 230 \text{ В.}$$

Салт ишлаганда ЭЮК

$$E_0 = C n_0 \Phi.$$

Юклама билан ишлаганда эса:

$$E = C n \Phi, \text{ чунки шарт бўйича } \Phi \approx \text{const.}$$

У ҳолда

$$\frac{E_0}{E} = \frac{n_0}{n}$$

бунда

$$n = \frac{E \cdot n_0}{E_0} = \frac{230}{248} \cdot 1000 = 927 \text{ айл/мин.}$$

1.3.5. Учларида кучланиши $U = 110 \text{ В}$ бўлган мустақил қўзғатишли ўзгармас ток генераторининг юкламаси 3 кВт дан $1,5 \text{ кВт}$ гача камайса, магнит оқимини неча фоизга камайтириш керак. Бунда кучланиш ўзгармас, яъни $U = 110 \text{ В} = \text{const}$ бўлсин. Чўткалардаги кучланиш пасайиши $\Delta U_k = 2 \text{ В}$, қувват исрофлари ҳисобга олинмасин, якор реакцияси таъсири ва якор чулғамидаги қувват исрофи ҳисобга олинсин. Якор чулғами қаршилиги $R_{\text{я}} = 0,5 \text{ Ом}$.

Ечиш. Юкламанинг икки қиймати учун кучланишлар мувозанат тенгламаси

$$\begin{aligned} U &= E_1 - I_{\text{я}1} R_{\text{я}} - \Delta U_k; \\ U &= E_2 - I_{\text{я}2} R_{\text{я}} - \Delta U_k; \end{aligned}$$

ва

$$E_1 = \frac{Z_p}{\alpha} \Phi_1 n / 60 = C_e \Phi_1 n / 60 = k \Phi_1,$$

худди шунингдек, $E_2 = k \Phi_2$.

Якор чулғамидаги тоқлар

$$I_{\text{з}1} = \frac{P_1}{U} = \frac{3000}{110} = 27,3 \text{ А};$$

$$I_{\text{з}2} = \frac{P_{\text{з}1}}{U} = \frac{1500}{110} = 13,65 \text{ А};$$

Қуйидаги нисбатни ёзиш мумкин

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{k \Phi_2}{k \Phi_1} = \frac{U + I_{\text{я}2} R_{\text{я}} + \Delta U_k}{U + I_{\text{я}1} R_{\text{я}} + \Delta U_k} - 1 = \frac{110 + 13,65 \cdot 0,5 + 2}{110 + 27,3 \cdot 0,5 + 2} - 1 = -0,055.$$

Демак магнит оқими $5,5 \%$ га камайтириш керак экан.

1.3.6. параллел қўзғатишли генераторнинг номинал кучланиш $U_n = 230 \text{ В}$ юклама токи $I = 160 \text{ А}$. Якор чулғамининг қаршилиги $R_{\text{я}} = 0,11 \text{ Ом}$, қўзғатиш чулғамининг қаршилиги $R_{\text{я}} = 72 \text{ Ом}$. Якор чулғамидаги ЭЮК E ва ток $I_{\text{я}}$, генератор бераётган қувват P_2 ва якор чулғамидаги қувват исрофи $P_{\text{я}}$ аниқлансин.

Ечиш. Қўзғатиш занжиридаги ток

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}}} = \frac{230}{72} = 3,2 \text{ А.}$$

Якор чулғамидаги ток

$$I_{\text{я}} = I + I_k = 160 + 3,2 = 163,2 \text{ А.}$$

Якордаги ЭЮК

$$E = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}} = 230 + 163,2 \cdot 0,11 = 248 \text{ В.}$$

Фойдали қувват

$$P_2 = UI = 230 \cdot 160 = 36800 \text{ Вт} = 36,8 \text{ кВт.}$$

Якор чулғамидаги қувват исрофи

$$P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} = 163,2^2 \cdot 0,11 = 2930 \text{ Вт} = 2,93 \text{ кВт.}$$

1.3.7. Кучланиши $U = 110 \text{ В}$ бўлган электр тармоғига параллел қўзғатишли ўзгармас ток мотори уланган. Якор чулғамининг қаршилиги $R_{\text{я}} = 0,07 \text{ Ом}$. Юкламанинг ярим қийматида моторнинг айланиш частотаси $n = 1400 \text{ айл/мин}$, якор токи $I_{\text{я}} = 74 \text{ А}$. Агарда якор чулғамига ташқи қаршилиқ $R_{\text{т}} = 0,3 \text{ Ом}$ уланса ва юклама моменти икки мартага ошганда, моторнинг айланиш частотасини аниқланг. Бунда якор реакцияси ҳисобга олинмасин, чўткалардаги кучланиш пасайиши $\Delta U_{\text{к}} = 2 \text{ В}$.

Ечиш. Бу икки ҳол учун моментлар тенгламаси

$$M_1 = C_{\text{м}} \Phi I_{\text{я1}}; \quad M_2 = 2 C_{\text{м}} \Phi I_{\text{я1}};$$

Бунда, $I_{\text{я2}} = 2 I_{\text{я1}} = 2 \cdot 74 = 148 \text{ А}$.

Биринчи ҳол учун кучланишлар мувозанат тенгламаси

$$E_1 = U - I_{\text{я1}} R_{\text{я}} - \Delta U_{\text{к}} = 110 - 74 \cdot 0,07 - 2 = 102,8 \text{ В.}$$

бу ерда:

$$C_{\text{е}} \Phi = \frac{E}{n} 60 = \frac{102,8}{1400} 60 = 4,41 \text{ Вб.}$$

Иккинчи ҳол учун кучланишлар мувозанат тенгламаси

$$E_2 = U - I_{\text{я2}} (R_{\text{я}} + R_{\text{т}}) - \Delta U_{\text{к}} = 110 - 148 \cdot (0,07 + 0,3) - 2 = 53,2 \text{ В.}$$

Моторнинг айланиш частотаси

$$n_1 = \frac{E_2 \cdot 60}{C_{\text{е}} \Phi} = \frac{53,2 \cdot 60}{4,41} = 724 \text{ айл/мин.}$$

1.3.8. Икки кутблипараллел қўзғатишли генераторнинг якор чулғамларини кесиб ўтаётган магнит оқими $\Phi = 0,03 \text{ Вб}$. Чулғам актив симлари сонининг жуфт параллел шохобчалар сонига нисбати $N / a = 300$. Якорнинг айланиш частотаси $n = 2000 \text{ айл/мин}$.

Агар якор занжирининг қаршилиги $R_{\text{я}} = 0,2 \text{ Ом}$, юклама токи 56 А , қўзғатиш токи $I_{\text{к}} = 4 \text{ А}$ булса, генераторнинг электромагнит (тормозловчи) момент ва учларидаги кучланишни топинг.

Ечиш. Генераторнинг ЭЮК

$$E = \frac{N}{a} \cdot \frac{p}{60} \Phi = 300 \cdot \frac{1 \cdot 2000}{60} \cdot 0,03 = 300 \text{ В.}$$

бу ерда: p – жуфт кутублар сони. Генератор икки кутбли булгани учун $p = 1$.

Генератор учларидаги кучланиш

$$U_{\text{г}} = E - I_{\text{я}} R_{\text{я}} = 300 - 60 \cdot 0,2 = 288 \text{ В,}$$

бу ерда: $I_{\text{я}} = I + I_{\text{к}} = 56 + 4 = 60 \text{ А}$.

Генераторнинг электромагнит моменти

$$M = \frac{N}{a} \cdot \frac{p}{2\pi} \Phi I_{\text{я}} = C_{\text{м}} \Phi I_{\text{я}},$$

бу ерда: $C_{\text{м}} = \frac{N}{a} \cdot \frac{p}{2\pi} = 300 \cdot \frac{1}{2 \cdot 3,14} = 47,8$,

у ҳолда

$$M = 47,8 \cdot 0,03 \cdot 60 = 86 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

1.3.9. Икки кутбли ўзгармас ток генераторининг якор чулғами $z = 1200$ симдан иборат. Битта симнинг чулғам тирсак қисми билан биргаликдаги узунлиги $l = 0,39$ м. Симнинг кўндаланг кесим юзаси $A_{\text{си}} = 2 \text{ мм}^2$. Учларидаги кучланиш $U = 110$ В бўлганда генератор тармоқга $P = 3,5$ кВт қувват беради. Генераторнинг якор чулғами қаршилиги $R_{\text{я}}$ 20°C да аниқлансин ва 75°C да якор чулғамидаги қувват исрофи топилсин. Мустақил қўзғатишли генератор якор чулғами мисдан тайёрланган бўлиб, 20°C да миснинг солиштирма қаршилиги $\rho = 0,0172 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

Ечиш. Битта параллел шохобчадаги якор чулғамининг қаршилиги

$$R_{\text{я}} = \frac{z}{2a} \rho \frac{l}{A_{\text{си}}} = \frac{1200}{2 \cdot 2} \cdot 0,0172 \cdot \frac{0,39}{2} = 1 \text{ Ом}.$$

Чўткалар орасидаги якорнинг қаршилиги

$$R_{\text{я}} = \frac{1}{2a} R_{\text{я}} = \frac{1}{4} \cdot 1 = 0,25 \text{ Ом}.$$

Якор токи

$$I_{\text{я}} = \frac{P_{\text{я}}}{U} = \frac{3,5 \cdot 10^3}{110} = 31,8 \text{ А}.$$

Якор чулғамидаги кучланиш пасайиши

$$\Delta U_{\text{я}} = I_{\text{я}} R_{\text{я}} = 31,8 \cdot 0,25 = 7,95 \text{ В}.$$

75°C даги якор қаршилиги

$$R_{\text{я},75} = R_{\text{я},20} = \frac{235+75}{235+20} = 0,25 \cdot \frac{310}{225} = 0,304 \text{ Ом}.$$

75°C даги якор чулғамидаги исроф

$$P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я},75} = 31,8^2 \cdot 0,304 = 307 \text{ Вт}.$$

1.3.10. Айланиш частотаси $n = 1000$ айл/мин бўлган ўзгармас ток мотори юксиз ишламоқда; ундаги гистарезис исрофи $P_{\text{г}} = 2500$ Вт, уярма тоқлар ҳосил қилган қувват исрофи $P_{\text{у}} = 1000$ Вт. Магнит оқим ўзгармас $\Phi = \text{const}$ деб қабул қилинган ҳол учун, қандай айланиш частотасида пўлатдаги исрофлар икки мартага камаяди? Бунда қўзғатиш чулғамидаги ва механик исрофлар ҳисобга олинмаган.

Ечиш. Гистерезис исрофи

$$P_{\text{г}} = P_{\text{г.оғ}} \frac{f}{50} B^2 G_{\text{пул}} = k_1 f = k_1 n,$$

бундан

$$k_1 = \frac{P_{\text{г}}}{n} = \frac{2500}{1000} \cdot 60 = 150 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Уярма тоқлар ҳосил қилган исроф

$$P_{\text{у}} = P_{\text{у.оғ}} \frac{f^2}{50^2} B^2 G_{\text{пул}} = k_2 f^2 = k_2 n^2;$$

$$k_2 = \frac{P_{\text{у}}}{n^2} = \frac{1000}{1000^2} \cdot 60^2 = 3,6 \text{ Вт} \cdot \text{с}^2.$$

Пўлатдаги исроф $n = 1000$ айл/мин

$$P_{\text{пул}} = P_{\text{г}} + P_{\text{у}} = 2500 + 1000 = 3500 \text{ Вт}.$$

Қуйидаги тезликда n пўлатдаги исроф икки мартага камаяди

$$\frac{P_{\text{пул}}}{2} = k_1 n_1 + k_2 n_1^2.$$

Бу ҳол учун иккинчи даражали тенглама

$$3,6n_1^2 + 150n_1 - 1750 = 0.$$

Бу тенглама ечими:

$$n_{1,2} = \frac{-150 \pm \sqrt{150^2 + 4 \cdot 1750 \cdot 3,6}}{7,2} \cdot 60 = -1250 \pm 1820 = \begin{cases} 570 \text{ айл/мин} \\ -3070 \text{ айл/мин.} \end{cases}$$

$n=3070$ айл/мин физик жиҳатдан мумкин эмас, демак $n=570$ айл/мин тўғри бўлади.

1.4.

Мустақил ечиш учун масалалар

1.4.1. Ўзгармас ток моторининг кучланиши $U = 440$ В, номинал қуввати $P_n = 120$ кВт, ФИК $\eta = 92\%$ бўлса, мотор тармоқдан қандай токни истеъмол қилади?

1.4.2. Мустақил кўзғатишли генератор салт ишлаётганда кучланиш $U_0 = E_r = 150$ В. Якорнинг айланиш частотаси $n=1800$ айл/мин бўлиб, чулғамларни кесиб ўтаётган магнит оқими $\Phi = 2,5$ Вб бўлса, генераторнинг доимийси C_E аниқлансин.

1.4.3. Тўрт кутбли ўзгармас ток генераторини чулғамларини кесиб ўтаётган магнит оқими $\Phi = 1 \cdot 10^{-2}$ Вб. Якорнинг айланиш частотаси $n=1500$ айл/мин, чулғамдаги актив симларнинг сони $N = 600$, жуфт параллел шоҳобчаларнинг сони $a=4$. Якор чулғамларидаги индуктивланган ЭЮК ни топинг.

1.4.4. Ўзгармас ток генераторининг якор чулғамларини кесиб ўтаётган магнит оқими $\Phi = 0,02$ Вб, машина доимийси $C_e = 10$. Якорнинг айланиш частотаси 1000, 1500 ва 2000 айл/мин бўлганда якор чулғамидаги индуктивланган ЭЮК лар аниқлансин.

1.4.5. Параллел кўзғатишли моторнинг клеммаларига берилган кучланиш $U=220$ В. Кўзғатиш чулғамининг қаршилиги $R_k = 40$ Ом. Кўзғатиш токи $I_k = 2,5$ А дан ортмаслиги учун ростлаш реостатининг қаршилиги неча Ом га тенг бўлиши керак?

1.4.6. Параллел кўзғатишли генераторнинг номинал кучланиши $U_n=120$ В, якорнинг номинал айланиш частотаси $n_n=1000$ айл/мин, номинал ток $I_{я.н} = 80$ А ва якор чулғамининг қаршилиги $R_я = 0,15$ Ом. Генераторни мотор сифатида ишлатганда якор чулғамида индуктивланган тескари ЭЮК ва якорнинг айланиш частотаси топилсин. Машинанинг магнит оқими иккала режимда ҳам ўзгармас деб ҳисоблансин.

1.4.7. Ўзгармас ток генератори клеммасидаги кучланиш $U=170$ В, якор токи $I_я = 765$ А. Агарда ФИК $\eta = 91\%$ бўлса генератор ва бирламчи мотор бераётган қувватларни топинг.

1.4.8. Якор чулғами қаршилиги $R_я = 0,43$ Ом бўлган кетма-кет кўзғатишли ўзгармас ток мотори кучланиши $U=110$ В бўлган тармаққа уланган. Маълум юкламада якор токи $I_я = 30$ А, айланиш частотаси $n=1500$ айл/мин. Агарда якор чулғамига кетма-кет қилиб қўшимча $R_{куш} = 2$ Ом қаршилик улаб, юклама шундай танлансинки, якор токи $I_я = 30$ А

колиши учун, $U=110$ В кучланишда моторнинг айланиш частотаси топилсин. Бунда чўткалардаги кучланиш пасайиши ҳисобга олинмасин.

1.4.9. Икки кутбли параллел қўзғатишли ўзгармас ток мотори кучланиши $U=220$ В бўлган тармоққа уланган. Якордаги тўлқинсимон чулғам симларининг сони $z=650$, якор чулғами қаршилиги $R_{\text{я}}=0,8$ Ом, магнит оқим $\Phi=0,63 \cdot 10^{-2}$ Вб, якор токи $I_{\text{я}}=27$ А бўлганда моторнинг айланиш частотаси аниқлансин. Чўткалардаги кучланиш пасайиши $\Delta U_{\text{к}}=2$ В. Якор реакциясининг таъсири ҳисобга олинмасин.

1.4.10. Мустақил қўзғатишли ўзгармас ток мотори кучланиши $U=220$ В бўлган тармоққа уланган. Моторнинг юклама моменти номинал моментга тенг, айланиш частотаси $n=1440$ айл/мин, якор токи $I_{\text{я}}=50$ А, якор чулғами қаршилиги $R_{\text{я}}=0,4$ Ом. Агарда юклама моменти икки мартага камайса, моторнинг тезлиги қанча бўлади? Чўткалардаги кучланиш пасайиши $\Delta U_{\text{к}}=2$ В.

Жавоблар

- | | |
|---------|--|
| 1.4.1. | $I_{\text{я}}=296$ А |
| 1.4.2. | $C_{\text{е}}=2$ |
| 1.4.3. | $E=75$ В |
| 1.4.4. | 200 В, 300 В, 400 В. |
| 1.4.5. | $r_{\text{р}}=48$ Ом |
| 1.4.6. | $E_{\text{т}}=108$ В, $n=818$ |
| 1.4.7. | $P_{\text{г}}=130$ кВт, $P_{\text{м}}=143$ кВт |
| 1.4.8. | $n=573$ айл/мин |
| 1.4.9. | $n=2878$ айл/мин |
| 1.4.10. | $n=1513$ айл/мин |

2-БОБ. ТРАНСФОРМАТОРЛАР

2.1. Трансформаторни эксплуатациялаш режимлари

Трансформаторнинг тўла қуввати қуйидагича топилади

$$S = m U I, \quad (1)$$

бу ерда: m – фазалар сони; U – кучланиш, I – ток.

Тўла қувватнинг реактив ташкил этувчиси

$$Q = m U I \sin \varphi, \quad (2)$$

бу ерда: φ – ток ва кучланиш орасидаги бурчак.

Тўла қувватнинг актив ташкил этувчиси

$$P = m U I \cos \varphi. \quad (3)$$

Маълумки магнит оқими Φ бирламчи ва иккиламчи чулғамларда ЭЮК E_1 ва E_2 ларни ҳосил қилади:

$$\begin{aligned} E_1 &= 4,44 f \omega_1 \Phi \\ E_2 &= 4,44 f \omega_2 \Phi \end{aligned} \quad (4)$$

бу ерда: f – тармоқ частотаси; ω_1, ω_2 – тегишлича бирламчи ва иккиламчи чулғамларнинг ўрамлар сони; Φ – магнит оқимнинг максимал қиймати.

Трансформаторнинг трансформациялаш коэффициенти

$$k_T = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_1}{I_2}. \quad (5)$$

Бирламчи ва иккиламчи чулғамдаги МҮОК лар

$$F_1 = I_1 \omega_1; \quad F_2 = I_2 \omega_2 \quad (6)$$

Иккиламчи чулғам параметрларини бирламчи чулғам параметрларига келтирилган қийматлари:

Келтирилган ток

$$I'_2 = I_2 / k_T; \quad (7)$$

Келтирилган кучланиш

$$U'_2 = k_T U_2; \quad (8)$$

Келтирилган актив ва индуктив каршиликлар

$$R'_2 = k_T^2 R_2; \quad x'_2 = k_T^2 x_2. \quad (9)$$

2.2. Трансформаторлар кучланишларининг мувозанат тенгламаси

Салт ишлаётган трансформатор кучланишларининг мувозанат тенгламаси:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E} + \dot{I}_x R_1 + j \dot{I}_x x_1 = -\dot{E} + \dot{I}_x (R_1 + jx_1), \quad (10)$$

бу ерда: $\dot{I}_x$ – салт ишлаш токи вектори.

Үюклама билан ишлаётган трансформатор кучланишларининг мувозанат тенгламаси

$$\dot{U}_1 = -\dot{E} + \dot{I}_1 R_1 + j \dot{I}_1 x_1 = -\dot{E} + \dot{I}_1 (R_1 + jx_1), \quad (11)$$

$$-\dot{E} = \dot{U}'_2 - \dot{I}'_2 R'_2 - j \dot{I}'_2 x'_2 = \dot{U}'_2 - \dot{I}'_2 (R'_2 + jx'_2), \quad (12)$$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_x. \quad (13)$$

Трансформаторнинг қувват коэффициенти

$$\cos \varphi = P / \sqrt{3} UI. \quad (14)$$

Қисқа туташув кучланиши

$$U_{KT} = \frac{U_{КТН}}{U_{1Н}} \cdot 100. \quad (15)$$

Қисқа туташув кучланишининг абсолют қиймати

$$U_{KT} = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}. \quad (16)$$

Қисқа туташув режимидаги қувват коэффициенти

$$\cos \varphi_{KT} = \frac{R}{z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + x^2}} = \frac{U_a}{U_p} = \frac{U_a}{\sqrt{U_a^2 + U_p^2}}. \quad (17)$$

2.3. трансформаторнинг ФИК ва қувват исрофлари

Трансформаторларда асосан чулғамлардаги кувват исрофи $P_{\text{ч}}$ ва пўлатдаги исроф $P_{\text{п}}$ лар бўлади.

Пўлатдаги исроф

$$P_{\text{п}} \approx k_{\text{т}} P_{1.0} (B_m)^2 m_{\text{п}}, \quad (18)$$

бу ерда: $P_{1.0}$ – индукция 1 Тл бўлган 1 кг пўлатдаги солиштирма кувват исрофи; $m_{\text{п}}$ – магнит ўтказгичнинг (пўлатнинг) массаси; $k_{\text{т}}$ – магнит ўтказгичнинг конструкциясига ва унга ишлов беришга боғлиқ бўлган доимий. Бу доимийнинг ўртача қиймати $k_{\text{т}} = 1,2$ га тенг.

Чулғамлардаги электр исрофлар

$$P_{\text{ч}} = m_1 I_{1\phi}^2 R_1 + m_2 I_{2\phi}^2 R_2, \quad (19)$$

бу ерда: m_1, m_2 – бирламчи ва иккиламчи чулғамларнинг фазалар сони; $I_{1\phi}, I_{2\phi}$ – тегишлича чулғамларнинг фаза токлари; R_1, R_2 – тегишлича чулғамларнинг актив қаршилиги.

Трансформаторнинг ФИК

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{п}} + P_{\text{р}}} \cdot 100 = \frac{P_1 - P_{\text{п}} - P_{\text{р}}}{P_1} \cdot 100, \quad (20)$$

ёки тўла кувват орқали ФИК ни ёзсак, у ҳолда

$$\eta = \frac{S_2 \cos \varphi_2}{S_2 \cos \varphi_2 + P_{\text{п}} + P_{\text{р}}} \cdot 100 \quad (21)$$

(21) тенгламанинг сурати ва махражини $S_2 \cos \varphi_2$ га бўлиб, ҳамда $P_{\text{ч}} = P_{\text{чн}} \left(\frac{S_2}{S_{\text{н}}} \right) = P_{\text{чн}} x^2$ ни киритиб

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_{\text{п}} + P_{\text{ч}}}{S_2 \cos \varphi_2}} \cdot 100 = \frac{1}{1 + \frac{P_{\text{п}} + x^2 P_{\text{чн}}}{S_2 \cos \varphi_2}} \cdot 100 \quad (22)$$

2.4. Трансформаторнинг иккиламчи чулғамдаги кучланишини узгартириш

Агар датарнсформаторнинг бирламчи чулғаидаги кучланиш $U_1 = \text{const}$ деб ҳисобласак, у ҳолда иккиламчи чулғамнинг кучланиши U_2 юклама характериға қараб ўзгаради.

Кучланиш пасайиши

$$\Delta U = U_1 - U_2' \approx IR \cos \varphi_2 + Ix \sin \varphi_2 = I (R \cos \varphi_2 + x \sin \varphi_2). \quad (23)$$

(23) дан U_2' ни топсак

$$U_2' = U_1 - I (R \cos \varphi_2 + x \sin \varphi_2). \quad (24)$$

(24) дан иккинчи ташкил этувчини $U_{\text{н}}$ га бўлиб, қуйидагига эға бўламиз

$$U_{\text{кт}} = U_{\text{а}} \cos \varphi_2 + U_{\text{р}} \sin \varphi_2. \quad (25)$$

(25) тенглама $\cos \varphi_2 \leq 0,04$ да жуда яхши натижа беради, агарда $\cos \varphi_2 > 0,05$ бўлса, у ҳолда қуйидаги формулани қўллаш лозим

$$U_{\text{кт}} = (U_{\text{а}} \cos \varphi_2 + U_{\text{р}} \sin \varphi_2) + \frac{1}{200} (U_{\text{а}} \cos \varphi_2 - U_{\text{р}} \sin \varphi_2). \quad (26)$$

2.5. Намунавий масалалар ечиш

2.5.1. Қуввати $S_H = 100$ кВА ва кучланишлари $U_1/U_2 = 5000/400$ В бўлган трансформатор берилган. Битта ўрамга таъсир этувчи кучланиш $U_y = 4,26$ В, частота $f = 50$ Гц бўлса, трансформаторнинг иккала чулғамларининг ўрамлари сони ω_1 ва ω_2 лар аниқлансин; ток зичлиги $j = 3,2$ А/мм² бўлганда чулғам симларининг кесим юзалари A_1 ва A_2 лар аниқлансин, индукция $B_m = 1,4$ Тл бўлганда магнит ўтказгичнинг кўндаланг кесим юзаси аниқлансин.

Ечиш. Ўрамлар сони

$$\omega_1 = \frac{U_1}{U_y} = \frac{5000}{4,26} = 1173 ,$$

$$\omega_2 = \frac{U_2}{U_y} = \frac{400}{4,26} = 94 .$$

Номинал тоқлар

$$I_{1H} = \frac{S_H}{U_1} = \frac{100 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^3} = 20 \text{ А} ,$$

$$I_{2H} = \frac{S_H}{U_2} = \frac{100 \cdot 10^3}{0,4 \cdot 10^3} = 250 \text{ А} .$$

Чулғам симларининг кесим юзаси

$$A_1 = \frac{I_{1H}}{j} = \frac{20}{3,2} = 6,25 \text{ мм}^2 ,$$

$$A_2 = \frac{I_{2H}}{j} = \frac{250}{3,2} = 78,12 \text{ мм}^2 .$$

Магнит оқими

$$\Phi = \frac{U_y}{B_m} = \frac{0,01918}{1,4} = 0,0137 \text{ м}^2 = 137 \text{ см}^2 .$$

2.5.2. 2.5.1.– масалада келтирилган трансформаторнинг салт ишлаш ва қисқа туташув тажрибаси ўтказилган. Тажрибадан олинган натижалар:

Салт ишлаш қувват имрофи $P_0 = 900$ Вт;

Салт ишлашдаги кучланиши $U_0 = 320$ В;

Салт ишлаш токи $I_0 = 16,5$ А;

Қисқа туташув қувват исрофи $P_{кт} = 1250$ Вт;

Қисқа туташув кучланиши $U_{кт} = 240$ В;

Қисқа туташув токи $I_{кт} = 13$ А.

Трансформаторнинг пўлатидаги қувват исрофи P_n , чулғамидаги қувват исрофи $P_{\text{ч}}$, салт ишлашдаги қувват коэффициентлари $\cos \varphi_0$, қисқа туташувдаги қувват коэффициентлари $\cos \varphi_{\text{кт}}$ ва қисқа туташув кучланишининг фоидадаги қиймати топилсин.

Ечиш. Пўлатдаги исроф

$$P_n = \left(\frac{U_n}{U_0} \right)^2 P_0 = \left(\frac{400}{320} \right)^2 \cdot 900 = 1406 \text{ Вт} .$$

Чулғамдаги қувват исрофи

$$P_{\text{ч}} = \left(\frac{I_{\text{ч}}}{I_{\text{кт}}} \right)^2 P_{\text{кт}} = \left(\frac{20}{13} \right)^2 \cdot 1250 = 2956 \text{ Вт} .$$

Қувват коэффициентлари

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_0 I_0} = \frac{900}{320 \cdot 16,5} = 0,1704$$

$$\cos\varphi_{\text{к.т}} = \frac{P_{\text{к.т}}}{U_{\text{к.т}} I_{\text{к.т}}} = \frac{1250}{240 \cdot 13} = 0,4006$$

Номинал токдагы кыска туташув кучланиши

$$U_{\text{к.к.н}} = U_{\text{н}} \frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{к.т}}} = 240 \cdot \frac{20}{13} = 369,2 \text{ В.}$$

$$U_{\text{к.т}} = \frac{U_{\text{н}}}{U_1} \cdot 100 = \frac{369,2}{5000} \cdot 100 = 7,38 \%$$

бу ерда: $U_1 = 5000 \text{ В}$ (2.5.1– масалага қаранг)

2.5.3. 2.5.1.– масалада келтирилган трансформаторнинг паст кучланиш чулғами тўла қаршилиқ $z_{\text{юк}} = 1,2 + j1,5 \text{ Ом}$ юклама билан юкланган.

а) трансформаторнинг ФИК ўша юклама учун аниқлансин.

б) Қаршилиқ $R_{\text{юк}} = 1,2 \text{ Ом}$ трансформаторни номинал ток билан юклаган вақтдаги индуктив қаршилиқ $x_{\text{юк1min}}$ ва қувват коэффиценти $\cos\varphi_{\text{max}}$ топилсин.

в) б) пунктдаги асосан ФИК η , аниқлансин.

г) Иккала юклама учун трансформаторнинг иккиламчи чулғамидаги кучланиш топилсин.

Ечиш. а) Берилган юклама учун трансформаторнинг токи:

$$\dot{I}_{\text{юк}} = \frac{\dot{U}_2}{z_{\text{юк}}} = \frac{400}{1,2 + j1,5} = 130 - j162,6 \text{ А}$$

$$I_{\text{юк}} = \sqrt{130^2 + 162,2^2} = 208 \text{ А}$$

$$\cos\varphi = \frac{R_{\text{юк}}}{z_{\text{юк}}} = \frac{1,2}{\sqrt{1,2^2 + 1,5^2}} = 0,625.$$

Истеъмол қилинаётган ва чулғамлардаги қувват исрофи

$$P_2 = I_{\text{юк}}^2 R_{\text{юк}} = 208^2 \cdot 1,2 = 51920 \text{ Вт} = 51,9 \text{ кВт.}$$

$$P_{\text{г}} = P_{\text{г.н}} \left(\frac{I_{\text{юк}}}{I_{\text{н}}} \right)^2 = 2956 \cdot \left(\frac{208}{250} \right)^2 = 2046 \text{ Вт} = 2,046 \text{ кВт,}$$

бу ерда : $P_{\text{чн}} = 2956 \text{ В}$; $I_{2\text{н}} = 250 \text{ А}$ (2.5.1 ва 2.5.2 – масалаларига қаралсин.)

Берилган юкламадаги ФИК

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{г}} + P_{\text{г}}} \cdot 100 = \frac{51,92}{51,92 + 1,406 + 2,046} \cdot 100 = 93,72 \%$$

б) Юкламанинг минимум реактив қаршилиги

$$I_{2\text{н}} = \frac{U_2}{z_{\text{юк}}^*}, \text{ бундан } z_{\text{юк}}^* = \frac{U_2}{I_{2\text{н}}} = \frac{400}{250} = 1,6 \text{ Ом.}$$

$$z_{\text{юк}}^* = \sqrt{R_{\text{юк}}^2 + x_{\text{юк1min}}^2}, \text{ бундан}$$

$$x_{\text{юк,min}} = \sqrt{z_{\text{юк}}^{*2} - R_{\text{юк}}^2} = \sqrt{2,56 - 1,44} = 1,061 \text{ Ом.}$$

Номинал токдаги қувват коэффиценти

$$\cos\varphi_{\max} = \frac{R_{\text{юк}}}{Z_{\text{юк}}^*} = \frac{1.2}{1.6} = 0,75$$

в) Номинал токдаги ФИК

$$\eta = \frac{P_2^*}{P_2^* + P_{\text{п}} + P_{\text{г.н}}} \cdot 100 = 94,5 \%$$

бу ерда: $P_2^* = P_{2\text{н}}^2 R_{\text{юк}} = 250^2 \cdot 1,2 = 75000 \text{ Вт} = 75 \text{ кВт}$

г) Иккиламчи чулгамдаги кучланишни хисоблашда уловчи шахобчаларни хисобга олмаймиз

$$U_2' = U_1 - I_{\text{юк}}'(R \cos\varphi + x \sin\varphi).$$

Электр занжирининг қисқа туташув режимидаги тўлақаршилиги

$$Z = \frac{U_{\text{КТН}}}{I_{1\text{н}}} = \frac{369.2}{20} = 18,46 \text{ Ом};$$

$$R = Z \cos\varphi_{\text{КТ}} = 18.46 \cdot 0.4006 = 7.395 \text{ Ом};$$

$$x = Z \sin\varphi_{\text{КТ}} = 18.46 \cdot 0.9164 = 16.92 \text{ Ом};$$

$$U_2' = 5000 - \frac{208}{12.5} (7.395 \cdot 0.625 + 16.92 \cdot 0.7804) = 4704 \text{ В};$$

$$U_{21} = \frac{U_{\text{к.т.1}}}{n} = \frac{4704}{12.5} = 376.3 \text{ В};$$

$$U_{22}' = 5000 - \frac{250}{12.5} (7.395 \cdot 0.74 + 16.92 \cdot 0.6613) = 4665 \text{ В}.$$

$$U_{22} = \frac{U_{\text{КТ2}}'}{n} = \frac{4665}{12.5} = 373.2 \text{ В}.$$

2.5.4 Бир фазали трансформаторнинг қуввати $S_{\text{Н}} = 16 \text{ кВА}$ кучланишлари $U = 380/110 \text{ В}$ қисқа туташув кучланиши $8,5\%$. Номинал ток ва номинал кучланишда чулгамларидаги қувват исрофи $P_{\text{чн}} = 0,048 \cdot S_{\text{Н}}$, пулатдаги қувват исрофи $P_{\text{п}} = 0,036 S_{\text{Н}}$. Трансформаторнинг магнит ўтказгичи калинлиги $0,5 \text{ мм}$ бўлган пўлат пластинкалардан йигилиб, солиштирма қувват исрофи $P_{1.0} = 2,3 \text{ Вт / кг}$.

Куйидагилар аниқлансин:

а) Агар стержен ва ярмода индукциянинг максимал қиймати $1,4 \text{ Тл}$ бўлса магнит ўтказгичнинг массаси $m_{\text{н}}$;

б) Агарда пўлат тўлдириш коэффиценти $k_3 = 0,94$ ва паст кучланиш чулгамларининг ўрамлар сони $\omega_2 = 31$ бўлса, стерженнинг кўндаланг кесим юзаси;

в) Қувват коэффицентлари $\cos\varphi_2 = 1$; ва $0,6$ учун актив – индуктив юклама максимал ФИК лари $n_{\text{max} 1.0}$; $n_{\text{max} 0.8}$; $n_{\text{max} 0.6}$;

г) Қисқа туташув қувват коэффиценти $\cos\varphi_{\text{КТ}}$, актив R ва индуктив X қаршиликлар;

д) Киска туташув режимида 75% номинал ток билан юкланган вақтдаги сиғим характериға эға бўлган тўлақаршилиқ $Z_{\text{юк}}$ ва силжиш бурчағиф $\varphi_{\text{юк}}$ лар аниқлансин.

Ечиш. а) Магнит ўтказгичнинг массасини ҳисоблаш мумкин, агарда пўлатдаги тўла ва солиштирма исрофлари аниқ бўлса.

Берилган индукция солитирма исроф

$$P = P_{1.0} B_m^2 = 2,3 \cdot 1,48^2 = 5,037 \text{ Вт / кг.}$$

Пўлатдаги тўла исроф

$$P_n = 0,036 \cdot S_H = 0,036 \cdot 16000 = 576 \text{ Вт.}$$

$$T_n = \frac{P_n}{P} = \frac{576}{5,037} = 114 \text{ кг.}$$

б) Стерженнинг кўндаланг кесим юзасини ҳисоблаш учун, магнит оқимини битта ўрамдаги кучланиши орқали топиш мумкин:

$$U_y = U_2 / \omega_2 = 110 / 31 = 3,548 \text{ В/у};$$

$$U_y = 4,44 \phi f, \text{ бундан}$$

$$\phi = U_y / 4,44 f = 3,548 / 4,44 \cdot 50 = 0,01589 \text{ Вб}$$

$$A_n = \phi / B = 0,01589 / 1,48 = 0,0107 \text{ м}^2 = 107 \text{ см}^2$$

$$A_{\text{он}} = A_n / k_3 = 107 / 0,94 = 113,8 \text{ см}^2$$

в) Трансформаторнинг актив қаршилигини номинал электр исрофлари орқали топиш мумкин:

$$R = \frac{P_{r.n}}{I_{1H}^2} = \frac{0,048 \cdot S_H}{\left(\frac{S_H}{U_H}\right)^2} = \frac{0,048 \cdot 16000}{\left(\frac{16000}{380}\right)^2} = 0,4334 \text{ Ом.}$$

$$P_n = P_r = I^2 R, \text{ бундан}$$

$$I = \sqrt{\frac{P_n}{R}} = \sqrt{\frac{576}{0,4334}} = 36,4 \text{ А.}$$

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{380}{110} = 3,454;$$

$$n_{\text{max } 1.0} = \frac{U_2 n I \cos \varphi}{U_2 n I \cos \varphi + 2P_n} \cdot 100 = \frac{110 \cdot 3,454 \cdot 36,4 \cdot 1}{110 \cdot 3,454 \cdot 36,4 \cdot 1 + 2 \cdot 576} \cdot 100 = 92,31\%;$$

$$n_{\text{max } 0.8} = \frac{U_2 n I \cos \varphi}{U_2 n I \cos \varphi + 2P_n} \cdot 100 = \frac{110 \cdot 3,454 \cdot 36,4 \cdot 0,8}{110 \cdot 3,454 \cdot 36,4 \cdot 0,8 + 2 \cdot 576} \cdot 100 = 90,56\%;$$

$$n_{\max 0.6} = \frac{U_2 n \cos \varphi}{U_2 n \cos \varphi + 2P_n} \cdot 100 = \frac{110 \cdot 3.454 \cdot 36.4 \cdot 0.6}{110 \cdot 3.454 \cdot 36.4 \cdot 0.6 + 2 \cdot 576} \cdot 100 = 87.8\%.$$

г) Қисқа туташув режимидаги электр занжирининг тўлақаршилиги

$$z = \frac{U_{\text{КТ}}}{I_{1\text{Н}}} = \frac{U_{\text{КТ}} U_1 / 100}{S_{\text{Н}} / U_1} = \frac{8.5 \cdot 380 / 100}{16000 / 380} = 0,7672 \text{ Ом};$$

$$\cos \varphi_{\text{КТ}} = R / z = 0,4334 / 0,7672 = 0,5649.$$

$$x = \sqrt{z^2 - R^2} = \sqrt{0.7672^2 - 0.4334^2} = 0,632 \text{ Ом}.$$

д) Иккиламчичулғамдаги куchlаниш

$$U'_2 = U_1 - I_1 (R \cos \varphi_{\text{юк}} + x \sin \varphi_{\text{юк}}).$$

$$U'_2 = U_1 \text{ шартнинг бажарилиши учун } I_1 (R \cos \varphi_{\text{юк}} + x \sin \varphi_{\text{юк}}) = 0 \text{ бўлиши керак.}$$

Юк ламасиғим характерида, яъни $\varphi_{\text{юк}} < 0$ булганлигиса баббли $I_1 (R \cos \varphi_{\text{юк}} + x \sin \varphi_{\text{юк}}) = 0$, бундан $R \cos \varphi_{\text{юк}} = x \sin \varphi_{\text{юк}}$;

$$R / x = \sin \varphi_{\text{юк}} / \cos \varphi_{\text{юк}} = \operatorname{tg} \varphi_{\text{юк}} = 0.4334 / 0.632 = 0.6857.$$

$$\varphi_{\text{юк}} = \operatorname{arctg} 0.6857 = 34.34^\circ.$$

Тўлаюклама қаршилиги модули

$$z_{\text{юк}} = \frac{U_2}{0.75 I_{2\text{Н}}} = \frac{110}{0.75 \cdot 16000 / 110} = 1,01 \text{ Ом}.$$

$$R_{\text{юк}} = z_{\text{юк}} \cos \varphi_{\text{юк}} = 1,01 \cdot 0,8258 = 0,834 \text{ Ом}$$

$$x_{\text{юк}} = z_{\text{юк}} \sin \varphi_{\text{юк}} = 1,01 \cdot 0,5642 = 0,5698 \text{ Ом}$$

$$z_{\text{юк}} = R_{\text{юк}} - jx_{\text{юк}} = 0.834 - j0,5698 \text{ Ом}.$$

2.5.5 Уланиш схемаси ва гурухи Δ / Y — 11 бўлган учфазалитрансформаторнинг номинал қуввати $S_{\text{Н}} = 40 \text{ кВА}$, номинал қуclаниши $U_2 / U_1 = 10/0,4 \text{ кВ}$, салтиш лаштоки $I_0 = 0,04 \cdot I_{\text{Н}}$, қисқа туташув қувватисрофи $P_{\text{КТ}} = 1,1 \text{ Вт}$, қисқа туташув қуclаниши $U_{\text{КТ}} = 4,5 \%$, стержендаги индукция $B_m = 1,67 \text{ Тл}$.

Қуйидагилар топилсин:

а) салт ишлаш ва қисқа туташув режимларидаги қувват коэффиценти, яъни $\cos \varphi_0$ ва $\cos \varphi_{\text{КТ}}$;

б) чулғамнинг актив R ва индуктив x қаршиликлари;

в) агарда пўлат стерженнинг кесим юзаси $A_n = 654 \text{ см}^2$ бўлса, битта ўрамдаги кучланиш U_y ;

д) агарда ўрамнинг ўртача узунлиги $l_1 = 0,567 \text{ м}$, утказгичнинг (симнинг) кесим юзаси $A_1 = 0,503 \text{ мм}^2$, солиштира қаршилик $\rho = 0,024 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ бўлса, бирламчи актив қаршилик R_1 ;

е) трансформаторнинг иккала чулғамларининг ток зичликлари бир хил бўлса, иккиламчи чулғамнинг симни кесим юзаси A_2 аниқлансин.

Ечиш. Номинал тоқлар

$$I_{1H} = S_H / \sqrt{3U_1} = 40 \cdot 10^3 / \sqrt{3 \cdot 10 \cdot 10^3} = 2,312 \text{ А}$$

$$I_{1H;\phi} = I_{1H} / \sqrt{3} = 2,312 / \sqrt{3} = 1,336 \text{ А}$$

$$I_{2H} = S_H / \sqrt{3U_2} = 40 \cdot 10^3 / \sqrt{3 \cdot 400} = 57,8 \text{ А}$$

Қувваткоэффицентлари

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (\sqrt{3} I_0 U_0) = 195 / (\sqrt{3} \cdot 0,04 \cdot 57,8 \cdot 400) = 0,1218.$$

$$U_{КТН} = U_K U_1 / 100 = 4,5 \cdot 10 \cdot 10^3 / 100 = 450 \text{ В}$$

$$\cos \varphi_{КТ} = P_{КТ} / \sqrt{3} I_{КТ} U_{КТ} = 1100 / \sqrt{3} \cdot 450 \cdot 2,312 = 0,6111.$$

б) активқаршиликни қисқатута шувқувватисрофи орқали хисоблаш мумкин
 $R_{КТ} = P / 3 I_{1H;\phi}^2 = 1100 / 3 \cdot 1,336^2 = 205,4 \text{ Ом};$

$\tan \varphi_{КТ} = x / R$, бундан

$$x = 205,4 \cdot 1,294 = 265,8 \text{ Ом}$$

$$\arccos 0,6111 = 52,3^\circ$$

в.г) ўрамдаги кучланиш вачулғамлардаги ўрамлар сони

$$U_y = 4,44 f B_m A_n = 4,44 \cdot 50 \cdot 1,67 \cdot 65,4 \cdot 10^{-4} = 2,425 \text{ В/ у}$$

$$\omega_1 = U_1 / U_y = 10 \cdot 10^3 / 2,425 = 4124$$

$$\omega_2 = U_2 / \sqrt{3} U_y = 400 / \sqrt{3} \cdot 2,425 = 95,3 = 95$$

д) бирламчи чулғам фазасининг актив қаршилиги

$$R_1 = \rho_{20} \omega_1 l_1 / A_1 = 0,024 \cdot 4124 \cdot 0,567 / 0,503 = 111,6 \text{ Ом}.$$

е, ж) симнинг кўндаланг кесим юзаси ва паст кучланиш чулғамнинг актив қаршилиги

$$A_2 = I_{2H} / j = I_{2H} / (I_{1H;\Phi} / A_1) = A_1 I_{2H} / I_{1H;\Phi} = 0,503 \cdot 57,8 / 1,336 = 21,76 \text{ мм}^2$$

$$R'_2 = R - R_1 = 205,4 - 111,6 = 93,8 \text{ Ом}$$

$$R'_2 = n^2 R_2, \text{ бундан}$$

$$R_2 = R'_2 / n^2 = R'_2 / (\omega_1 / \omega_2)^2 = 93,8 / (4124/95)^2 = 0,05009$$

2.5.6. Уч фазали трансформаторнинг номинал қуввати $S_H = 300 \text{ кВА}$, кучланишлари $U_1 / U_2 = 5/1 \text{ кВ}$; чулғамларнинг уланиши ва гурухи $\Delta / Y - 5$; қисқа туташув кучланишнинг қиймати $U_{KT} = 4,8 \%$, актив қаршилик ташкил этувчиси $U_a = 1,8\%$. Трансформаторнинг иккиламчи чулғами қувват коэффиценти $\cos \varphi = 0,9$ бўлган индуктив юклама билан $1,2 I_{2H}$ юкланган.

Қуйидагилар топилсин :

а) ўрамдаги кучланиш $U_y = 6,8 \text{ В/у}$ бўлганда бирламчи ва иккиламчи чулғамларнинг ўрамлар сони ω_1 ва ω_2 лар;

б) $f = 50 \text{ Гц}$ да магнит оқимининг максимал қиймати Φ ;

в) номинал тоқлар I_{1H}, I_{2H} ва трансформациялаш коэффиценти ;

г) пўлатдаги исроф $P_n = 0,026 S_H$ ва R_1, R_2 (бунда $R_1 = R'_2$) ;

д) қисқа туташув режимида чулғамлардаги номинал қувват исрофи P_r ва қувват коэффиценти $\cos \varphi_{KT}$;

Ечиш . а , б) ўрамлар сони ва максимал магнит оқими

$$\omega_1 = U_1 / U_y = 5000 / 6,8 = 735;$$

$$\omega_2 = U_2 / \sqrt{3} U_y = 1000 / \sqrt{3} \cdot 6,8 = 85;$$

$$\Phi = U_y / 4,44 f = 6,8 / 4,44 \cdot 50 = 0,03063 \text{ Вб.}$$

в) номинал тоқлар ва трансформациялаш коэффиценти

$$I_{1H} = S_H / \sqrt{3} U_1 = 300 \cdot 10^3 / \sqrt{3} \cdot 5 \cdot 10^3 = 34,68 \text{ А}$$

$$I_{1H;\Phi} = I_{1H} / \sqrt{3} = 34,68 / \sqrt{3} = 20,04 \text{ А}$$

$$I_{2H} = S_H / \sqrt{3} U_2 = 300 \cdot 10^3 / \sqrt{3} \cdot 1 \cdot 10^3 = 173,4 \text{ А}$$

$$n = \omega_1 / \omega_2 = 735 / 85 = 8,65.$$

г)

қисқатуташувкучланишнинг актив қаршиликташкілэтувчиси U_a орқалийигинд и актив қаршилик нитопа миз.

$$U_a = I_{1H;\phi} R / U_1 \cdot 100, \text{ бундан}$$

$$R = U_1 U_a / I_{1H;\phi} \cdot 100 = 5000 \cdot 1,8 / 20,04 \cdot 100 = 4,491 \text{ Ом.}$$

1,2 · $I_{1H;\phi}$ юкламаучунчулғамдаги қувватисрофива ФИК.

$$P_r = 3 (1,2 \cdot I_{1H;\phi})^2 R_1 = 3(1,2 \cdot 20,04)^2 \cdot 4,491 = 7,791 \text{ кВт};$$

$$\eta = \frac{\sqrt{3} U_2 \cdot 1,2 I_{2H} \cos \varphi}{\sqrt{3} U_2 \cdot 1,2 I_{2H} \cos \varphi + P_r + P_n} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 1000 \cdot 1,2 \cdot 173,4 \cdot 0,9}{\sqrt{3} \cdot 1000 \cdot 1,2 \cdot 173,4 \cdot 0,9 + 7,791 + 0,026 \cdot 300 \cdot 10^3} \cdot 100 = 95,4 \%$$

$$R_1 = R'_2 \text{ булганиучун}$$

$$R'_2 = R_1 = R / 2 = 4,491 / 2 = 2,25 \text{ Ом}$$

$$R_2 = R'_2 / n^2 = 2,25 / 8,65^2 = 0,03 \text{ Ом.}$$

д)

номинал юкламаучунчулғамлардаги қувватисрофива қисқатуташуврежимидақувваткоэффицентис $\cos \varphi_{KT}$;

$$R_{r.H} = 3 I_{1H;\phi}^2 R = 3 \cdot 20,04^2 \cdot 4,491 = 5410 \text{ Вт} = 5,1 \text{ кВт.}$$

$$\cos \varphi_{KT} = \frac{R}{z} = \frac{R}{U_{KT.H} / I_{KT}} = \frac{R I_{1H;\phi}}{U_{KT} U_1 / 100} = \frac{4,491 \cdot 20,04}{4,8 \cdot 5000 / 100} = 0,375.$$

$$x = \sqrt{z^2 - R^2} = \sqrt{11,47^2 - 4,491^2} = 11,1 \text{ Ом,}$$

буерда:

$$z = U_{KT} / I_{1H} = \frac{4,8 \cdot 5000 / 100}{20,04} = 11,47 \text{ Ом.}$$

2.5.7 Уч фазали трансформаторнинг тўла қуввати $S_H = 63 \text{ кВА}$, кучланишлари $U_1 / U_2 = 21/0,4 \text{ кВ}$; салт ишлаш токи $I_0 = 0,035 \cdot I_H$, салт ишлаш қувват исрофи $P_0 = 0,29 \text{ кВт}$, қиска туташув режимидаги исрофи $P_{r.H} = 1,65 \text{ Вт}$, қиска туташув кучланиши $U_{KT} = 4,5 \%$, уланиши ва гурухи Y/Z-11.

Куйидагилар топилсин :

а) салт ишлаш ва қиска туташув режимларидаги қувваткоэффицентлари $\cos \varphi_0$, $\cos \varphi_{KT}$;

б) йигинди актив R ва индуктив x қаршилиқлар ;

в) номинал юкламадаги ФИК лар n_1 ва $n_{0,8}$, $\cos\varphi = 1$ ва $\cos\varphi = 0,8$ учун ;

д) $\cos\varphi = 1$ ва $\cos\varphi = 0,8$ ларда актив-индуктив характердаги номинал юклама учун иккиламчи чулгамдаги кучланиш $U_{2(0,8)}$.

Ечиш.

а) Номинал ток ва кувват коэффициентлари

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_1} = \frac{63 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 21 \cdot 10^3} = 1,734 \text{ A};$$

$$I_{2H} = \frac{U_1}{U_2} \cdot I_{1H} = \frac{21 \cdot 10^3}{400} \cdot 1,734 = 91,03 \text{ A};$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}I_0 U_0} = \frac{290}{\sqrt{3} \cdot (0.035 \cdot 1.734) \cdot 21 \cdot 10^3} = 0,1315;$$

$$\cos \varphi_{KT} = \frac{P_{r.H}}{\sqrt{3}U_{KT}I_{r.H}} = \frac{P_{r.H}}{\sqrt{3} \frac{U_{KT}U_1}{100} I_{r.H}} = \frac{1650}{\sqrt{3} \frac{4.5 \cdot 21 \cdot 10^3}{100} \cdot 1.734} = 0,592.$$

б) йигинди актив ва индуктив қаршилиқлар

$$P_{r.H} = 3 I_{r.H}^2 R, \text{ бундан}$$

$$R = \frac{P_{r.H}}{3 I_{r.H}^2} = \frac{1650}{3 \cdot 1.734^2} = 183 \text{ Ом}.$$

$$x = \frac{U_{p\phi}}{I_{1H}} = \frac{U_p U_{1H}}{\sqrt{3} \cdot 100 I_{1H}} = \frac{\sqrt{U_k^2 - U_a^2} \cdot U_{1H}}{\sqrt{3} \cdot 100 I_{1H}} = \frac{\sqrt{4.5^2 - 2.54^2} \cdot 21 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 1.734} = 260 \text{ Ом}$$

в) номинал юкламадаги ФИК

$$\eta_1 = \frac{S_H \cos \varphi}{S_H \cos \varphi + P_0 + P_{KT}} \cdot 100 = \frac{63 \cdot 1}{63 \cdot 1 + 0.29 + 1.65} \cdot 100 = 97,01 \%$$

$$\eta_{0,8} = \frac{63 \cdot 0.8}{63 \cdot 0.8 + 0.29 + 1.65} \cdot 100 = 96,29\%$$

г) ток максимуми η учун ток

$$3 I_1^2 R = P_0, \text{ бундан}$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{P_0}{3R}} = \sqrt{\frac{290}{3 \cdot 183}} = 0,727 \text{ A}$$

$$I_2 = n I_1 = \frac{21}{0.4} \cdot 0,727 = 38,17 \text{ A}$$

$$P = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 38,17 = 21,1 \text{ кВт.}$$

д) номинал юклама учун иккиламчи чулгамдаги кучланиш

$$U'_{2\phi} = U_{1\phi} - I(R \cos \varphi \pm x \sin \varphi).$$

$\cos \varphi = 1$ учун ($\sin \varphi = 0$)

$$U'_{1\phi(1)} = \frac{21 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} - 1,734 \cdot 183 = 11,82 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$U_{2(1)} = \frac{\sqrt{3} U'_{2\phi(1)}}{U_1/U_2} = \frac{\sqrt{3} \cdot 11,82 \cdot 10^3}{21/0,4} = 389,5 \text{ В}$$

$\cos \varphi = 0,8$ учун ($\sin \varphi = 0,6$)

$$U'_{1\phi(0,8)} = \frac{21 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} - 1,734 \cdot (183 \cdot 0,8 + 260 \cdot 0,6) = 11,63 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$U_{2(0,8)} = \frac{\sqrt{3} U'_{2\phi(0,8)}}{U_1/U_2} = \frac{\sqrt{3} \cdot 11,63 \cdot 10^3}{21/0,4} = 383,2 \text{ В.}$$

2.5.8 Актив – индуктив юклама харажаткедаги куввати $P = 50$ кВт булганистьемолчи учфазали электр тармоктан трансформатор оркали улаштириш керак. Куйидаги учта трансформатордан биттаси (тежамлиси) танлансин:

III

Номинал кувват, кВт	63	100	160
Чулгамдаги исроф, кВт	1,65	2,6	3,9
Салт ишлаш куввати исрофи, кВт	0,29	0,375	0,55
Топиш керак:			

а) учта трансформаторнинг хам максимум ФИК n учун тула кувватлари

б) $\cos \varphi = 1$ ва $\cos \varphi = 0,8$ учун максимум ФИК n

в) берилган юклама учун ФИК n

г) бир йиллик (8760 соат) кувват исрофлари учун харажатлар K_{63} , K_{100} , K_{160} агарда электр энергиясини нархи $e = 16,5$ сум / (кВт · с) булса

д) энг тежамли трансформаторни ишлатиш жараёнидаги электр энергиясини исрофи учун тежалган йиллик харажатлар

Ечиш.

а) Трансформаторнинг нисбий юкламасини $x = S_1 / S_N$ билан белгилаймиз, у холда чулгамдаги кувват исрофи $P_r = x^2 P_{r.N}$ булади. Энг ката ФИК

$$P_{0,x} = P_r = x^2 P_{r.N}. \text{ Бундан } x = \sqrt{P_0 / P_{r.N}}.$$

Тула кувватни топамиз:

$$x_1 = \sqrt{\frac{P_{01}}{P_{rH1}}} = \sqrt{\frac{0.29}{1.65}} = 0.417$$

$$S_1 = x_1 S_{H1} = 0.417 \cdot 63 = 26.3 \text{ кВА};$$

$$x_{11} = \sqrt{\frac{P_{011}}{P_{rH11}}} = \sqrt{\frac{0.375}{2.6}} = 0.378$$

$$S_{11} = x_{11} S_{H11} = 0.378 \cdot 100 = 37.8 \text{ кВА};$$

$$x_{111} = \sqrt{\frac{P_{0111}}{P_{rH111}}} = \sqrt{\frac{0.55}{3.9}} = 0.375;$$

$$S_{111} = x_{111} S_{H111} = 0.375 \cdot 160 = 60 \text{ кВА}.$$

б) максимум ФИК η

$$\eta_{1\max(1)} = \frac{S_1 \cos \varphi}{S_1 \cos \varphi + 2P_{01}} \cdot 100 = \frac{26.3 \cdot 1}{26.3 \cdot 1 + 2 \cdot 0.29} \cdot 100 = 97.58 \%;$$

$$\eta_{1\max(0.8)} = \frac{S_1 \cos \varphi}{S_1 \cos \varphi + 2P_{01}} \cdot 100 = \frac{26.3 \cdot 0.8}{26.3 \cdot 0.8 + 2 \cdot 0.29} \cdot 100 = 97.4 \%;$$

$$\eta_{11\max(1)} = \frac{S_{11} \cos \varphi}{S_{11} \cos \varphi + 2P_{011}} \cdot 100 = \frac{37.8 \cdot 1}{37.8 \cdot 1 + 2 \cdot 0.375} \cdot 100 = 98 \%;$$

$$\eta_{11\max(0.8)} = \frac{S_{11} \cos \varphi}{S_{11} \cos \varphi + 2P_{011}} \cdot 100 = \frac{37.8 \cdot 0.8}{37.8 \cdot 0.8 + 2 \cdot 0.375} \cdot 100 = 97.5 \%;$$

$$\eta_{111(1)} = \frac{S_{111} \cos \varphi}{S_{111} \cos \varphi + 2P_{0111}} \cdot 100 = \frac{60 \cdot 1}{60 \cdot 1 + 2 \cdot 0.55} \cdot 100 = 98.19 \%;$$

$$\eta_{111(0.8)} = \frac{S_{111} \cos \varphi}{S_{111} \cos \varphi + 2P_{0111}} \cdot 100 = \frac{60 \cdot 0.8}{60 \cdot 0.8 + 2 \cdot 0.55} \cdot 100 = 97.75 \%.$$

в) берилган юклама учун ФИК ни топиш учун тула кувват топилади

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{50}{0.8} = 62.5 \text{ кВт, бундан}$$

$$\eta_{63} = \frac{P}{P + P_{01} + P_{rH} \left(\frac{S}{S_{H1}} \right)^2} \cdot 100 = \frac{50}{50 + 0.29 + 1.65 \left(\frac{62.5}{63} \right)^2} \cdot 100 = 96.32 \%;$$

$$\eta_{100} = \frac{P}{P + P_{01} + P_{rH} \left(\frac{S}{S_{H1}} \right)^2} \cdot 100 = \frac{50}{50 + 0.375 + 2.6 \left(\frac{62.5}{100} \right)^2} \cdot 100 = 97.29 \%;$$

$$\eta_{160} = \frac{P}{P + P_{01} + P_{rH} \left(\frac{S}{S_{H1}} \right)^2} \cdot 100 = \frac{50}{50 + 0.55 + 3.9 \left(\frac{62.5}{160} \right)^2} \cdot 100 = 97.76 \%.$$

г) йиллик исроф харажатлари

$$k_{63} = 8760 e P_1 = 8760 \cdot 16.5 \left[0.29 + 1.65 \left(\frac{62.5}{63} \right)^2 \right] = 274389 \text{ сўм}$$

$$k_{100} = 8760 e P_{11} = 8760 \cdot 16.5 \left[0.375 + 2.6 \left(\frac{62.5}{100} \right)^2 \right] = 201001 \text{ сўм}$$

$$k_{160} = 8760 e P_{111} = 8760 \cdot 16.5 \left[0.55 + 3.9 \left(\frac{62.5}{160} \right)^2 \right] = 101552 \text{ сўм}$$

д) III трансформаторни ишлатиш тежамли I трансформаторни ишлатиш эса тежамсиз экан. Исрофлар кетадиган харажатларни йиллик иктисоди

$$k = k_{63} - k_{160} = 274389 - 101552 = 172837 \text{ сўм}$$

2.5.9 Подстанцияда кувват $S_H = 100 \text{ кВА}$ булган трансформатор ишлатилмокда. Бир йилда (8760 соат) берилган электр энергияси $W_{\text{йил}} =$

165000 кВт·с , актив - индуктив юкламада ($\cos\varphi = 0,8$) энг ката кувват $P_{\max} = 71,5$ кВт. Трансформаторнинг салт шилаш куввати исрофи $P_0 = 1000$ Вт , номинал юклама чулгамидаги исроф $P_{г.н} = 3300$ Вт. Куйидагилар топилсин:

а) Трансформаторнинг йиллик ФИК $\eta_{йил}$

б) йиллик энергия исрофи $W_{йил}$

в) агарда электр энергиясини нархи $e = 12$ сум / (кВт·с) булса , исроф учун йиллик харажатлар .

Ечиш.

а) йиллик ФИК $\eta_{йил}$

$$\eta_{йил} = \frac{W_{йил}}{W_{йил} + 8760P_0 + x^2 a \cdot 8760P_{г.н}} \cdot 100 = \frac{165000}{165000 + 8760 \cdot 1 + 0.8937^2 \cdot 0.145 \cdot 8760 \cdot 3.3} \cdot 100 = 93.16 \%$$

$$\text{бу ерда } x = \frac{S_t}{S_H} = \frac{P_{\max}}{S_H \cos\varphi} = \frac{71.5}{100 \cdot 0.8} = 0.8937;$$

$$k = \frac{W_{йил}}{P_{\max} \cdot 8760} = \frac{165000}{71.5 \cdot 8760} = 0.263$$

(1.10-расмдаги [2] диаграммадан) фойдаланиш коэффициенти $k = 0,263$ учун исроф коэффициенти $a = 0,145$ тугри келади.

б) Энергия исрофи

$$W_{йил} = x^2 P_{г.н} a \cdot 8760 + 8760 P_0 = 0.8937^2 \cdot 3.3 \cdot 0.145 \cdot 8760 + 8760 \cdot 1 = 1210 \text{ кВт·с}$$

в) исроф учун йиллик харажатлар

$$k = W_{йил} e = 12108 \cdot 16,5 = 199782 \text{ сум.}$$

2.5.10. 2.5.9- масладаги трансформатор урнида замонавий трансформатор ишлатилган булиб , унинг параметрлари куйидагича : $S_H = 100$ кВА ; $P_0 = 400$ Вт , $P_{г.н} = 2600$ Вт. Куйидагилар топилсин:

а) Трансформаторнинг йиллик ФИК $\eta_{йил}$ (2.5.9 –масаладаги кийматлардан фойдаланиб);

б) йиллик энергия исрофи $W_{йил}$

в) йиллик исроф харажатлар, агарда электр энергиясини нархи $e = 16,5$ сум / (кВт·с) булса.

г) замонавий трансформаторни куллаганда энергия исрофи харажатларини тежаш ;

д) эски трансформаторни нархи 18000000 сум , замонавий трансформатор нархи 23000000 сум , хакикий иктисоди (фойдаси), кушимча капитал куйилма (инвестиция) хисобига йиллик харажатлар 20.

Ечиш.

а) юклама узгармас булганда x , k ва a параметрлар хам узгармас холда колади. Шулардан хисобга олган холда йиллик ФИК $\eta_{йил}$

$$\eta_{йил} =$$

б) энергия исрофи

$$W_{йил} = 8760 P_0 + x^2 a \cdot 8760 P_{г.н} = 8760 \cdot 0,4 + 0.8937^2 \cdot 0.145 \cdot 8760 \cdot 2,6 = 6142 \text{ кВт·с}$$

в) исроф харажатлар и ва иктисод (фойда)

$$k = W_{\text{ишл}} e = 6142 \cdot 16,5 = 101343 \text{ сум}$$

$$\Delta k = k_9 - k_{10} = 199782 - 101343 = 98439 \text{ сум}$$

г) замонавий трансформаторни куллаганда ортикча капитал куйилма (инвестиция)

$$\Delta k_B = 23000000 - 18000000 = 5000000 \text{ сум}, 20\% \text{ ортикча капитал куйилма (инвестиция) коэффицентини хисобга олганда}$$
$$\frac{5000000}{100} \cdot 20 = 1000000 \text{ сўм}$$

д) хакикий иктисод (фойда)

$$\Delta k' = \Delta k - 1000000 = 5000000 - 1000000 = 4000000 \text{ сўм.}$$

2.6 Мустакил ечиш учун масалалар.

2.6.1 Чулгамларинингуланишсхемаси Y/Y булган уч фазали трансформатор бирламчи чулгамининг линия кучланиши $U_{2л} = 220$ В. Трансформатор чулгамларининг уланиш схемаси Δ/Δ , Y/Δ ва Δ/Y булганда, иккаламчи чулгамнинг уланиш линия кучланишлари аниклансин.

2.6.2 Куп чулгамли трансформаторнинг 220 В га мулжалланган бирламчи чулгамининг урамлар сони $\omega_1 = 1100$. Иккиламчи чулгамлардан тегишлича 6 В, 24 В ва 120 В кучланишлар олинадилар. Шу чулгамларнинг урамлари сони аниклансин.

2.6.3 Тармок кучланиши иккита трансформатор ёрдамида 3000 В дан 400 В гача, сунгра 400 В дан 40 В гача пасайтирилди. Трансформаторларнинг ФИК лари тегишлича $n_1 = 0,85$ ва $n_2 = 0,6$. Иккинчи трансформатордан истеъмол килинаётган актив кувват $P = 5,1$ кВт булса, биринчи трансформаторнинг кириш томонидаги актив кувват аниклансин.

2.6.4 Чулгамларининг уланиш схемаси ва гурухи Δ/Y -11 булган уч фазали трансформаторнинг кучланишлари $U_1 / U_2 = 21000 / 400$ В; бита урамдаги кучланиш $U_y = 9,62$ В / ў; чулгамнинг уртача узунлиги ва чулгам симларининг кесим юзаси: юкори кучланиш томонида $l_{y1} = 1,022$ м, $A_1 = 4,9$ мм²; паст кучланиш томонида $l_{y2} = 0,734$ м, $A_2 = 404,5$ мм²; номинал кувват $S_H = 630$ кВА; салт ишлаш токи $I_0 = 0,021 I_H$; салт ишлаш кувват исрофи $P_0 = 1,49$ кВт; киска туташув куввати исрофи $P_{KT} = 9,25$ кВт; киска туташув кучланиши $U_{KT} = 4,5\%$.

Куйидагилар топилсин:

а) трансформаторнинг икала чулгамининг актив каршиликлари R_1 , R_2 (75°C , $\rho_{75} = 0,0346$ мкОм·м);

б) чулгамлардаги исрофни (салт ишлаш режимида) хисобга олган холда пулатдаги исроф P_n ;

в) бирламчи ва иккиламчи чулгамларнинг номинал токлари I_{1H} , I_{2H}

г) магнит окимнинг максимал киймати Φ

д) киска туташув ва салт ишлаш режимларидаги кувват коэффиценти $\cos \varphi_0$, $\cos \varphi_{KT}$

е) барча индуктив сочилма каршиликлар x_s

2.6.5. Кучланишлари $U_1 / U_2 = 550 / 380$ В булган учта параллел ишлаётган трансформатордан бир фазали истеъмолчи кучланиш олмокда. Трансформаторнинг куйидаги параметрлар берилган: $S_{H1} = 15$ кВА; $S_{H11} = 20$ кВА; $S_{H111} = 19$ кВА; $U_{K1} = 4,2\%$. $U_{K11} = 4,8\%$. $U_{K111} = 5,2\%$.

Юкламанинг параметрлари:

$U_{юк} = U_2 = 380$ кВ; $P_{юк} = 50$ кВт ; $\cos \varphi_{юк} = 0,8$ (инд.)

Куйидагилар аниклансин :

а) хар бир трансформаторнинг номинал токлари : I_{21H} ; I_{211H} ; I_{2111H} ; $I_{1.1H}$; $I_{1.11H}$; $I_{1.111H}$

б) юклама токи $I_{юк}$

в) берилган юклама учун хама трансформаторнинг токлари I_1 ; I_{11} ; I_{111}

г) трансформаторнинг юкланиш коэффицентлари

$$\frac{I_1}{I_{21H}} \cdot 100; \frac{I_{11}}{I_{211H}} \cdot 100; \frac{I_{111}}{I_{2111H}} \cdot 100.$$

д) $U_{KT1} = U_{KT11} = U_{KT111} = 6\%$ булса

трансформаторнинг юкланиш коэффицентлари

$$\frac{I_1^s}{I_{21H}} \cdot 100; \frac{I_{11}^s}{I_{211H}} \cdot 100; \frac{I_{111}^s}{I_{2111H}} \cdot 100.$$

2.6.6. Чулгамлари Y/Y-0 улангуан трансформаторнинг номинал куввати

$S_H = 63$ кВА , номинал кучланиши $U_1 / U_2 = 5500 / 400$ В , $U_{KT} = 6\%$, $U_{K\Gamma a} = 2,38\%$

Куйидагилар топилсин:

а) номинал юклама учун чулгамдаги тоklar I_{1H} , I_{2H} ва кувват исрофи $P_{r.H}$

б) актив R ва индуктив x каршиликлар

в) номинал юкламада ($\cos \varphi = 0,85$ ва $\eta = 94,5\%$) трансформаторнинг пулатдаги кувват исрофи P_n

2.6.7. Чулгамлари $\Delta / Y - 11$ уланган трансформаторнинг номинал куввати $S_H = 250$ кВА , кучланиш $U_1 / U_2 = 21 / 0,4$ кВ. Номинал юклама чулгамдаги исроф $P_{r.H} = 4,6$ кВт , пулатдаги исроф $P_n = 0,75$ кВт. Бир йиллик узатиладиган элетр энергияси $W_{йил} = 185000$ кВт·с . Энг катта кувват $P_{max} = 120$ кВт , $\cos \varphi = 0,68$ (актив-индуктив юклама).

Куйидагилар топилсин:

а) Трансформаторнинг йиллик ФИК $\eta_{йил}$

б) агарда элетр энергияси нархи $e = 0,02$ сум /(кВт·с) булса трансформатордаги исрофларга кетган йиллик харажатлар к;

в) $U_{KT} = 4,5\%$ булса , максимал юклама учун U_2 .

2.6.8. Чулгамлари Y/Δ -11 уланган трансформаторнинг номинал кувати $S_H = 160$ кВА , кучланиш $U_1 / U_2 = 35000 / 400$ кВ, битта урамдаги кучланиш $U_y = 8,75$ В/ у.

Куйидагилар топилсин:

а) номинал тоklar I_{1H}, I_{2H}

б) икала чулгамдаги урамлар сони $\omega_1, \omega_2 = 2 \omega_2$

в) $U_{KT} = 6\%$, $U_{K\Gamma a} = 2,4\%$ булса , актив R индуктив x ва тула киска туташув каршиликлари

г) номинал юкламада чулгамдаги исроф $P_{r.H}$ ва киска туташув холатидаги , кувват коэффиценти $\cos\varphi_{KT}$

д) $R_1 = R_2$ шарт учун иккиламчи чулгамнинг актив каршилиги R_2

е) агарда $\rho_{75} = 0,216$ мкОм·м ва ток зичлиги $j = 3,8$ А/мм² булса , чулгам симларининг узунлиги l_1, l_2

ж) индукциянинг максимал киймати 1,62 Тл булса , магнит утказгичнинг (пулатнинг) кундаланг кесим юзаси A_n

2.6.9 Чулғамлари Y/Δ -11 уланган кучланиш $U_1 / U_2 = 21000 / 400$ кВ, урамдаги кучланиш $U_y = 7,48$ В/ у , номинал кувати $S_H = 160$ кВА , киска туташув куввати исрофи $P_{KT} = 3,9$ кВт; салтишлаш токи $i = 3\%$ салтишлаш куввати исрофи $P_0 = 550$ Вт , $U_{KT} = 4,5\%$

Куйидагилар топилсин:

а) трансформаторнинг икала чулгамининг актив R_1, R_2 ва индуктив x_1, x_2 каршиликлари (бунда $R_1 = R_2$ ва $x_1 = 1,1 x_2$)

б) салт ишлаш токининг актив $I_{oa}(I_n)$ ва реактив (I_μ) ташкил этувчилари

в) асосий магнит окимга мос келувчи индуктив каршилик x_μ ва пулатдаги исрофларга тугри келувчи актив каршилик R_n

г) индукция $B = 1,5$ Тл булса , магнит утказгичнинг кесим юзаси A_n

д) стержен атрофидаги чизилган айлананинг диаметри D_0 (кесим юзасини тулдириш коэффиценти $k_{тул} = 0,86$)

2.6.10. Бир фазали трансформаторнинг параметрлари куйидагича:

$S_H = 6,3$ кВА , $U_1 / U_2 = 1000 / 230$ кВ

$U_{KT} = 5,2\%$ $\cos\varphi_{KT} = 0,423$

$P_0 = 132$ Вт , $i_0 = 8,35\%$

Куйидагилар топилсин:

а) актив R ва индуктив x каршиликлар

Жавоблар

2.6.1. хама холда 380/220 В булади

2.6.2. $\omega_2 = 30$ $\omega_3 = 600$

2.6.3. $P_1 = 10$ кВт

2.6.4. а) $R_1 = 15,75$ Ом $R_2 = 0,0015$ Ом ; б) $P_n = 1488$ Вт; в) $I_{1H} = 17,34$ А $I_{2H} = 910$ А г) $\Phi = 4,33 \cdot 10^{-2}$ Вб д) $\cos\varphi_0 = 0,1126$ $\cos\varphi_{KT} = 0,3263$

е) $x_S = 89,4$ Ом

- 2.6.5. а) $I_{21H}=39,47$ А $I_{211H} = 52,63$ А $I_{2111H} = 47,37$ А $I_{1,1H} = 27,28$ А
 $I_{1,11H} = 36,37$ А $I_{1,111H} = 32,47$ А б) $I_{\text{юк}} = 164,5$ А в) $I_1 = 52,48$ А
 $I_{11} = 61,22$ А $I_{111} = 50,88$ А г) $(I_1/I_{21H}) * 100 = 133\%$;
 $(I_{11}/I_{211H}) * 100 = 116\%$; $(I_{111}/I_{2111H}) * 100 = 107\%$;
 д) $(I_1/I_{21H}) * 100 = (I_{11}/I_{211H}) * 100 = (I_{111}/I_{2111H}) * 100 = 118\%$
- 2.6.6. а) $I_{1H} = 6,621$ А, $I_{2H} = 91,04$ А $P_{r.H} = 1500$ Вт б) $R = 11,54$ Ом
 $x_S = 26,7$ Ом $P_n = 1610$ Вт
- 2.6.7. а) $n_{\text{ул}} = 95,63\%$ б) $k = 43$ сум в) $U_2 = 388$ В
- 2.6.8. а) $I_{1H} = 2,664$ А, $I_{2H} = 231$ А б) $\omega_1 = 2312$, $\omega_2 = 2$ $\omega_2 = 2 * 15 = 30$
 в) $R = 184$ Ом $z_k = 457$ Ом $x_S = 419$ Ом г) $P_{r.H} = 3850$ Вт
 $\cos \varphi_{KT} = 0,4$ д) $R_2 = 0,017$ Ом е) $l_1 = 2941$ м, $l_2 = 32,75$ м ж) $A_n = 243$ см²
- 2.6.9. а) $R_1 = 33,6$ Ом , $R_2 = 33,6$ Ом $x_1 = 54,5$ Ом , $x_2 = 49,5$ Ом б) $I_\mu = 0,1304$ А $I_n = 0,01505$ А в) $x_\mu = 93$ кОм $R_n = 806$ кОм г) $A_n = 213,2$ см²
 д) $D_0 = 177$ мм
- 2.6.10. а) $R = 3,492$ Ом $x_S = 7,45$ Ом

3- боб . Асинхрон машиналар

3.1 Асинхрон машинанинг тенгламалари ва параметрларини келтириш

Асинхрон машинанинг статор чулгамида ҳосил булган ЭЮК

$$E_1 = 4,44 f \omega_1 k_{r1} \Phi , \quad (3.1)$$

Бу ерда : f - частота ; ω_1 -статор чулгаминингурамлар сони ; k_{r1} – статор чулгамининг чулгам коэффициенти ; Φ - магнит оқим .

Ротор чулгамида ҳосил булган ЭЮК

$$E_2 = 4,44 f \omega_2 k_{r2} \Phi , \quad (3.2)$$

Бу ерда $S = \frac{n_1 - n}{n_1}$ сирпаниш; ω_2 -ротор

чулгаминингурамлар сони ; k_{r2} – ротор чулгамининг чулгам коэффициенти.

Асинхрон машинанинг трансформация коэффициенти

$$K_{TP} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1 k_{r1}}{\omega_2 k_{r2}} . \quad (3.3)$$

ЭЮК нинг келтирилган киймати

$$E_2 = K_{TP} E_1 = \frac{\omega_1 k_{r1}}{\omega_2 k_{r2}} \cdot 4,44 f_1 \omega_1 k_{r1} \Phi = 4,44 f_1 \omega_1 k_{r1} \Phi = E_1 = E. \quad (3.4)$$

Токнинг келтирилган киймати

$$I_2' = \frac{m_2}{m_1} \frac{I_2}{k_{TP}} , \quad (3.5)$$

Бу ерда : m_1 , m_2 – статор ва ротор фазалар сони.

Келтирилган актив каршилиқ

$$R_2' = \frac{m_1}{m_2} k_{TP}^2 R_2. \quad (3.6)$$

Келтирилган индуктив каршилиқ

$$x_2' = \frac{m_1}{m_2} k_{\text{TP}}^2 x_2 . \quad (3.7)$$

Келтирилган тула каршилиқ

$$z_2' = \frac{m_1}{m_2} k_{\text{TP}}^2 z_2 . \quad (3.8)$$

3.2. Асинхрон машинанинг кувват ва исрофлар

Уч фазали асинхрон мотори тармокдан P_1 кувватни истеъмол қилади

$$P_1 = 3 U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (3.9)$$

Статор пулат узагидан исроф P_{n1} , чулгамдаги исроф P_{r1} .

Пулатдаги исроф

$$P_{n1} = P_{\text{я1}} + P_{\text{Т1}}, \quad (3.10)$$

Бу ерда $P_{\text{я1}}$, $P_{\text{Т1}}$ - статор ярмосидаги ва тишларидаги исроф.

Ярмодаги исроф

$$P_{\text{я1}} = 2 P_{1,0} B_{\text{я1}}^2 m_{\text{я1}} \quad (3.11)$$

Тишлардаги исроф

$$P_{\text{Т1}} = 3 P_{1,0} (B_{\text{Т1}} k_{\delta})^2 m_{\text{Т1}} \quad (3.12)$$

Бу ерда : $P_{1,0}$ - статор пулатидаги солиштирма исроф, Вт/кг ; $B_{\text{я1}}$ - ярмодаги уртача индукция , Тл ; $m_{\text{я1}}$ - якорнинг массаси , кг; $m_{\text{Т1}}$ - тишларнинг массаси , кг; $B_{\text{Т1}}$ - тишлардаги уртача индукция , Тл k_{δ} - хаво бушлиги (зазор) коэффициент .

Статор чулгамидаги исроф

$$P_{r1} = 3 I_1^2 R \quad (3.13)$$

Бу ерда I_1 — статор фазасидаги ток ; R - статор фазаси чулгамининг 75°C даги актив каршилиги .

$$R_1 = \rho_{75} \frac{I_1^2 \omega_1}{a_1 c_1 A_1}, \quad (3.14)$$

Бу ерда : l_1 – утказкичнинг (симнинг) уртача узунлиги , a_1 - параллел шахобчалар сони, c_1 - паздаги элементар утказгичлар сони. Статор чулгамидаги исрофни мис симлар массаси ва ундаги ток зичлиги оркали ҳам топиш мумкин.

$$P_{r1} = 2,42 j_1^2 m_{r1} \quad (3.15)$$

Электромагнит кувват

$$P_{\text{Э}} = P_1 - (P_{n1} + P_{r1}) = P_1 - P_{\text{ИСТ1}} \quad (3.16)$$

Бу ерда $P_{\text{ИСТ1}}$ – статор чулгамини истеъмол қиладиган кувват .

Ротордаги исроф пулатдаги P_{n2} ва чулгамдаги P_{r2} исрофлардан иборат

$$P_{\text{ИСТ1}} = P_{n2} + P_{r2}$$

Фаза роторли асинхрон машинада механик исроф

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{Э}} - (P_{n2} + P_{r2} + P_{\text{юк}}), \quad (3.17)$$

Бу ерда : $P_{\text{юк}}$ - юклама куввати

Валдаги кувват

$$P = P_{\text{мех}} - P_{\text{Т,В}}, \quad (3.18)$$

Бу ерда : $P_{Т,В}$ - титраш ва вентилиция исрофи .

Номинал сирпаниш ротор пулатдаги кувват исрофи жуда кичик булади шу сабабли уни хисобга олмаса ҳам булади.

Ротордаги электр исрофи

$$P_{r2} = m_2 I_2^2 R_2 = m_1 (I_2)^2 R_2 . \quad (3.19)$$

Бу кувват исрофи худди (3.15) формула сингари ёзиш мумкин

$$P_{r2} = 2,42 j_2^2 m_{r2} . \quad (3.20)$$

Киска туташган роторли асинхрон моторларда стержен ва контакт халкадаги исрофлар

$$P_{стер} = Z_2 I_{стерж}^2 \rho \frac{I_{стерж}}{A_{стерж}} \quad (3.21)$$

$$P_{хал} = 2 I_{хал}^2 \rho \frac{D_{хал} \pi}{A_{хал}}$$

Ротордаги исроф

$$P_{r2} = P_{стер} + P_{хал}$$

Агарда стержен ва халкалар бир хил материалдан тайёрланган булса , у холда

$$P_{r2} = \frac{\rho}{\rho'} (m_{стерж} S_{стерж}^2 + m_{хал} S_{хал}^2), \quad (3.22)$$

Бу ерда : ρ - чулгам материалынинг солиштирма қаршилиги ; ρ – чулгам материалынинг зичлиги .

Тула механик кувват

$$P_{мех} = P_{\Omega} - (1 - S) \quad (3.23)$$

Чулгамдаги исроф

$$P_r \approx P_{\Omega} S \quad (3.24)$$

3.3. Асинхрон машинанинг моменти

Асинхрон машинанинг электромагнит қуввати момент билан қуйидагича боғланган

$$P_{\Omega} = M \cdot 2\pi n. \quad (3.25)$$

(3.19) ва (3.24) формулалардан фойдаланиб, моментни тахминий қуйидагича ёзиш мумкин

$$M = 9.55 \frac{3}{n} U_1^2 \frac{R_2'/S}{(R_1 + R_2'/S)^2 + x^2}, \quad (3.26)$$

бу ерда: $x = x_1 + x_2'$; n – синхрон айланиш частотаси, айл/мин; U_1 – кучланиш, В; R , x – актив ва индуктив қаршиликлар, Ом.

Юргизиш моменти ($S=1$)

$$M_{юр} = 9.55 \frac{3}{n} I_{2к.т}^2 R_2' , \quad (3.27)$$

бу ерда: $I_{2к.т}^2$ – ротордаги келтирилган қиска туташув токи.

Моторнинг тахминий максимал моменти

$$M_{max} = 9.55 \frac{3}{n} U_1^2 \frac{1}{2(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x^2})}. \quad (3.28)$$

Критик сирпаниш

$$S_{кр} \approx R_2' / x . \quad (3.29)$$

(3.26) ва (3.28) формулалардан фойдаланиб, $M/M_{\max}$ нисбатини топамиз

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2}{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}}} \quad (3.30)$$

3.4. Намунавий масалалар ечиш

Статор чулғами Y уланган учун фазали тўрт кутбли асинхрон моторнинг куйидаги параметри берилган:

$$U_n = 380\text{В}, \quad I_n = 5.6\text{А}, \quad P_n = 2.8\text{ кВт}, \quad f = 50\text{ Гц}, \quad \eta_n = 84\%, \\ R_1 = 1.8\text{ Ом}, \quad R_2 = 2.9\text{ Ом}, \quad x_1 = 2.9\text{ Ом}, \quad x_2 = 3.6\text{ Ом}, \quad x_\mu = 102$$

Ом.

Куйидагилар аниқлансин:

а) ротор пўлатдаги исроф хисобга олинмасдан, $P_{\text{т.в}} = 0.01 P_n$ учун номинал айланиш частотаси;

б) моторнинг қисқа туташув токи ва юргизиш моменти.

Ечиш.

а) мотор истеъмол қилинаётган қувват

$$P_{1n} = P_n / \eta = 2.8 / 0.84 = 3.33\text{ кВт}.$$

Статордаги қувват коэффиценти

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_{1n}}{\sqrt{3}U_n I_n} = \frac{3330}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 5.6} = 0.905.$$

Статор токининг вектор кўриниши

$$\dot{I}_1 = I_1 \cos\varphi_1 + j I_1 \sin\varphi_1 = 5.6 \cdot 0.905 + j 5.6 \cdot 0.436 = 5.07 + j 2.44\text{ А}$$

Тахминий салт ишлаш токи

$$\dot{I}_1 = j \frac{U_1}{x_1 + x_\mu} = j \frac{220}{2.9 + 102} = j 2.1\text{ А}.$$

Ротор токининг келтирилган қиймати

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_0 - \dot{I}_1 = j 2.1 - 5.07 - j 2.44 = -5.07 - j 0.34\text{ А}.$$

$$I'_2 = 5.08\text{ А}.$$

Ротор чулғаидаги исроф

$$P_{r2} = 3 I'^2_2 R'_2 = 3 \cdot 5.08^2 \cdot 2.9 = 224.5\text{ Вт}$$

Механик қувват

$$P_{\text{мех}} = P_n + P_{\text{т.в}} = P_n + 0.01 P_n = 2.8 + 0.01 \cdot 2.8 = 2.83\text{ кВт}$$

Номинал сирпаниш

$$S_n = \frac{P_{r2n}}{P_{\Sigma n}} = \frac{P_{r2n}}{P_{r2n} + P_{\text{мех}}} = \frac{224.5}{224.5 + 2830} = 0.0735 = 7.35\%.$$

б) тўла қаршилиқ

$$z_k = \sqrt{R^2 + x^2} = \sqrt{(1.8 + 2.9)^2 + (2.9 + 3.6)^2} = \sqrt{22.1 + 42.25} = 8.02\text{ Ом}$$

Қисқа туташув токи

$$I_{\text{к.т}} = I'_{2\text{к.т}} = \frac{U_1}{z_k} = \frac{380/\sqrt{3}}{8.02} = 27.4\text{ А}.$$

Синхрон айланиш частотаси

$$n = \frac{60f}{P} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500\text{ айл/мин}.$$

Юргизиш моменти

$$M_{\text{юр}} = 9.55 \frac{3}{n} I_{2\text{к.т}}' R_2' = 9.55 \frac{3}{n} (27.4)^2 \cdot 2.9 = 41.6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3.4.2. Статор чулғами Δ уланган учун уч фазали тўрт кутбли асинхрон моторнинг куйидаги номинал қийматлари берилган: $U_n=380\text{В}$, $f=50 \text{ Гц}$, $P_n=3.7 \text{ кВт}$, $\cos\varphi_n=0.7$

$\eta_n=0.85$; $n_n=1460 \text{ айл/мин}$.

Қуйидагилар топилсин:

а) статорнинг ички диаметри $D=135 \text{ мм}$, пўлат ўзак узунлиги $l=175 \text{ мм}$, статор пазлари сони $z_1 = 36$, пазларидаги симлар сони $z_1 = 36$, статор чулғамининг чулғам коэффиценти $k_{r1} = 0.831$ бўлса, ҳаво бўшлиғидаги ўртача индукция;

б) ҳаво бўшлиғи $\delta = 0.5 \text{ мм}$, ҳаво бўшлиғи коэффиценти $k_\delta = 1.128$, тишларнинг ўлчамлари: $v_1=4.9 \text{ мм}$, $L_{T1}=18.5 \text{ мм}$, $v_2=5.8 \text{ мм}$, $L_{T2}=25 \text{ мм}$, ротор пазлари сони $z_2 = 30$, пакетларни пўлат билан тўлдириш коэффиценти $k_n = 0.93$ бўлса, ҳаво бўшлиғидаги ва тишлардаги магнит кучланишлар;

в) $h_{я1} = 35 \text{ мм}$, $h_{я2} = 14.4 \text{ мм}$ бўлса, ярмодаги индукция;

г) чулғам иккита параллел мис симдан тайёрланган бўлса ($c_1=2$, $d=0.9 \text{ мм}$), ток зичлиги.

Ечиш.

а) кутб ва фазага тўғри келувчи пазлар сони

$$q = \frac{z_1}{2pm_1} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3.$$

Статор чулғами фазасидаги ўрамлар сони

$$\omega_1 = pq_1z_1 = 2 \cdot 3 \cdot 36 = 216.$$

Магнит оқим

$$\Phi \approx \frac{U_1}{4.44f_1\omega_1k_{r1}} = \frac{380}{4.44 \cdot 50 \cdot 216 \cdot 0.831} = 0.954 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}.$$

Қутб бўлинмаси

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{0.135 \cdot 3.14}{2 \cdot 2} = 0.106 \text{ в/}$$

Ҳаво бўшлиғидаги ўртача индукция

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\tau \cdot l} = \frac{0.954 \cdot 10^{-2}}{0.106 \cdot 0.175} = 0.5143 \text{ Тл}.$$

б) $\alpha_i' = 0.77$ деб қабул қиламиз ва ҳаво бўшлиғидаги максимал индукцияни топамиз

$$B_{\delta m} = \frac{B_\delta}{\alpha_i'} = \frac{0.5143}{0.77} = 0.668 \text{ Тл}.$$

Ҳаво бўшлиғининг магнит кучланиши

$$F_{m\delta} = \frac{k_\delta \cdot \delta}{\mu_0} B_{\delta m} = \frac{1.128 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 0.668}{1.257 \cdot 10^{-6}} = 299 \text{ А}.$$

Тишлардаги индукциянинг топиш учун пазлар бўлинмасини топиш
ЛОЗИМ

$$\tau_{n1} = \frac{\pi D}{z_1} = \frac{135 \cdot 3.14}{36} = 11.8 \text{ мм};$$

$$\tau_{n2} = \frac{\pi D}{z_2} = \frac{135 \cdot 3.14}{30} = 14.13 \text{ мм}.$$

Тишлардаги индукция

$$B_{T1} = \frac{\tau_{n1} l}{B_1 l_{n1}} B_{\delta T} = \frac{11.8 \cdot 175}{4.9 \cdot 0.93 \cdot 175} \cdot 0.668 = 1.725 \text{ Тл};$$

$$B_{T2} = 0.95 \frac{\tau_{n2} l}{B_2 l_{n2}} B_{\delta T} = 0.95 \frac{14.13 \cdot 174}{5.8 \cdot 0.93 \cdot 175} \cdot 0.668 = 1.66 \text{ Тл}.$$

Шу индукцияларга мос келувчи

Майдон кучланганликлари

$$H_{T1} = 110 \text{ А/см}; \quad H_{T2} = 75 \text{ А/см}.$$

Магнит кучланишлар

$$F_{mT1} = H_{T1} L_{T1} = 110 \cdot 1.85 = 204 \text{ А}.$$

$$F_{mT2} = H_{T2} L_{T2} = 75 \cdot 2.5 = 188 \text{ А}.$$

Тўйиниш коэффициенти

$$k_T = \frac{F_{mT1} + F_{mT2}}{F_{m\delta}} = \frac{204 + 188}{299} = 1.31.$$

в) ярмодаги индукция

$$B_{я1} = \frac{\Phi}{2h_{я1} l_1 k_{\pi}} = \frac{0.954 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0.035 \cdot 0.39 \cdot 0.175} = 0.837 \text{ Тл}.$$

$$B_{я2} = 0.95 \frac{\Phi}{2h_{я2} l_2 k_{\pi}} = 0.95 \frac{0.954 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0.0144 \cdot 0.93 \cdot 0.175} = 2.035 \text{ Тл}.$$

г) моторнинг тўла қувват

$$S_H = \frac{P_H}{\eta_H \cos \varphi_H} = \frac{3.7}{0.85 \cdot 0.7} = 6.22 \text{ кВА}.$$

Номинал линия токи

$$I_{1ЛН} = \frac{S_H}{\sqrt{3} U_H} = \frac{6.22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 9.5 \text{ А}$$

Фаза токи $I_{1Н} = I_{1ЛН} / \sqrt{3} = 9.5 / \sqrt{3} = 5.5 \text{ А}$ (Δ уланишда)

Ток зичлиги

$$J_1 = I_{1Н} / c_1 a_1 A_1 = \frac{5.5}{2 \cdot 1 \cdot 0.636} = 4.32 \text{ А/мм}^2.$$

Параллел шохобчалар сони ва кесим $a_1=1$;

$$A_1 = d^2 \pi / 4 = 0.9^2 \cdot 3.14 / 4 = 0.636 \text{ мм}^2.$$

3.4.3. Уч фазали қисқа туташган роторли асинхрон моторнинг қуйидаги параметрлари берилган:

$U_{Н\Delta}=380 \text{ В}$, $I_H=20.3 \text{ А}$, $P_H=10 \text{ кВт}$, $f=50 \text{ Гц}$, $2p=4$, $\eta_H=87\%$, $P_{\pi}=382 \text{ Вт}$, $R_1=1.135 \text{ Ом}$, $R'_2=1.28 \text{ Ом}$, $x_{\mu}=79 \text{ Ом}$, $x_1=2.7 \text{ Ом}$, $x'_2=3.8 \text{ Ом}$.

Топиш керак:

а) юргизиш токи;

б) айланма диаграммани қуриш учун керак бўлган қийматлар;

в) ишчи ва критик сирпаниш;

г) номинал, юргизиш ва максимал моментлар.

Ечиш.

а) қисқа туташув тўла қаршилиги

$$Z_{к.тн} = \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2} = \sqrt{(1.135 + 1.28)^2 + (2.7 + 3.8)^2} =$$

6.93 Ом

Номинал кучланишдаги қисқа туташув токи

$$I_{K.TH} = \frac{U_1}{z_K} = \frac{380}{6.93} = 54.83 \text{ A.}$$

Номинал фаза токи

$$I_{H\Phi} = I_H / \sqrt{3} = 20.3 / \sqrt{3} = 11.73 \text{ A } (\Delta \text{ уланганда})$$

Юргизиш токининг карралиги

$$\frac{I_{KTH}}{I_{H\Phi}} = \frac{54.83}{11.73} = 4.67;$$

б) айланма диаграммада қисқа туташув нуқтаси маълум:

$$I_{K.TH} = 54.83 \text{ A.}$$

Қисқа туташувдаги қувват коэффиценти

$$\cos \varphi_{KT} = \frac{R}{z_{KT}} = \frac{R_1 + R'_2}{z_{KT}} = \frac{1.35 + 1.28}{6.93} = 0.348.$$

$S = \infty$ нуқтадаги қийматлар

$$I_{\infty} = \frac{U_1}{z_{\infty}} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}} = \frac{380}{\sqrt{1.135^2 + (2.7 + 3.8)^2}} = 57.6 \text{ A.}$$

$$\cos \varphi_{\infty} = \frac{R_1}{z_{\infty}} = \frac{1.135}{\sqrt{1.135^2 + (2.7 + 3.8)^2}} = 0.172.$$

$S=0$ нуқтадаги қийматлар

$$I_0 \approx \frac{U_1}{x_{\mu} + x_1} = \frac{380}{79 + 2.7} = 4.65 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 U_1 I_0};$$

$$P_0 = P_{r.o} + P_{\pi} + P_{T.B}$$

$$P_{r.o} = 3 I_0^2 R_1 = 3 \cdot 4.65^2 \cdot 1.135 = 73.7 \text{ Вт};$$

$$P_{\pi} = 382 \text{ Вт},$$

$$P_{T.B} = 0.01 P_H = 0.01 \cdot 10 \cdot 10^3 = 100 \text{ Вт},$$

$$P_0 = 73.7 + 382 + 100 = 555.7 \text{ Вт}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{555.7}{3 \cdot 380 \cdot 4.65} = 0.105.$$

в) истеъмол қилинаётган қувват

$$P_1 = P_H / \eta_H = 10 / 0.87 = 11.5 \text{ кВт}$$

Статор чулғамидаги исроф

$$P_{r.1} = 3 I_{TH}^2 R_1 = 3 \cdot 11.73^2 \cdot 1.135 = 468.5 \text{ Вт}$$

Электромагнит қувват

$$P_{\Delta} = P_1 - P_{ист} = P_1 - (P_{\pi} + P_{r.1}) = 11500 - (382 + 468.5) = 10650 \text{ Вт}$$

Ротор пўлатдаги исрофни ҳисобга олмасак ротор чулғамидаги исроф

$$P_{r.1} = P_{\Delta} - (P_{\pi} + P_{T.B}) = 10650 - (10000 + 100) = 550 \text{ Вт}.$$

Номинал сирпаниш

$$S_H = \frac{P_{r.2H}}{P_{\Delta H}} = \frac{550}{10650} = 0.0516 = 5.16\%$$

Критик сирпаниш

$$S_{KP} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}} = \frac{1.28}{\sqrt{1.135^2 + (2.7 + 3.8)^2}} = \frac{1.28}{6.6} = 0.194 = 19.4\%.$$

г) номинал моменти

$$M_H = 9.55 \frac{P_3}{b} = 9.55 \frac{10650}{1500} = 67.8 \text{ Н·м},$$

$$n = \frac{60f}{P} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ айл/мин.}$$

Текширамиз:

$$M_H = 9.55 \frac{P_H}{n_H} = 9.55 \frac{P_H}{(1-s)n} = 9.55 \frac{10000}{(1-0.0516) \cdot 1500} = 67.1 \text{ Н·м}$$

фарқ 0.7 Н·м, яъни 1% га яқин.

Юргизиш моменти

$$M_{\text{юр}} = 9.55 \frac{3I_{2KT}^2 R_2'}{n} \approx 9.55 \frac{3I_{КТН}^2 R_2}{n} = 9.55 \frac{3 \cdot 54.83^2 \cdot 1.28}{1500} = 73.6 \text{ Н·м.}$$

Юргизиш моментининг номинал моментга нисбати

$$\frac{M_{\text{юр}}}{M_H} = \frac{73.6}{67.8} = 1.08 > 1.$$

Максимал момент

$$M_{\text{max}} = \frac{9.55}{n} 3U_1^2 \frac{1}{2(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x^2})} = \frac{9.55}{1500} \cdot 3 \cdot 380^2 \cdot \frac{1}{2(1.135 + \sqrt{1.135^2 + 6.5^2})} = 166.8$$

Н·м

$$x = (x_1 + x_2') = (2.7 + 3.8) = 6.5 \text{ Ом.}$$

Максимал моментнинг номинал моментга нисбати

$$\frac{M_{\text{max}}}{M_H} = \frac{166.8}{67.8} = 2.46.$$

3.4.4. 3.4.2 – масаладан ротор чулғами узунлигининг ярми $I_1=342$ мм.

Ротор чулғами қисқа туташтирилган, стерженнинг узунлиги $I_{\text{стер}}=190$ мм, кўндаланг кесим юзаси $A_{\text{стер}}=72$ мм², қисқа туташтирувчи ҳалқанинг диаметри $D_{\text{хал}}=103$ мм, унинг кўндаланг кесим юзаси $A_{\text{хал}}=310$ мм. Стержен ва ҳалқа бир хил материалдан (AlSi12) тайёрланган бўлиб, солиштирма қаршилиги $\rho_{75}=0.05$ мкОм·м.

Қуйидагилар топилсин:

а) статор ва ротор чулғамининг келтирилган қаршиликлари;

б) агарда $m_{r1}=5.05$ кг, $m_{\text{стер}}=1.12$ кг, $m_{\text{хал}}=0.25$ кг, ток зичлиги $J_1=4.32$ А/мм²,

$J_{\text{стер}}=1.92$ А/мм², $J_{\text{хал}}=1.06$ А/мм² бўлса, чулғамлардаги исроф;

Ечиш.

а) 3.4.2 масаладаги параметрлардан фойдаланиб

$$R_1 = \rho_{75} \frac{l_1 2\omega_1}{a_1 c_1 A_1} = 0.0216 \frac{0.342 \cdot 2 \cdot 216}{1 \cdot 2 \cdot 0.636} = 2.51 \text{ Ом.}$$

Ротор чулғамининг келтирилган қаршилиги

$$R_2' = \frac{4m_1(\omega_1 k_{r1})^2}{z_2} \left(\rho_{\text{стер}} \frac{I_{\text{стер}}}{A_{\text{стер}}} + \frac{z^2}{4\rho^2 \pi^2} \cdot 2 \cdot \frac{D_{\text{хал}} \pi}{A_{\text{хал}}} \rho_{\text{стер}} \right) =$$

$$= \frac{43(216 \cdot 0.83)^2}{30} \left(0.05 \frac{0.19}{72} + \frac{30}{4 \cdot 2^2 \cdot 3.14^2} \cdot 2 \cdot \frac{0.103}{310} \cdot 0.05 \right)$$

$$= 1.71 + 0.26 = 1.97 \text{ Ом.}$$

б) статор чулғаидаги исроф

$$P_{r1} = 2.47 J_r^2 m_2 = 2.47 \cdot 4.32^2 \cdot 5.05 = 28.1 \text{ Вт}$$

Ротор чулғаидаги исроф

$$P_2 = 18.2(m_{\text{стер}} J_{\text{стер}}^2 + \Gamma_{\text{хал}} J_{\text{хал}}^2) = 18.2(1.12 \cdot 1.92^2 + 0.25 \cdot 1.06^2) = 80.2 \text{ Вт}$$

3.4.5. 3.4.2 – масаладаги параметрларга асосан асосий магнит оқимиға тўғри келувчи индуктив қаршилик ҳисоблансин. Узунлик бирлигидаги солиштирма магнит ўтказувчанликлар:

$$\lambda_{\text{п1}} = 2.2 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}, \lambda_{\text{п2}} = 0.75 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}, \lambda_{\text{тип}} = 0.56 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}, \lambda_{\text{кий}} = 0.54 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}.$$

Ҳаво бўшлиғидаги сочилма коэффиценти $\delta_{\delta 1} = 1.11 \cdot 10^{-2}$, $\delta_{\delta 2} = 1.32 \cdot 10^{-2}$. Демпфирловчи коэффицент $\Delta = 0.985$.

Ечиш.

Ҳаво бўшлиғидаги асосий магнит оқимиға мос келувчи индуктив қаршилик

$$x_{\mu} = \frac{4}{\pi} \mu_0 f_1 m_1 \omega_1^2 k_{r1}^2 \frac{\tau l_n}{p k_{\delta} \delta (k_T + 1)} = \frac{4}{\pi} \cdot 1.257 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 3 \cdot (216 \cdot 0.831)^2 \times \\ \times \frac{0.106 \cdot 0.175}{2 \cdot 1.128 \cdot 0.5 \cdot 10^{-2} (1.31 + 1)} = 55.1 \text{ Ом}.$$

Паздаги сочилма индуктив қаршилик

$$x_{\text{сп1}} = 4 f_1 \pi \frac{\omega_1^2}{p} \left(\frac{k_{r1}}{k_{r2}} \right)^2 I_p \frac{\lambda_{\text{п}}^2}{q_2} = 4 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot \frac{216^2}{2} \left(\frac{0.831}{1} \right)^2 \times \\ \times 17.5 \cdot \frac{0.75 \cdot 10^{-8}}{2.5} = 0.53 \text{ Ом}.$$

Чулғамнинг тирсак қисмидаги сочилма индуктив қаршилик ($l_1 = 34.2 \text{ см}$)

$$x_{\text{стт1}} = 4 f_1 \pi \frac{\omega_1^2}{p} I_p \frac{\lambda_{\text{тип}}}{q_1} = 4 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot \frac{216^2}{2} \cdot 17.5 \times \\ \times \frac{0.56 \cdot 10^{-8}}{3} = 0.48 \text{ Ом}.$$

Ҳаво бўшлиғидаги сочилма индуктив қаршилик

$$x_{s\delta 1} = \Delta \sigma_{\delta 1} x_{\mu} = 0.985 \cdot 1.11 \cdot 10^{-2} \cdot 55.1 = 0.6 \text{ Ом} \\ x'_{s\delta 2} = \sigma_{\delta 2} x_{\mu} = 1.32 \cdot 10^{-2} \cdot 55.1 = 0.73 \text{ Ом}.$$

Паз қийшиқлигидаги сочилма индуктив қаршилик

$$x'_{\text{скки}} = 4 f_1 \pi \frac{\omega_1^2}{p} I_p \frac{\lambda_{\text{кий}}}{q_1} = 4 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot \frac{216^2}{2} \cdot 17.5 \times \\ \times \frac{0.54 \cdot 10^{-8}}{3} = 0.46 \text{ Ом}.$$

Машинанинг йиғинди индуктив қаршилиги

$$x_s = x_{\text{сп1}} + x'_{\text{сп1}} + x_{\text{стт1}} + x_{s\delta 1} + x'_{s\delta 2} + x'_{\text{скки}} = 1.88 + 0.53 + 0.48 + 0.6 + 0.73 + 0.46 = 4.68 \text{ Ом}.$$

3.4.6. 8 қутбли уч фазали асинхрон моторнинг номинал кучланиши $U_n = 380 \text{ В}$; $I_n = 51 \text{ А}$; $n_n = 725 \text{ айл/мин}$; $\frac{M_{\text{max}}}{M_n} = 3.3$; ротор занжирнинг актив қаршилиги $R_2 = 0.07 \text{ Ом}$ (статор занжиридаги актив қаршилик ҳисобга олинмасин).

Қуйидагилар топилсин:

- критик сирпаниш;
- бир хил юкламада кучланишни 350 В гача камайтириб, ишчи сирпаниш;

Ечиш.

- синхрон айланиш частотаси $n_1 = 750 \text{ айл/мин}$.

Номинал сирпаниш

$$S_H = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{750 - 725}{750} = 0.033.$$

$$\frac{M_H}{M_{max}} = \frac{2}{\frac{S_H}{S_{KP}} + \frac{S_{KP}}{S_H}} = \frac{1}{3.3}.$$

бундан S_{KP} ни топиб, S_H ўрнига қўйсақ $S_{KP}^2 - 0.22S_{KP} + 0.0011 = 0$ кўринишдаги иккинчи даражали тенгламага эга бўламиз. Унинг ечими $S_{KP1}=0.21$; $S_{KP2}=0.005$.

$S_{KP2}=0.005$ S_H дан кичик, шу сабабли у тўғри келмайди. Демак, $S_{KP}=0.21$ максимум моментга тўғри келади.

б) момент

$$\frac{M_H}{M_{KP}} = \left(\frac{U}{U_H} \right)^2 \frac{2}{\frac{S_H}{S_{KP}} + \frac{S_{KP}}{S_H}}.$$

$$\frac{M_H}{M_{max}} = \frac{1}{3.3} \text{ ни ҳисобга олсак,}$$

$$\frac{S_H}{S_{KP}} + \frac{S_{KP}}{S_H} = 6.6 \left(\frac{U}{U_H} \right)^2 \text{ га эга бўламиз.}$$

Бу тенгламага U ва S_{KP} нинг қийматини қўйиб, $S^2 - 1.18S + 0.044 = 0$ тенгламага эга бўламиз. Унинг ечими $S_1=1.14$ ва $S_2=0.038$ бўлади. Шу сабабли кучланиш пасайгандаги ишчи сирпаниш $S_2=0.038$ ҳисобланади.

3.4.7. Кучланиши 380 В бўлган уч фазали қисқа туташтирилган роторли асинхрон моторни қисқа туташув тажрибаси натижасида $z_{KT}=6.2$ Ом, $\cos\varphi_{KT}=0.42$, $I_{KT}=65$ А. Моторнинг статор чулғами Y уланган.

Моторни юргизишда қуйидаги иккита талаб бажарилиши керак:

Юргизиш токи 40 А дан ошмасин;

Юргизиш моменти қисқа туташув моментидан 0.34 кичик бўлмасин ($M'_{юр} \geq 0.34M_{юр}$). Мотор трансформатор ёки индуктивлик орқали юргизилсин:

а) трансформатор билан юргизилгандаги трансформациялаш коэффиценти ва тармоқ токининг сакраши ($k_{ТР}$, $I'_{юр}$);

б) индуктивлик ёрдамида юргизилгандаги индуктив қаршилиқ $x_{юр}$.

Ечиш.

а) $I'_{юр} < 40$ А ва $M'_{юр} \geq 0.34M_{юр}$ икки шартдан, моментлар бўйича шарт муҳим ҳисобланади.

$$M'_{юр} = 0.34M_{юр}, \text{ ёки } M'_{юр} \geq M_{юр}/k_{ТР}^2.$$

Икки тенгламадан $k_{ТР}$ ни топамиз

$$k'_{юр}=2.94 \text{ ва } k_{ТР}=\sqrt{2.94}=1.72.$$

$k_{ТР}=1.7$ деб қабул қиламиз.

Зарбий ток

$$I'_{юр} = \frac{I_{1KT}}{k_{ТР}^2} = \frac{65}{1.7^2} = 22.5 \text{ А.}$$

б) статор чулғамига кетма-кет уланган индуктивлик зарбий токни k мартага камайтиради ($I'_{\text{юр}} = k I_{\text{КТ}}$).

$$M'_{\text{юр}} = k^2 M_{\text{юр}}; \quad M'_{\text{юр}} \geq 0.34 M_{\text{юр}}.$$

Бу икки тенгламадан

$$M'_{\text{юр}} \geq 0.34 M'_{\text{юр}} / k^2,$$

бундан

$$k^2 \geq 0.34 \text{ ёки } k \geq \sqrt{0.34} = 0.585.$$

$k = 0.59$ деб қабул қиламиз.

Зарбий ток

$$I'_{\text{юр}} = k I_{\text{КТ}} = 0.59 \cdot 65 = 38.4 \text{ А.}$$

Тўла юргизиш қаршилиги

$$z_{\text{юр}} = jx + z_{\text{КТ}} = R + j(x_s + x)$$

$$z_{\text{юр}} = z_{\text{КТ}} / k.$$

Икки тенгламадан x ни топамиз

$$x = \sqrt{\left(\frac{z_{\text{КТ}}}{k}\right)^2 - R^2 - x_s}.$$

$$R = z_{\text{КТ}} \cos \varphi_{\text{КТ}} = 6.2 \cdot 0.42 = 2.6 \text{ Ом};$$

$$x_s = z_{\text{КТ}} \sin \varphi_{\text{КТ}} = 6.2 \cdot 0.912 = 5.65 \text{ Ом};$$

$$x = \sqrt{\left(\frac{6.2}{0.59}\right)^2 - 2.6^2 - 5.65} = 4.53 \text{ Ом.}$$

3.4.8. Қиска туташган роторли уч фазали статор чулғами Δ уланган.

Моторнинг номинал параметрлари қуйидагича:

$$P_H = 37 \text{ кВт}, \quad U_H = 380 \text{ В}, \quad \cos \varphi_H = 0.86, \quad n_H = 1450 \text{ айл/мин}, \quad I_H = 73 \text{ А.}$$

Моторни тармоққа тўғридан тўғри улашдаги шартлар:

$$I_{\text{юр}} / I_H = 6; \quad M_{\text{юр}} / M_H = 2.$$

Қуйидагилар аниқлансин:

а) Y дан Δ га улагандаги юргизиш токи $I_{\text{ЮР}Y}$ ва моменти $M_{\text{ЮР}Y}$;

б) трансформатор ёрдамида юргизилгандаги трансформациялаш коэффициенти.

Ечиш.

а) номинал момент

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{37000}{2\pi \cdot 1450 / 60} = 243.3 \text{ Н·м.}$$

Юргизиш моменти ва токи (берилган шартга асосан)

$$M_{\text{юр}} = 2M_H = 2 \cdot 243.3 = 486.6 \text{ Н·м};$$

$$I_{\text{юр}} = 6I_H = 6 \cdot 73 = 438 \text{ А.}$$

Y дан Δ улаб юргизилган ток ва момент 3 марта камаяди

$$I_{\text{ЮР}Y} = \frac{I_{\text{юр}}}{3} = \frac{438}{3} = 146 \text{ А.}$$

$$M_{\text{ЮР}Y} = \frac{M_{\text{юр}}}{3} = \frac{486.6}{3} = 162.2 \text{ Н·м.}$$

б) трансформатор билан юргизилганда $M'_{\text{юр}} = M_{\text{юр}} / 3$ шарт бажарилиши

ЛОЗИМ.

$M'_{\text{юр}} = M_{\text{юр}} / k_{\text{тр}}^2$. Бу икки тенгламадан $k_{\text{тр}}$ ни топамиз

$M_{\text{юр}} / 3 = M'_{\text{юр}} / k_{\text{тр}}^2$ бундан

$$k_{\text{тр}}^2 = 3; \quad k_{\text{тр}} = \sqrt{3} = 1.73.$$

Зарбий ток

$$I_{\text{юр}}^2 = \frac{I_{\text{юр}}}{k_{\text{тр}}^2} = \frac{438}{3} = 146 \text{ A}.$$

3.4.9. 4A180S4Y3 типдаги уч фазали қисқа туташган асинхрон моторнинг статор чулғамлари Y схемада уланган бўлиб, $f = 50$ Гц, линия кучланиши $U_{\text{л}} = 380$ В бўлган уч фазали ток тармоғига уланган.

Моторнинг паспортида қуйидаги номинал маълумотлар берилган:

$$P_{\text{н}} = 22 \text{ кВт}, \quad n = 1470 \text{ айл/мин}, \quad \eta_{\text{н}} = 0,9; \quad \cos\varphi_{\text{н}} = 0,9;$$

$$2p = 4, \quad M_{\text{max}}/M_{\text{н}} = 2,3; \quad M_{\text{юр}}/M_{\text{н}} = 1,4; \quad I_{\text{юр}}/I_{\text{н}} = 6,5$$

Қуйидагилар топилсин:

а) роторнинг номинал сирпаниши;

б) моторнинг номинал, юргизиш ва максимал моментлари;

в) моторнинг тармоқдан истеъмол қиладиган қуввати;

г) моторнинг номинал ва юргизиш токлари;

д) тармоқ кучланиши 10 ва 20 % га пасайгандаги юргизишмоменти ва токи.

Ечиш.

а) Моторнинг қутблар сони

$$p = \frac{60f}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2,$$

n_1 – синхрон тезлик.

Роторнинг номинал сирпаниши

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1470}{1500} = 0,02;$$

б) Номинал айлантурувчи момент

$$M_{\text{н}} = 9550 \frac{P_{\text{н}}}{n} = 9550 \frac{22}{1470} = 143 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Юргизиш моменти

$$M_{\text{юр}} = 1,4 M_{\text{н}} = 1,4 \cdot 143 = 200,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Максимал айлантурувчи момент

$$M_{\text{max}} = 2,3 M_{\text{н}} = 2,3 \cdot 143 = 328,9 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

в) моторнинг электр тармағидан истеъмол қиладиган қувват

$$P_1 = \frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} = \frac{22}{0,9} = 24,44 \text{ кВт};$$

г) Электр тармоғидан қабул қиладиган номинал ток

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \eta_{\text{н}} \cos\varphi_{\text{н}}} = \frac{22}{\sqrt{3} \cdot 0,22 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 71,43 \text{ A}$$

Юргизиш токи

$$I_{\text{юр}} = 6,5 I_{\text{н}} = 6,5 \cdot 71,43 = 464,3 \text{ A}.$$

д) Асинхрон моторнинг айлантурувчи моменти тармоқкучланишининг квадрати пропорционал (мутаносиб). Агар тармоқ кучланиши 10% га

пасайса, у $0,9 U_{\text{н}}$ га тенг бўлади. У ҳолда айлантурувчи момент номиналга нисбатан $(0,9)^2 = 0,81$ ни ташкил этади. Шу кучланишдаги юргизиш моменти

$$M'_{\text{юр}} = 0,81 M_{\text{юр}} = 0,81 \cdot 200,2 = 162,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Юргизиш токи

$$I'_{\text{юр}} = 0,9 I_{\text{юр}} = 0,9 \cdot 464,3 = 418 \text{ А.}$$

Агар тармоқ кучланиши 20% га камайса, у $0,8 U_{\text{н}}$ га тенг бўлади. Айлантурувчи момент номинал моментнинг $(0,8)^2 = 0,64$ ни ташкил этади. Шу кучланишдаги юргизиш моменти

$$M''_{\text{юр}} = 0,64 M_{\text{юр}} = 0,64 \cdot 200,2 = 128 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Юргизиш токи

$$I''_{\text{юр}} = 0,8 I_{\text{юр}} = 0,8 \cdot 464,3 = 371,5 \text{ А.}$$

3.4.10. Цехда ўрнатилган уч фазали асинхрон моторнинг истеъмол қиладиган умумий актив қуввати $P_{\text{м}} = 300 \text{ кВт}$, кучланиши $U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$ ва қувват коэффициентининг ўртача қиймати $\cos \varphi_{\text{ур}} = 0,7$. Ёритгич чироқларининг истеъмол қиладиган умумий қувват $P_{\text{ёр}} = 20 \text{ кВт}$. Цехнинг қувват коэффициентини $\cos \varphi_2 = 0,95$ гача ошириш учун конденсаторлар батареясидан фойдаланиш тавсия этилади.

Қуйидагилар аниқлансин:

а) Конденсаторлар ўрнатилмасдан аввалги цех юкламаларининг умумий қуввати P_1 ;

б) Конденсатор батареясининг сиғими C ;

в) Конденсатор батареяси ўрнатилмасдан аввал ва ўрнатилгандан сўнг линия симларидаги I_1 ва I_2 тоқлар.

Ечиш.

а) конденсаторлар батареяси ўрнатилмасдан аввалги умумий актив қувват

$$P_1 = P_{\text{м}} + P_{\text{ёр}} = 300 + 20 = 320 \text{ кВт.}$$

Реактив қувват

$$Q_1 = P_{\text{м}} \tan \varphi_{\text{ур}} = 300 \cdot 1 = 300 \text{ кВт} \quad (\tan \varphi_{\text{ур}} = 1)$$

$\cos \varphi_1$ ни топиш учун, $\tan \varphi_1$ ни топамиз

$$\tan \varphi_1 = Q_1 / P_1 = 300 / 320 = 0,938$$

У ҳолда $\cos \varphi_1 = 0,734$; $\cos \varphi_2 = 0,95$ бўлганда $\tan \varphi_2 = 0,328$

б) Конденсаторлар батареясининг сиғими

$$C = \frac{P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)}{\omega U^2} = \frac{300(0,938 - 0,328) \cdot 10^3}{314 \cdot 380^2} = 4 \cdot 10^3 \text{ ф.}$$

в) Линия симларидаги тоқлар

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \cos \varphi_1} = \frac{320 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,734} = 663,17 \text{ А}$$

$$I_2 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \cos \varphi_2} = \frac{320 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,95} = 512,4 \text{ А.}$$

3.5. Мустақил ечиш учун масалалар.

3.5.1. Статор чулғамлари $2p=6$ кутбли бўлган асинхрон мотор роторнинг сирпаниши $S = 0,04$, кучланиш частотаси $f=50$ Гц. Роторнинг айланиш частотаси аниқлансин.

3.5.2. Асинхрон мотор статор чулғамидаги айланувчи магнит майдонининг айланиш частотаси $n_1 = 1000$ айл/мин. Сирпанишлар қиймати $S = 1; 0; -0,5; -1$ бўлганда тезлигини аниқланг ва олинган қийматларнинг физик маъносини тушунтириб беринг.

3.5.3. Уч фазали қисқа туташган роторли асинхрон моторнинг статор чулғамидан ўтаётган ток $10,6$ А, тормокнинг фаза кучланиши $U_\phi = 220$ В бўлганда истеъмол қиладиган қуввати $P_1 = 3,55$ кВт. Агар моторнинг фойдали қуввати $P_2 = 3$ кВт бўлса, моторнинг ФИК ва қувват коэффициентини нимага тенг?

3.5.4. Асинхрон машинанинг чулғам коэффициенти ва магнит оқимини хисобланг. Машинанинг куйидаги параметрлари берилган:

$$U_H = 380/220 \text{ В}; \quad 2p = 4; \quad f = 50 \text{ Гц};$$

кутб ва фазага тўғри келувчи пазлар сони $q_1 = 3$; $y/\tau = 7/9$ ва ҳар бир паздаги симлар сони $z_{n1} = 38$.

3.5.5. Уч фазали асинхрон моторнинг номинал кучланиши $U_H = 380$ В. Статор чулғаи Δ улангандаги номинал ток $I_H = 14,5$ А. Чулғам параметрлари: $\omega_1 = 320$ ва $k_{r1} = 0,92$; $F_H = 716$ А. Салт ишлаш токининг реактив ташкил этувчиси номинал токнинг неча фоизини ташкил қилади?

3.5.6. Роторнинг айланиш частоталари: 2945; 1480; 985; 735 ва 600 фйл/мин. дан бўлган уч фазали қисқа туташган роторли асинхрон моторларнинг номинал айлантирувчи моментлари мос ҳолда: 178,43; 355; 533,7; 715; 875,8 Н·м. Моторларнинг қуввати аниқлансин.

3.5.7. 4A200M6Y3 типдаги уч фазали қисқа туташган роторли асинхрон моторнинг ротори номинал юкламада $n_H = 975$ айл/мин. тезлик билан айланмоқда. Манба кучланишининг частотаси $f_1 = 50$ Гц. Моторнинг жуфт кутблар сони p , синхрон тезлиги n , ва номинал сирпаниши S_H топилсин. Шунингдек $S = 5\%$ бўлганда мотор роторида ҳосил бўлган ЭЮК нинг частотаси f_2 аниқлансин.

3.5.8. 4A160S2Y3 типдаги уч фазали қисқа туташган роторли асинхрон мотор уч фазали ток тармоғига уланган. Роторнинг сирпаниши 2% ва 6% га тенг бўлганда, роторнинг айланиш бурчак тезлиги ω_2 аниқлансин.

3.5.9. Кўп тезликли асинхрон моторнинг статор чулғамларини қайта уланган, унинг жуфт кутблар сони 2 мартага ортди. Айланувчи магнит майдонининг ва роторнинг айланиш частотаси қандай ўзгаради?

3.5.10. Номинал қувватлари $P'_{2H} = 0,5$ кВт, $P''_{2H} = 1$ кВт бўлган бир фазали асинхрон моторлар частотаси $f = 50$ Гц, фаза кучланиши $U_\phi = 220$ В бўлган ўзгарувчи ток тармоғига уланган. Моторларнинг қувват коэффициентлари тегишлича $\cos\varphi'_{2H} = 0,7$; $\cos\varphi''_{2H} = 0,9$.

Моторлар чулғамидан оқаётган тоklar, реактив ва тўла қувватлари аниқлансин.

Жавоблар.

3.5.1. $n=960$ айл/мин.

3.5.2. 0; 1000 айл/мин; 1500 айл/мин; 2000 айл/мин.

3.5.3. $\eta=0,845$; $\cos\varphi=0,88$.

3.5.4. $k_{r1}=0,902$; $\Phi=0,482 \cdot 10^{-2}$ Вб

3.5.5. $I_{\mu}=1,8$ А (21,4%)

3.5.6. 55 кВт

3.5.7. $p=3$; $n_n=1000$ айл/мин; $S_n=2,5\%$; $f_2=2,5$ Гц

3.5.8. $\omega_2=308$ рад/с; $\omega_2=295$ рад/с

3.5.9. 2 марта камаяди.

$I_{1H}=3,25$ А; $I_{2H}=5,05$ А; $Q_1=Q_2=0,5$ кВАр; $S_1=0,7$ кВА; $S_2=1,1$ кВА

4-боб. СИНХРОН МАШИНАЛАР

4.1. Салт ишлаш режимида синхрон машинада бўладиган электромагнит жараёнлар

Салт ишлаш режимида синхрон машинанинг статор (якор) токи нолга тенг бўлади. Магнит майдон кўзғатиш чулғами томонидан ҳосил қилинади.

Кўзғатиш чулғами икки хил бўлади: тарқалган чулғам (ноаён кутбли роторда) ва йиғилган чулғам (аён кутбли роторда).

Тарқалган чулғамнинг МЮК

$$F_{fm} = I_f W_f,$$

бу ерда: $W_f=W_k$ $q/2$ –кўзғатиш чулғамининг ўрамлар сони; q – кутбдаги ўралган пазлар сони; W_k – паздаги ғалтак ўрамларининг сони; I_f – кўзғатиш чулғамининг токи.

Асосий гармоника МЮК нинг амплитудаси

$$F_{flm} = \frac{4 \sin\left(\frac{p\pi}{2}\right)}{\pi \quad p\pi/2} F_{fm},$$

бу ерда: $\rho=v/\tau$ –кубнинг чулғам ўралган қисмини нисбий узунлиги; v – кутббўлинмасининг чулғам ўралган қисми узунлиги.

Йиғилган чулғамнинг МЮК

$$F_{fm} = I_f W_f.$$

Салт ишлаш режимида кўзғатиш чулғами ҳосил қилган магнит майдоннинг шакли қуйидаги коэффициентларга боғлиқ бўлади:

Кўзғатиш чулғами майдони шаклнинг коэффициенти

$$k_f = B_{\delta lm} / B_{\delta},$$

бу ерда: $B_{\delta lm}$ –ҳаво бўшлиғидаги индукциянинг асосий гармоника амплитудаси; $B_{\delta} = \mu_0 \frac{F_f}{\sigma}$ – кутб ўқидаги индукциянинг радиал ташкил этувчиси.

Ноаён кубли машина учун (тўйиниш ҳисобга олинмаган)

$$k_f = 8 \sin\left(\frac{p\pi}{2}\right) / (\pi^2 \rho).$$

Аён кутбли машина учун (тўйиниш ҳисобга олинмаган)

$$k_f = f(\alpha, \gamma, \varepsilon),$$

бу ерда: $\alpha = \nu_p / \tau$ – нисбий кутб ёйи; $\gamma = \delta_m / \delta'$ – кутб чеккаларидаги нисбий ҳаво бўшлиғи; $\varepsilon = \delta' / \tau$ – кутб ўқидаги нисбий ҳаво бўшлиғи. Бу ерда $\delta' = k_\delta \delta$ – эквивалент ҳаво бўшлиғи, δ_m – максимал, δ – минимум ҳаво бўшлиғи k_δ – ҳаво бўшлиғи коэффициенти.

Қўзғатиш оқими коэффициенти

$$k_\Phi = \Phi_{fm} / \Phi_{flm},$$

бу ерда: $\Phi_{fm} = \tau l_\delta B_{\delta_{ypT}}$ – тўла (реал) ўзаро индукция оқими; $\Phi_{flm} = \left(\frac{2}{\pi}\right) \tau l_\delta B_{\delta_{fm}}$ – индукция асосий гармоникасининг оқими; $B_{\delta_{yp}}$ – ҳаво бўшлиғидаги ўртача индукция.

Кутб беркилиш ҳисобий коэффициенти

$$\alpha_\delta = B_{\delta_{yp}} / B_\delta.$$

ЭДС шаклининг коэффициенти (тўйиниш ҳисобга олинмаган)

$$k_B = B_{\delta_{T1}} / B_\delta = \pi/2 \sqrt{2k_\Phi},$$

бу ерда: $B_{\delta_{T1}} = B_{\delta_{1T}} / \sqrt{2}$ – индукция асосий гармоникасининг таъсир этувчи қиймати.

Ўзаро индукция тўла қаршилиги

$$\Phi_T = \Phi_{fm} = k_\Phi \Phi_{flm} = E_f / (4k_B f_1 \omega_1 k_{r1}),$$

Қўзғатиш чулғамидаги МҮОК

$$F_{fm} = F_1 + F_2,$$

бу ерда: $F_1 = F_\delta + F_{z1} + F_{\alpha 1}$; F_δ – ҳаво бўшлиғининг магнит кучланиши; F_{z1} – статор тишининг магнит кучланиши; $F_{\alpha 1}$ – статор ярмосининг кучланиши; F_2 – роторнинг магнит кучланиши.

Статор магнит ўтказгичнинг тўйиниш коэффициенти

$$k_{za} = (F_\delta + F_{z1} + F_{\alpha 1}) / F_\delta.$$

4.2. Якор чулғамининг магнит юритувчи кучи, магнит майдони, ЭҮОК ва параметрлари

Якор (статор) чулғаи асосий гармоникасининг амплитудаси

$$F_{am} = (\sqrt{2}/\pi) m_1 (I \omega_1 k_{r1} / p).$$

Якор чулғаи МҮОКни бўйлама ташкил этувчисининг амплитудаси

$$F_{dm} = (\sqrt{2}/\pi) m_1 (I_d \omega_1 k_{r1} / p).$$

Якор чулғаи МҮОКни кўндаланг ташкил этувчисининг амплитудаси

$$F_{qm} = (\sqrt{2}/\pi) m_1 (I_q \omega_1 k_{r1} / p).$$

бу ерда: $I_d = I \sin \beta$ ва $I_q = I \cos \beta$, β – ЭҮОК E_f ва ток I (ёки МҮОК F_{am}) орасидаги бурчак.

Ноаён кутбли синхрон машина учун:

Ҳаво бўшлиғидаги якор майдони индукциясининг асосий гармоникаси амплитудаси

$$B_{alT} = \mu_0 F_{am} / (\delta k_\delta);$$

Якор чулғаи билан илашган ўзаро индукция магнит оқими

$$\Phi_T = (2/\pi) \tau l_\delta B_{alm},$$

Ўзаро индукция оқимининг магнит илашимлиги

$$\psi_{am} = \omega_1 k_{01} \Phi_T,$$

Якор чулғами фазасида ўзаро индукция оқими таъсирида ҳосил бўлган ЭЮК

$$E_a = 4,44 f_1 \Phi_T \omega_1 k_{r1}.$$

Аён қутбли синхрон машина учун:

Бўйлама ва кўндаланг МЮК ҳосил қилган индукцияларнинг асосий гармоникалари амплитудаси

$$B_{adlm} = k_d B_{adm}; \quad B_{aqm} = k_q B_{aqm},$$

бу ерда: k_d ва k_q – бўйлама ва кўндаланг ўқлар бўйича майдон шаклининг коэффициентлари; $B_{adm} = \mu_0 F_{dm} / \delta k_\delta$ ва $B_{aqm} = \mu_0 F_{qm} / \delta k_\delta$ – бўйлама ва кўндаланг якор МЮК лар ҳосил қилган индукцияларнинг амплитудаси.

Токнинг бўйлама ташкил этувчиси I_d га мос келувчи ўзаро индукция магнит оқими илашимлиги ва ЭЮК:

$$\Phi_{adm} = (2/\pi) \tau l_\delta k_d B_{adm};$$

$$\psi_{adm} = \omega_1 k_{01} \Phi_{adm};$$

$$E_{ad} = 4,44 \omega_1 k_{r1} f \Phi_{adm};$$

Якор токининг кўндаланг ташкил этувчисига мос келувчи ўзаро индукция магнит оқими, оқим илашимлиги ва ЭЮК:

$$\Phi_{aqm} = (2/\pi) \tau l_\delta k_q B_{aqm};$$

$$\psi_{aqm} = \omega_1 k_{01} \Phi_{aqm};$$

$$E_{aq} = 4,44 \omega_1 k_{r1} f \Phi_{aqm}.$$

Тўйинмаган ноаён қутбли синхрон машинада қўзғатиш чулғами МЮК якор чулғами МЮК га эквивалент бўлади:

$$F_{afm} = k_a F_{am},$$

бу ерда: $k_a = 1/k_f$ – якор реакцияси коэффициенти.

Тўйинмаган аён қутбли синхрон машинанинг қўзғатиш чулғами МЮК якорнинг бўйлама ва кўндаланг МЮК ларига эквивалент бўлади:

$$F_{adm} = k_{ad} F_{dm}; \quad F_{aqm} = k_{aq} F_{qm},$$

бу ерда: $k_{ad} = k_d / k_f$ – бўйлама ўқ бўйича якор реакцияси коэффициенти; $k_{aq} = k_q / k_f$ – кўндаланг ўқ бўйича якор реакцияси коэффициенти.

Якор чулғами параметрлари:

Якор чулғами фазасидаги сочилма (тарқок) индуктив қаршилик

$$x_\delta = 4\pi\mu_0 f \frac{W_1^2}{\tau} (l_\delta / p q_1) \lambda_{\delta 1},$$

бу ерда: $\lambda_{\delta 1} = \lambda_{\pi 1} + \lambda_{r1} + \lambda_{T1} + \lambda_{d1}$ – сочилма оқим илашимлиги учун ўтказувчанлик коэффициенти.

Ноаён қутбли синхрон машина якор чулғамининг асосий индуктив қаршилиги

$$x_a = 4\mu_0 m_1 f (\omega_1 k_{r1})^2 \lambda_\delta / (\pi p),$$

бу ерда: $\lambda_\delta = \tau l_\delta / (k_\delta \delta)$ – бир қутбга тўғри келувчи ҳаво бўшлиғининг ўтказувчанлик коэффициенти. Бўйлама ва кўндаланг ўқлар бўйича якор чулғамининг асосий индуктив қаршиликлари

$$x_{ad} = \frac{4\mu_0}{\pi p} m_1 f (\omega_1 k_{r1})^2 \lambda_{ad};$$

$$x_{aq} = \frac{4\mu_0}{\pi p} m_1 f(\omega_1 k_{r1})^2 \lambda_{aq} ,$$

бу ерда: $\lambda_{ad} = k_d \tau l_\delta / (k_\delta \delta)$ ва $\lambda_{aq} = k_q \tau l_\delta / (k_\delta \delta)$ – бўйлама ва кўндаланг ўқлар бўйича ҳаво бўшлиғининг ўтказувчанлик коэффициентлари.

Ноаён қутбли синхрон машина якор чулғамининг индуктив қаршилиги

$$x_1 = x_\delta + x_a .$$

Аён қутбли синхрон машина якор чулғамининг бўйлама ва кўндаланг ўқлар бўйича индуктив қаршиликлари

$$x_d = x_\delta + x_{ad} ; \quad x_q = x_\delta + x_{aq} .$$

4.3. Синхрон машина қуввати ва фойдали иш коэффициенти (ФИК)

Бирламчи мотордан генераторга берилаётган механик қувват

$$P_1 = M_1 \Omega ,$$

бу ерда: M_1 – мотор айланаётган томонга йўналган айлантирувчи момент; Ω – бурчак тезлик.

Генератор роторига берилаётган механик қувват

$$P_B = P_1 - P_f / \eta_f = M_{\text{мех}} \Omega ,$$

бу ерда: P_f / η_f – кўзғатгични айлантиришга сарф бўладиган механик қувват; $P_f = R_f I_f^2$ – кўзғатиш чулғамидаги қувват исрофи; R_f – кўзғатиш чулғамининг актив қаршилиги; η_f – кўзғатгичнинг ФИК; $M_B = M_1 - P_f / (\eta_f \Omega)$ – машина роторига таъсир этувчи момент.

Электромагнит қувватга айланувчи механик қувват

$$P_{\text{мех}} = P_B - P_T - P_{\text{м.к}} = M \Omega = P_{\text{эм}} ,$$

бу ерда: P_T – механик исроф, $P_{\text{м.к}}$ – магнит ўтказгичдаги қўшимча исроф; M – электромагнит моменти.

Якор чулғамига берилган электр қувват

$$P_{\text{эл.1}} = P_{\text{эм}} - P_m ,$$

бу ерда: P_m – статор магнит ўтказгичдаги магнит исроф.

Юкламага генератор томонидан берилаётган актив қувват

$$P = m_1 U I \cos \varphi = P_{\text{эл}} - P_{\text{эл.1}} ,$$

бу ерда: $P_{\text{эл.1}} = m R I^2$ – якор чулғамидаги электр исрофи; якор чулғамининг актив қаршилиги.

Синхрон генераторнинг ФИК

$$\eta = P / P_1 = 1 - \Sigma P / (P + \Sigma P) ,$$

бу ерда: $\Sigma P = P_f / \eta_f + P_T + P_{\text{м.к}} + P_m + P_{\text{эл.1}}$ – йиғинди исроф.

Электромагнит қувват

$$P_m = \tau_1 E_v I' \cos \beta_v' ,$$

бу ерда: E_v – ўзаро индукция ЭЮК; $I' = \sqrt{(I_m + I \cos \beta_v)^2 + (I \sin \beta_v)^2}$ – қўшимча ток $I_m = P_m / (m_1 E_v)$ ни ҳисобга олгандаги якор токи;

$\cos \beta_v' = (I \cos \beta_v + I_m) / I'$; β_v – E_v ва I орасидаги бурчак.

4.4. Синхрон машинанинг параллел ишлаши

Ноаён кутбли синхрон машинанинг актив ва реактив қуввати

$$P = \frac{m_1 U E_f \sin \theta}{x_1};$$

$$Q = \frac{m_1 U E_f \cos \theta}{x_1}.$$

Аён кутбли синхрон машинанинг актив ва реактив қуввати

$$P = \frac{m_1 U E_f \sin \theta}{x_d} + \frac{m_1 U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta,$$

$$Q = \frac{m_1 U E_f \cos \theta}{x_d} - \frac{m_1 (U \cos \theta)^2}{x_d} - \frac{m_1 (U \sin \theta)^2}{x_q}.$$

Ноаён ва аён кутбли синхрон машинанинг максимал қуввати

$$P_m = m_1 E_f U / x_1;$$

$$P_m = P' \sin \theta_m + P'' \sin 2\theta_m = P' \sin \theta_m \left(1 + \frac{2}{n} \cos \theta_m \right),$$

бу ерда: $\theta_m = \pm \arccos(\sqrt{n^2 + 32} - n)/8$;

$$n = P' / P'' = 2 E_f x_q / [U(x_d - x_q)];$$

$$P' = \frac{m_1 U E_f}{x_d}; \quad P'' = (m_1 U^2 / 2) (1/x_q - 1/x_d).$$

Ноаён кутбли синхрон генераторнинг статик юкланиш қобиляти

$$K_{ю} = P_{тн} / P_H = E_{fH}^* / (x_d^* \cos \varphi_H).$$

Аён кутбли синхрон машинанинг солиштирма синхронловчи моменти

$$m_c = \partial M / \partial \theta = \frac{m_1 U E_f}{\Omega x_d} \cos \theta + m_1 U^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta.$$

Аён кутбли синхрон машинанинг максисал моментининг карралиги
(статик юкланиш қобиляти)

$$M_{тн} / M_H = E_{fH}^* / (x_d^* \cos \varphi_H).$$

4.5. Намунавий масалалр ечиш

4.5.1. Икки кутбли ноаён кутбли синхрон машинанинг ички диаметри $D_i = 1$ м. Ҳаво бўшлиғига майдоннинг тарқалишини синусоида шаклида бўлишини таъминлаш учун, ротор кутб бўлинмасининг чулғам ўралган қисмини узунлигини аниқланг.

Ечиш. Кутб бўлинмаси

$$\tau = \frac{\pi D_i}{2p} = \frac{\pi \cdot 1}{2} = 1,57 \text{ м.}$$

Кутб бўлинмасининг чулғам ўралган қисми узунлиги

$$b = p\tau = 3,67 \cdot 1,57 = 1,052 \text{ м,}$$

бу ерда: $p = 0,6 \div 0,75$ ўзгаради.

4.5.2. Ноаён кутбли синхрон машинанинг кутби ўқидаги индукция $B_\delta = 0,85$ Тл.

$v = 110$ см, $D_i = 98$ см, $2p = 2$ бўлса, ҳаво бўшлиғидаги ўртача индукция топилсин.

Ечиш. Кутб бўлинмасы

$$\tau = \frac{\pi D_i}{2p} = \frac{\pi \cdot 98}{2} = 153,86 \text{ см}$$

Кутбнинг чулғам ўралган қисмининг нисбий узунлиги

$$\rho = v / \tau = 110 / 153,86 = 0,7149$$

Кутб беркилиш ҳисобий коэффиценти

$$\alpha_\delta = 1 - 0,5\rho = 1 - 0,5 \cdot 0,7149 = 0,643$$

Ўртача индукция

$$B_{\delta_{yp}} = B_\delta \alpha_\delta = 0,85 \cdot 0,643 = 0,546 \text{ Тл.}$$

4.5.3. Синхрон машина қўзғатиш чулғами майдони шаклининг коэффиценти $k_f = 1,05$, кутб ўқидаги индукциянинг радиал ташкил этувчиси $B_\delta = 0,75$ Тл бўлса, ҳаво бўшлиғидаги қўзғатиш майдони индукцияси $B_{\delta lm}$ аниқлансин.

Ечиш. Қўзғатиш майдони индукцияси

$$B_{\delta lm} = k_f B_\delta = 1,05 \cdot 0,75 = 0,79 \text{ Тл.}$$

4.5.4. Аён кутбли синхрон машина кутб бўлинмасы $\tau = 17,7$ см, ҳисобий узунлиги $l_\delta = 11,5$ см, ҳаво бўшлиғидаги индукциянинг асосий гармоникаси амплитудаси $B_{\delta lm} = 0,68$ Тл бўлса, қўзғатиш майдони оқимининг асосий гармоникаси аниқлансин.

Ечиш. Қўзғатиш майдони оқимининг асосий гармоникаси

$$\Phi_{flm} = (2/\pi) \tau l_\delta B_{\delta lm} = (2/\pi) \cdot 17,7 \cdot 11,5 \cdot 0,68 = 0,88 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$$

4.5.5. Аён кутбли синхрон машина кутб бўлинмасы $\tau = 23$ см, ҳисобий узунлиги $l_\delta = 12$ см, қўзғатиш майдони шаклининг коэффиценти $k_f = 1,07$, кутб ўқидаги индукциянинг радиал ташкил этувчиси $B_\delta = 0,72$ Тл бўлса, қўзғатиш майдони оқимининг асосий гармоникаси топилсин.

Ечиш. Ҳаво бўшлиғида индукциянинг асосий гармоникаси амплитудаси

$$B_{\delta lm} = k_f B_\delta = 1,07 \cdot 0,72 = 0,77 \text{ Тл}$$

Қўзғатиш майдони оқимининг асосий гармоникаси

$$\Phi_{flm} = (2/\pi) \tau l_\delta B_{\delta lm} = (2/\pi) \cdot 23 \cdot 12 \cdot 0,77 = 1,35 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$$

4.5.6. Аён кутбли синхрон машинанинг ўзаро индукция тўла оқими $\Phi_{fm} = 1,3 \cdot 10^{-2}$ Вб, кутб бўлинмасы $\tau = 16,5$ см, ҳисобий узунлиги $l_\delta = 14$ см, кутб беркилиш ҳисобий коэффиценти аниқлансин.

Ечиш. Ҳаво бўшлиғидаги ўртача индукция

$$B_{\delta_{yp}} = \frac{\Phi_{fm}}{\tau l_\delta} = \frac{1,3 \cdot 10^{-2}}{16,5 \cdot 10^{-2} \cdot 14 \cdot 10^{-2}} = 0,563 \text{ Тл.}$$

Кутб беркилиш ҳисобий коэффиценти

$$\alpha_\delta = B_{\delta_{yp}} / B_\delta = 0,563 / 0,68 = 0,83.$$

4.5.7. Икки кутбли турбогенераторнинг ички диаметри $D = 100$ см, кутбнинг чулғам ўралган қисмининг узунлиги $v = 110$ см, фазадаги ўрамлар сони $\omega_1 = 16$, чулғам коэффиценти $k_{rl} = 0,92$ бўлса, $I = 1500$ А учун якорнинг МЮК га эквивалент бўлган қўзғатиш Мюк топилсин.

Ечиш. Кутб бўлинмаси

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 100}{2} = 157 \text{ см.}$$

Кутбнинг чулғам уланаган нисбий узунлиги

$$\rho = \tau / \tau = 110 / 157 = 0.7.$$

Кўзғатиш майдони шаклининг коэффициенти

$$k_f = 8 \sin(\rho \pi / 2) / (\pi^2 \rho) = 8 \sin(0.7 \cdot \pi / 2) / (\pi^2 \cdot 0.7) = 8 \sin 0.159 = 1.03$$

Якор реакцияси коэффициенти

$$k_a = 1 / k_f = 1 / 1.03 = 0.97$$

Якор чулғами МЮК нинг асосий гармоникаси амплитудаси

$$F_{am} = (\sqrt{2} / \pi) m_1 (I \omega_1 k_{r1} / p) = (\sqrt{2} / \pi) \cdot 3 \cdot (1500 \cdot 16 \cdot 0.92 / 1) = 29744.7 \text{ А.}$$

Якорнинг МЮК га эквивалент бўлган, кўзғатиш чулғами МЮК

$$F_{afm} = k_a F_{am} = 0.94 \cdot 29744.7 = 28950 \text{ А.}$$

4.5.8. $2p=4$ кутбли аён кутбли синхрон генераторнинг ички диаметри $D=340$ мм, ҳисобий узунлиги $l_\delta=185$ мм, ҳисобий ҳаво бўшлиғи $\delta'=1.6$ мм, фазадаги ўрамлар сони $\omega_1=40$, чулғам коэффициенти $k_{r1}=0.966$, майдон шакли коэффициентлари $k_d=0.96$ ва $k_q=0.5$ бўлса, якорнинг асосий индуктив қаршиликлари топилсин.

Ечиш. Кутб бўлинмаси

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 340}{2 \cdot 2} = 266.9 \text{ мм,}$$

Бўйлама ўқ бўйича ҳаво бўшлиғининг ўтказувчанлик коэффициенти

$$\lambda_{ad} = k_d \tau l_\delta / (k_\delta \delta) = 0.96 \cdot 266.9 \cdot 185 / 1.6 = 29.6.$$

Бўйлама ўқ бўйича якорнинг асосий (бош) индуктив қаршилиги

$$X_{ad} = \frac{4\mu_0}{\pi p} m_1 f(\omega_1 k_{r1})^2 \lambda_{ad} = \frac{4 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi \cdot 2} \cdot 3 \cdot 50 (40 \cdot 0.966)^2 \cdot 29.6 = 5.37 \text{ Ом.}$$

Қуйидаги ўқ бўйича ҳаво бўшлиғининг ўтказувчанлик коэффициенти

$$\lambda_{ad} = k_q \tau l_\delta / k_\delta \delta = 0.5 \cdot 0.2669 \cdot 0.185 / 1.6 \cdot 10^{-3} = 15.43.$$

Қўндаланг ўқ бўйича якорнинг асосий (бош) индуктив қаршилиги

$$X_{aq} = \frac{4\mu_0}{\pi p} m_1 f(\omega_1 k_{r1})^2 \lambda_{aq} = \frac{4 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\pi \cdot 2} \cdot 3 \cdot 50 (40 \cdot 0.966)^2 \cdot 15.43 = 2.79 \text{ Ом.}$$

4.5.9. Синхрон генераторнинг фаза кучланиши $U_\phi=230$ В, фаза токи $I_1=54$ А, қувват коэффициенти $\cos \varphi = 0.8$. Тўла магнит исрофи $P_m + P_{mk}=800$ Вт, тўла электр исрофи $P_{\Sigma 1}=1500$ Вт, механик $P_{мех}$ ва P_Σ / η_f исрофлар электр исрофининг $\frac{2}{3}$ қисмини ташкил қилса, генераторнинг ФИК топилсин.

Ечиш. Тўла қувват исрофи

$$\Sigma P = \left(\frac{P_f}{\eta_f} + P_{мех} \right) = \frac{2}{3} P_{\Sigma 1} = \frac{2}{3} \cdot 1500 = 1000 \text{ Вт.}$$

Генераторнинг актив қуввати

$$P = m_1 U I \cos \varphi = 3 \cdot 230 \cdot 54 \cdot 0.8 = 29808 \text{ Вт}$$

Генераторнинг ФИК

$$\eta = 1 - \Sigma P / (P + \Sigma P) = 1 - 3300 / (29808 + 3300) = 0.9.$$

4.5.10. Турбогенераторнинг номинал линия кучланиши $U_{нл}=10.5$ кВ, якор чулғамининг индуктив қаршилиги $x_1=23$ Ом бўлиб электр тизими билан параллел ишламоқда.

Номинал қўзғатиш токида генераторнинг салт ишлаш кучланиши $U_{л}=24.2$ кВ бўлса, ЭЮК ва кучланиш орасидаги бурчак θ_n номинал юклама $P_n=6$ мВт да топилсин. Генераторнинг статик юкланиш қобиляти нимага тенг?

Ечиш. максимал қувват

$$P_{тн}=E_f U/x_1 = \frac{24200 \cdot 10500}{23} = 11.05 \text{ мВт}$$

$$\sin \theta_n = \frac{P_n x_1}{U E_f} = \frac{6 \cdot 23}{10.5 \cdot 24.2} = 0.54$$

бундан $\theta_n = 32.7^\circ$.

Генераторнинг статик юкланиш қобиляти

$$k_{п} = P_{тн}/P_n = 11.05/6 = 1.84$$

4.6. Мустақил ечиш учун масалалар

4.6.1. Тўрт қутбли синхрон машинанинг қуйидаги параметрлари берилган: фазадаги ўрамлар сони $\omega=105$, қисқартиш коэффиценти $k_k=0.951$, тарқалиш коэффиценти $k_{Т1}=0.954$, якор чулғами токи $I=18$ А. Уч фазали якор чулғами МЮКнинг асосий гармоникаси амплитудаси аниқлансин.

4.6.2. Икки қутбли турбогенераторнинг қуввати $S_n=31250$ кВА. Фаза кучланиши $U_{н.ф}=6060$ В бўлиб, якор чулғами фазасидаги ўрамлар сони $\omega_1=16$, қисқартиш коэффиценти $k_k=0.966$, тарқалиш коэффиценти $k_{ТК}=0.956$. Якор чулғами МЮКнинг асосий гармоникаси амплитудаси топилсин.

4.6.3. Аён қутбли синхрон машинанинг қуйидаги параметрлари берилган: майдон шакли коэффицентлари: бўйлама ўқ бўйича $k_d=0.9$ кўндаланг ўқ бўйича $k_q=0.58$, бўйлама ўқ бўйича якор магнит майдони индукцияси $B_{adm}=0.51$ Тл, кўндаланг ўқ бўйича якор магнит майдони индукцияси $B_{aqm}=0.38$ Тл. Якор МЮКнинг бўйлама ва кўндаланг ташкил этувчилари ҳосил қилган индукциянинг асосий гармоникалари топилсин.

4.6.4. Гидрогенератор якор чулғамидаги магнит оқимининг бўйлама ва кўндаланг ўқлар бўйича ташкил этувчилари $\Phi_{adm}=0.265$ Вб ва $\Phi_{aqm}=0.05$ Вб. Жуфт қутблар сони $2p=24$, фазадаги ўрамлар сони $\omega_1=130$, чулғам коэффиценти $k_{ч1}=0.94$, генераторнинг айланиш частотаси $n=125$ айл/мин. Магнит ақими Φ_{adm} ва Φ_{aqm} лар ҳосил қилган ЭЮКлар топилсин.

4.6.5. Номинал юкламада турбогенераторнинг фаза кучланиши $U_{н.ф}=230$ В, номинал токи $I_n=1800$ А, $\cos \varphi_n=0.8$. Якор чулғами фазасининг актив қаршилиги $R=0.00162$ Ом, тўла индуктив қаршилиги $x_1=0.211$ Ом бўлса, қўзғатиш ЭЮКни топинг.

4.6.6. Турбогенератор қўзғатилган бўлиб, юкламада ток $I=2150$ А, $\cos \varphi=0.8$. $U_{н.л}=0.4$ кВ. Якор чулғамининг актив ва асосий (бош) индуктив қаршилиги: $R=0.0015$ Ом, $x_\alpha=0.17$ Ом, индуктив сочилма қаршилиги $x_\delta=0.015$ Ом. Қўзғатиш ЭЮКни аниқланг.

4.6.7. Гидрогенераторнинг тўла қуввати $S_n=26$ мВА, $\cos\varphi_n=0.8$. Механик исроф $P_{\text{мех}}=88$ кВт, якор чулғамидаги элетр исрофи $P_{\Sigma 1}=185$ кВт, магнит исрофлар $P_m+P_{\text{мк}}=138.5$ кВт, кўзгатгични ҳаракатга келтиришга сарфланаётган қувват $P_f / \eta_f = 167$ кВт. Генераторнинг тўла қуввати ва ФИК топилсин.

4.6.8. Уч фазали синхрон генератордан юклама $P_n=26$ мВт қувватни олмоқда, генераторнинг электромагнит қуввати $P_{\Sigma m}=26.2$ мВт, статор пўлат ўзагидаги магнит исроф $P_m=150$ кВт, фаза токи $I=1790$ А.

Якор чулғамининг актив қаршилиги топилсин.

4.6.9. Турбогенераторнинг юкламаси камайган вақтдаги номинал кўзгатиш токи $I_f = 1.5$. Генератор номинал салт ишлаш тавсифига эга. Кучланишнинг ўзгариши аниқлансин.

4.6.10. Аён қутбли синхрон генератори номинал салт ишлаш тавсифига эга бўлиб, номинал фаза кучланиши $U_{н.ф}=6060$ В, фаза токи $I=2750$ А, якор чулғамининг бўйлама ўқи бўйича индуктив қаршилиги $x_d = 2.5$ Ом. Салт ишлаш режимида (номинал кучланиш) МЮК га мос келувчи қисқа туташув токи ва қисқа туташув нисбати (ҚТН) аниқлансин.

Жавоблар

- 4.6.1. $F_{\text{ам}}=1155$ А
- 4.6.2. $F_{\text{ам}}=34281$ А
- 4.6.3. $B_{\text{адлм}}=0.459$ Тл; $B_{\text{ақлм}}=0.22$ Тл
- 4.6.4. $E_{\text{ад}}=7189$ В; $E_{\text{ақ}}=1356.4$ В
- 4.6.5. $E_f=550.5$ В
- 4.6.6. $E_f=622.3$ В
- 4.6.7. $\Sigma P=578.5$ кВт; $\eta=0.973$
- 4.6.8. $R=0.0052$ Ом
- 4.6.9. $\Delta U=0.2$
- 4.6.10. $\text{ОКЗ}=0.934$; $I_{\text{к.о}}=2569$ А.

Фойдаланилган адабиётлар

1. Читечян В.И. Электрические машины: Сборник задач. – М.: Высшая школа, 1988. – 231 с.
2. Данку А., Фаркаш А., Надь Л. . Электрические машины: Сборник задач и упражнений. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с.
3. Каримов А.С., Мирҳайдаров М.М., Блейхман С.Г., Попов В.А. Электротехника масалалар тўплами ва лаборатория ишлари. – Т.: Ўқитувчи, 1989. – 248 б.

