

8. Электр машиналардың якорь орамалары, электр қозғаушы күші (ЭҚК) және электр магниттік моменттері

8.1. Синхронды машинаның якорьлық ЭҚК

2-полюсті ротор статордың ішінде $\omega_{\text{мех}}$ тұрақты бұрышты жылдамдығымен айналғанда, якорь ораманың магниттік ағыс ілінісуі $\cos\alpha$ (α – ротор осьпен якорьлық орамасының магниттік осьтін арасындағы бұрыш) заңымен өзгереді:

$$\Psi_a = w \cdot \Phi_\delta \cdot \cos\alpha = w \cdot \Phi_\delta \cdot \cos\omega t \quad (8.1)$$

Мында Φ_δ – полюстін магниттік ағыны; W – орама шумактардын саны; ең басында уақыт $t = 0$ болғанда, екі ось дәл келеді.

Электромагниттік индукция заң бойынша ЕҚК тең:

$$e_a = \omega \cdot w \cdot \Phi_\delta \cdot \sin\omega t \quad (8.2)$$

ЭҚК-ін амплитудасы:

$$E_{am} = \omega \cdot w \cdot \Phi_\delta = 2\pi f \cdot w \cdot \Phi_\delta \quad (8.3)$$

Және әрекет мәні:

$$E_a = \frac{E_{am}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\pi \cdot f \cdot w \cdot \Phi_\delta = 4,44f \cdot w \cdot \Phi_\delta \quad (8.4)$$

(8.4) тендік трансформатор тендікке сәйкес. Ротордың айналу индукция кеңістік тарауың уақыт өтуімен өзгертін ЭҚК-ке түрлендіреді.

Үшфазалы машинада (8.4) формула ауысымы толық (диаметрлік) жинақтау фазаның ЭҚК әрекет мәні ЭҚК-тің түрін синусоидаға жақындату үшін қазіргі айнымалы ток машиналардын орамасы таратылады да қысқарту қадамымен жасалды. Бұдан ЭҚК азайғаны ораманың тарату коэффициенті k_T және орама ауысымымен қысқарту коэффициент пен k_K (8.3, 8.4) есепке алынады. Олай болса якорь ораманың ЭҚК

$$E_a = 4,44 \cdot f \cdot \omega \cdot k_{op} \cdot \Phi_\delta, \quad (8.5)$$

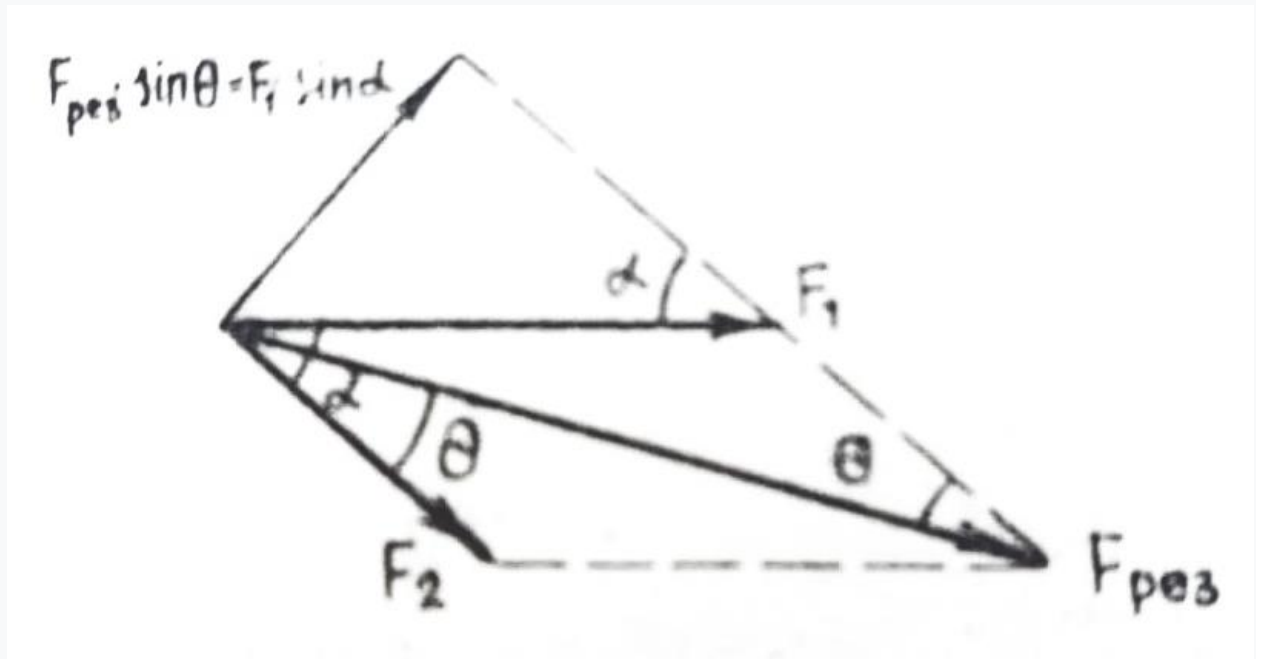
мында $k_{op} = k_T \cdot k_K$ – орама коэффициенті.

8.2. Магнит өрістері мен электромагниттік момент

Электр машинасының статоры мен ротор орамдарындағы токтар олардың арасындағы саңылауда магнит ағындарын тудырады. Оның **электромагниттік моменті** саңылаудағы екі магнит өрісінің магниттік осьтерін туралау тенденциясына байланысты пайда болады. Электр машинасының магнит өрісі 1) ауа саңылауын кесіп өтетін және статор мен ротор орамдарымен бір мезгілде түйісетін магнит ағынының негізгі (бірінші) кеңістіктік гармоникасы арқылы құрылады және 2) ауа саңылауынан тыс

жабылатын және бөлек орамдармен түйісетін ағып кету ағындары арқылы жасалады. Электромагниттік моментті құруға тек негізгі немесе жұмыс ағыны қатысады, жалпы ағынның шамамен 90% құрайды.

Орамдардың **магниттеу күштері (НС)**, оларды статор шеңбері бойынша синусоидалы түрде бөлінген етіп, орамалардың магниттік осьтері бойымен бағытталған кеңістіктік векторлар $\vec{F}_1$ және $\vec{F}_2$ түрінде ұсынуға болады. Векторлардың ұзындығы НС амплитудасына сәйкес келеді (сур. 8.1).



Сур 8.1. Айнымалы ток машинаның магниттеу күштері (НС)

Жалпы НС $F_{рез}$ ауа саңылауына қолданылады, F_1 және F_2 геометриялық қосындысына тең:

$$F_{рез} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1 * F_2 * \cos\alpha}. \quad (8.6)$$

Мұнда $F_{рез}$ НС синусоидалы толқынды статор шеңбері бойынша бұрыштың функциясы ретінде сипаттайды. Бұл жағдайда $2p$ -полюсті машинаның электромагниттік моменті болатындығын көрсетуге болады:

$$M_{эм} = - \frac{\mu \cdot p \cdot D \cdot l}{2\delta} \cdot F_{рез} \cdot F_2 \cdot \sin \theta. \quad (8.7)$$

(8.7) теңдеу моменттің статор мен ротордың НС амплитудасының мәндеріне және НС арасындағы электр кеңістігі-фазалық бұрышының синусына пропорционалды екенін көрсетеді. Минус белгісі жүз өрістің туралануға бейімділігін білдіреді.

Момент статорға және роторға қарама-қарсы бағытта әсер етеді. $\vec{F}_1$ және $\vec{F}_{рез}$ векторларының $\vec{F}_2$ векторына перпендикуляр бағытқа артықшылықтары бір-біріне тең (сур. 8.1):

$$F_1 \cdot \sin \alpha = F_{рез} \cdot \sin \theta, \quad (8.8)$$

мұндағы θ – ауа ағынында әрекет ететін НС векторлары мен ротордың НС векторы арасындағы кеңістік-фазалық бұрыш. (8.8) -ті (8.7) -ге ауыстырып, соңғы формуланы аламыз:

$$M_{эм} = - \frac{\pi}{2} p^2 \cdot \Phi_\delta \cdot F_2 \cdot \sin \theta. \quad (8.9)$$

Момент өзара әрекеттесетін өрістерге және олардың магниттік осьтері арасындағы электрлік кеңістіктік бұрыш синусына пропорционалды. Теріс белгі электромагниттік момент өрістер арасындағы ығысу бұрышын төмендететін бағытта әрекет ететіндігін көрсетеді. Тұрақты момент статор мен ротордың магнит өрістері бір-біріне қатысты қозғалмайтын болған кезде пайда болады.

8.3. Синхронды көпфазалы машинаның моменті

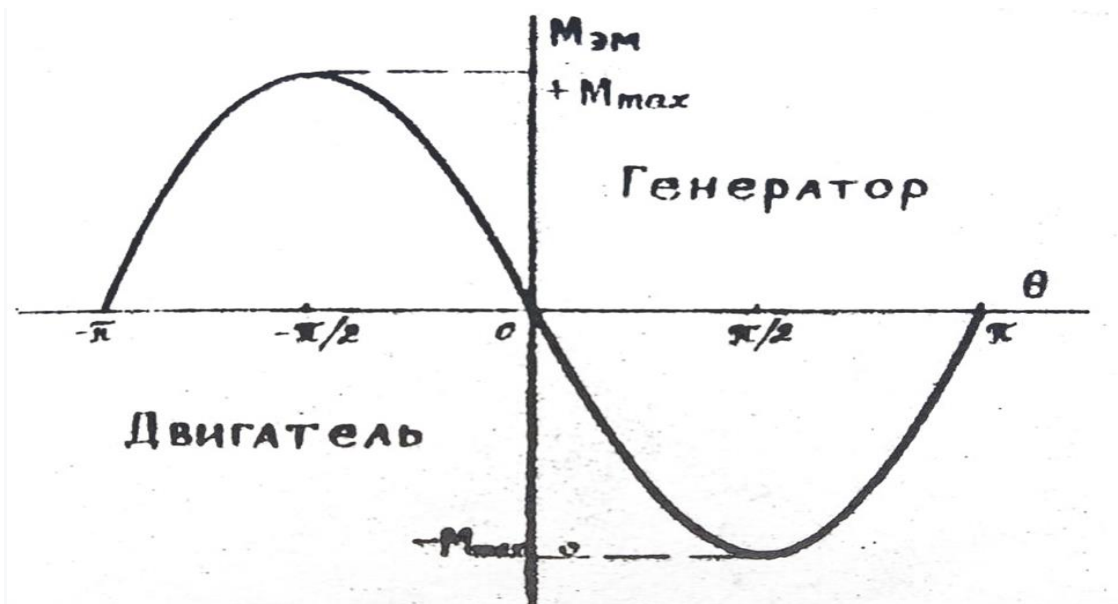
Симметриялық көпфазалы токтар ағып жатқанда, синхронды машинаның якорь орамасы синхронды жылдамдықпен айналатын ауа саңылауында магнит өрісін жасайды (жүйенің жиілігі f және полюстер жұптарының саны p (6.7)). Ротордың орамасы жасаған өріс онымен бірге айналады. Момент шамасы мен бағыты бойынша тұрақты құру үшін статор мен ротордың өрістері бір-біріне қатысты қозғалмау болуы керек, яғни ротор жүктемеге қарамастан тұрақты n (немесе $\omega_{мех}$) жылдамдықпен айналуы керек.

Зәкір орамындағы Φ ағынымен туындаған ЭҚК якорь қысқыштарындағы кернеуді U теңестіруі керек. Осыдан магнит ағынының өрнегін келесі түрде аламыз:

$$\Phi_\delta = \frac{U}{4.44 f w k_{оп}} \quad (8.10)$$

Тұрақты кернеу кезінде ағын да тұрақты болады және жүктеме шамасына тәуелді болмайды ($\Phi_\delta = \text{const}$). НС F_2 роторы тұрақты өріс тогымен анықталады, егер ол тұрақты болса. Демек, моменттің өзгеруі (жүктеменің өзгеруімен) **белсенді жүктің бұрышы** деп аталатын θ бұрышының өзгеруімен қамтамасыз етіледі.

Генератор режимі теріс сәттермен және θ оң мәндерімен сипатталады, ол НС қозу толқынынан пайда болған саңылау ағыны Φ_δ толқынының кідірісіне сәйкес келеді. Қозғалтқыш режимі оң $M_{эм}$ мәндеріне және теріс θ мәндеріне сәйкес келеді (сур. 8.2).



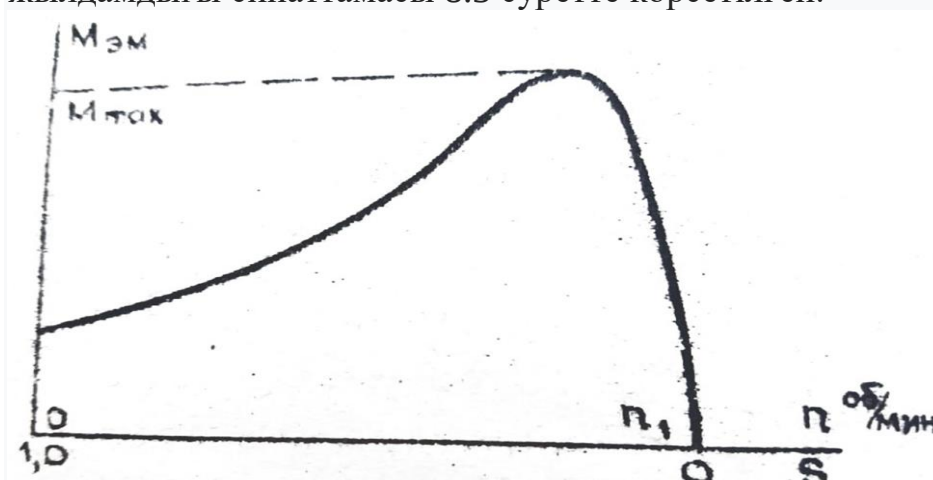
Сур. 8.2. Электромагниттік момент жүктеме бұрышының қисығына қарсы

Қозғалтқыш білігіне аз жүктеме түскен кезде электромагниттік момент аз болады, ал θ бұрышы кішкентай болады. Жүктеменің артуымен ротор айналатын нәтижесінде пайда болған ағынға қатысты кеңістікте артқа қарай қозғалуы керек, ал θ қажетті момент үшін қажет мөлшерге ұлғаяды.

Егер роторды негізгі қозғалтқыш (турбина) басқарса, онда синхронды машина генератор ретінде энергия жүйесіне электр энергиясын жеткізеді. Бұл жағдайда НС қозу толқыны пайда болған ағынның толқынына ($\theta > 0$) алға қарай итеріліп шығады.

8.4. Асинхронды машинаның моменті

Асинхронды қозғалтқыштың тиін торы бар айналу моментінің жылдамдығы сипаттамасы 8.3 суретте көрсетілген.



Сур. 8.3. Асинхронды қозғалтқыштың тиін торы бар айналу моментінің жылдамдығы сипаттамасы

Мұнда статорға берілген кернеу мен жиілік тұрақты болса, ауа саңылауының ағымы тұрақты болады. НС роторы I_2 ротор тогына пропорционалды, содан кейін моменттің өрнегі (8.9) қарапайым формада болады:

$$M_{эм} = k \cdot I_2 \cdot \sin \theta, \quad (8.11)$$

мұнда k – тұрақты коэффициент.

Ротор тізбегінің тогы ротор орамында пайда болған ЭҚК-мен Φ_δ саңылау ағынымен және оның сырғанау жиілігіндегі жалпы кедергісімен (импеданс) анықталады. Сырғану s әдетте төмен және толық жүктеме кезінде 3-5% -дан аспайды. Сондықтан ЭҚК мен ротор тогының жиілігі 1,5-2,5 Гц құрайды. Ротордың белсенді кедергісі іс жүзінде жиілікке тәуелді емес, ал таратылып кету реактивтік кедергісі (реактанс) жиілікке пропорционалды болғандықтан, ротор тізбегі таза түрде белсенді болады. Бұл жағдайда ток ротордың ЭҚК-не пропорционалды және фазада онымен сәйкес келеді.

Өз кезегінде ЭҚК сырғанауға пропорционалды, сондықтан ротор тогы да сырғанауға пропорционалды болады. Сонымен қатар, ротордың НС ағыны Φ_δ -ден 90° -қа жуық артта қалады, содан кейін $\sin \theta = 1$. Осылайша, кішігірім сырғанау кезінде момент-жылдамдық сипаттамасы тікелей болады.

Сырғанаудың ұлғаюымен ротордың реактивтілігі жоғарылайды, ток сипаты бойынша индуктивті болады және НС роторының толқыны Φ_δ ағынының толқынынан артта қалуға қарағанда көбірек болады, ал $\sin \theta$ азаяды. Нәтижесінде, сырғанаумен момент алдымен максимумға дейін артады, содан кейін азая бастайды (сур. 8.3). Асинхронды тиін торлы қозғалтқыш мәні бойынша тұрақты жылдамдықты қозғалтқыш болып табылады, өйткені бос жүріс режимден толық жүктемеге өткенде жылдамдық бірнеше пайызға ғана төмендейді.

9. Асинхронды қозғалтқыштың векторлік және энергетикалық диаграммалары

9.1. Келтірілген асинхронды машинаның кернеу теңдеулері

Асинхронды машинаның кернеу теңдеулерін құрайық, онда симметриялы токтар симметриялы орамалар арқылы өтеді және өзекшенін болатта магниттік шығындар болмайды. Статор мен ротордың бір фазасын қарастырайық.

Статор орамына берілген $\dot{U}_1$ кернеуі орамда синхронды айналатын ауа саңылауының ағынымен индукцияланған қарсы ЭҚК ($-\dot{E}_1$) және реактивтік сейілу кедергіде $X_{\sigma 1}$ мен ораманың активтік кедергіде R_1 кернеудің түсуілермен бойынша арқылы теңестіріледі:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j X_{\sigma 1} \cdot \dot{I}_1 + R_1 \cdot \dot{I}_1 \quad (9.1)$$

Айналмалы ротордың орамасының қысқыштарындағы кернеу тең саңылаулар ағынымен индукциялаған ЭҚК-қа минус реактивтік сәйкес кедергіде $X_{\sigma 2}$ мен ораманың активтік кедергіде R_2 кернеудің түсулерін. Қалыпты жағдайда ротор тізбегі қысқа тұйықталған болғандықтан, кернеу теңдеуі:

$$0 = s\dot{E}_2 - jsX_{\sigma 2} \cdot \dot{I}_2 - R_2 \cdot \dot{I}_2 \quad (9.2)$$

(9.2) теңдеудің барлық шарттарын сырғанау s бөле отырып, қозғалмайтын ротордың теңдеуін аламыз:

$$0 = \dot{E}_2 - j X_{\sigma 2} \cdot \dot{I}_2 - \frac{R_2}{s} \cdot \dot{I}_2 \quad (9.3)$$

ЭҚК-терді орамдардың реактивтік кедергісінде кернеудің түсуімен көрсетілуі мүмкін:

$$\dot{E}_1 = -j (X_1 \cdot \dot{I}_1 - X_{21} \cdot \dot{I}_2), \quad (9.4)$$

$$\dot{E}_2 = -j (X_2 \cdot \dot{I}_2 - X_{12} \cdot \dot{I}_1), \quad (9.5)$$

мұнда X_1 мен X_2 – статор мен ротордың әуе саңылауы өрісінен өзіндік реакциясы;

$X_{21} = X_{12}$ – статор мен ротордың ауа саңылауы өрісінен өзара әрекеттесуі.

X_{21} және X_{12} алдында қойылған «минус» белгілер орамалардағы ағымдардың таңдалған бағыттары үшін оң ротор тогы статор орамасының теріс ағынды ілінісін және керісінше екенін көрсетеді.

(9.1) және (9.3) теңдеулер (9.4) және (9.5) ескере отырып, келесі түрге ие болады:

$$\dot{I}_2 = k_i \cdot \dot{I}_2' \quad (9.6)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_2' / k_u \quad (9.7)$$

Қозғалмайтын ротордың параметрлерін трансформатормен ұқсастығы бойынша статорға келтіру айнымалыларды түрдегі 1 және 2 теңдеулерге ауыстыруды білдіреді:

$$\dot{U}_1 = jX_1 \cdot \dot{I}_1 - jk_i \cdot X_{21} \cdot \dot{I}_2' + jX_{\sigma 1} \cdot \dot{I}_1 + R_1 \cdot \dot{I}_1, \quad (9.8)$$

$$0 = jk_u \cdot X_{12} \cdot \dot{I}_1 - jk_i \cdot k_u \cdot X_2 \cdot \dot{I}_2' - jk_i \cdot k_u \cdot X_{\sigma 2} \cdot \dot{I}_2' - k_i \cdot k_u \cdot \frac{R_2}{s} \cdot \dot{I}_2'. \quad (9.9)$$

Енді төмендетілген асинхронды машинаның кернеу теңдеулері соңғы формасын алады:

$$\dot{U}_1 = jX_1 \cdot (\dot{I}_1 - \dot{I}_2') + jX_{\sigma 1} \cdot \dot{I}_1 + R_1 \cdot \dot{I}_1, \quad (9.10)$$

$$0 = jX_1 \cdot (\dot{I}_1 - \dot{I}_2') - jX_{\sigma 2}' \cdot \dot{I}_2' - \frac{R_2'}{s} \cdot \dot{I}_2'. \quad (9.11)$$

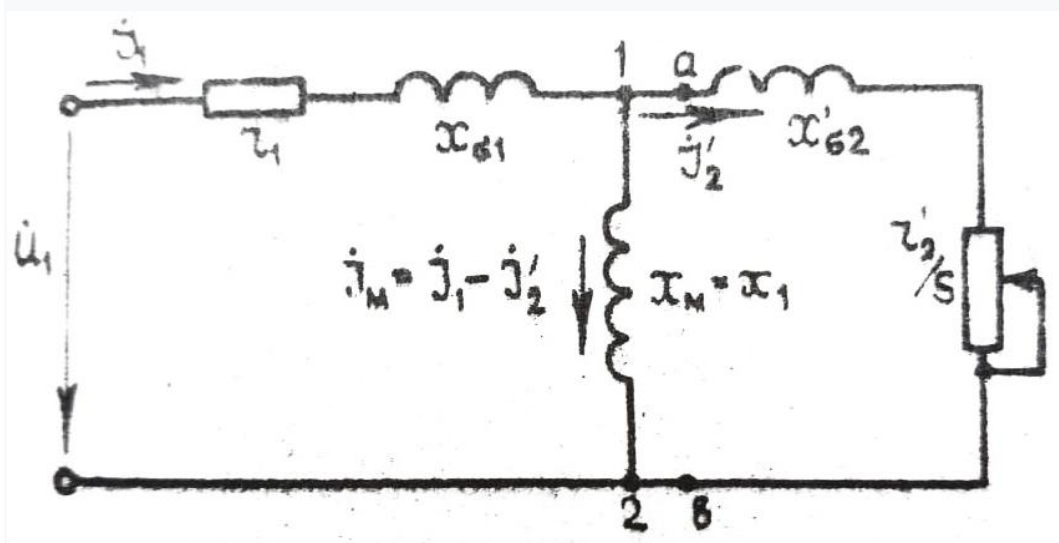
мұндағы $X_{\sigma 2}' = k_i \cdot k_u \cdot X_{\sigma 2}$ – келтірілген ротордың сәйкес реактансы;

$R_2' = k_i \cdot k_u \cdot R_2$ – келтірілген ротордың активтік кедергісі.

Келтірілген реактанстар сан жағынан ауа саңылауы өрісінің негізгі гармоникасынан статор орамасының реактансына тең екендігін көрсетуге болады.

9.2. Асинхронды машинаның орынбасу сұлбасылар

Кернеу теңдеулері (9.10) және (9.11) асинхронды машинаның жұмысының барлық мүмкін болатын тұрақты симметриялы режимдеріндегі әрекетін сипаттайды және Т-тәрізді электрлік эквиваленттік схемаға сәйкес келеді (сур. 9.1).

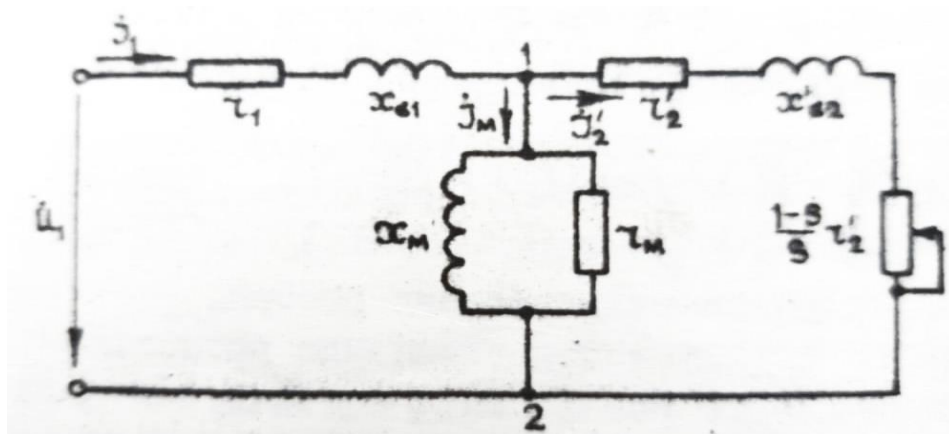


Сур. 9.1. Болаттағы шығындарды есепке алмай асинхронды машинаның балама тізбегі

Тізбектің 1-2 бөлімі **магниттейтін тармақ** деп аталады. Саңылау ағынынан статор орамасының меншікті реактансқа күшіне сандық тең магниттейтін тармағының реактансы X_m болып табылады. **Магниттейтін ток** $\dot{I}_m = \dot{I}_1 - \dot{I}_2'$ магниттейтін тармақтың бойымен ағып өтеді, оның НС нәтижесінде машина саңылауында пайда болатын (жұмыс істейтін) магнит ағыны пайда болады. Магниттейтін тармақтың кернеуі $\dot{U}_{12}$ кері ЭҚК-ке тең болады:

$$\dot{U}_{12} = jX_m \cdot \dot{I}_m = -\dot{E}_1. \quad (9.12)$$

Қозғалтқыш режиміндегі сырғанаудың қалыпты мәндерінде ротордың болатындағы шығындар шамалы, өйткені болаттың магниттелу жиілігі, сырғанау жиілігіне тең, 2-3 Гц-тен аспайды. Бұл жағдайда орынбасу сұлбасы 9.2 суретінде көрсетілген түрін алады.



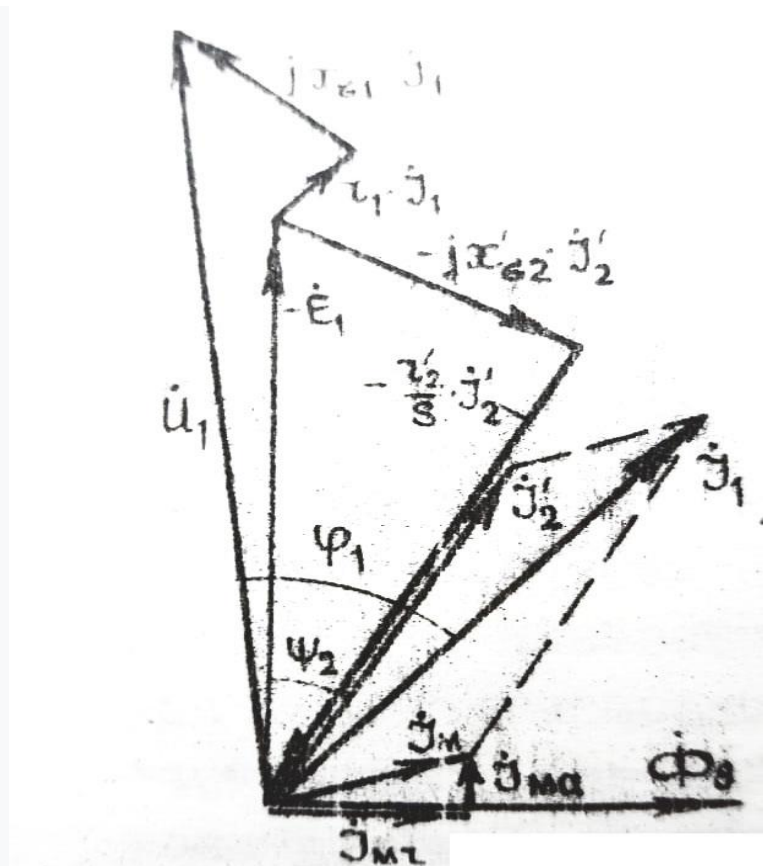
Сур. 9.2. Статор болатындағы шығындарды ескеретін асинхронды машинаның Т-тәрізді эквивалентті схемасы

Мұнда ротор тізбегі екі бөлікке бөлінеді. Мұнда ротор тізбегі активті қуатты электромагниттік қуатқа (кедергі $\frac{1-s}{s} R_2'$) және статор болатындағы қуат шығынын (кедергі R_2') бөлу үшін өзгертілген. Сонымен қатар, тізбекте магниттейтін ток тек индуктивті емес, ол $\dot{E}_1$ -ге қатысты белсенді (кедергі R_m) және реактивті (кедергі X_m) компоненттерге бөлінеді.

Трансформаторлармен ұқсастығы бойынша эквиваленттік тізбектің параметрлері әдетте бос жүріс және қысқа тұйықталу тәжірибелерінің деректерінен табылады.

9.3. Асинхронды қозғалтқыштың векторлік және энергетикалық диаграммалар

Эквивалентті схема (9.2-сурет) асинхронды қозғалтқыштың кернеулерінің векторлық диаграммасына (сур. 9.3) сәйкес келеді. Бұл трансформатордың векторлық диаграммасына ұқсас, тек ротор тізбегінің тұйықталуы және осы жұмыс сырғанаулар кезінде активтік кедергісі басым болады (ψ_2 бұрышы салыстырмалы түрде аз).



Сур. 9.3. Асинхронды қозғалтқыштың векторлық диаграммасы

Асинхронды қозғалтқыштағы баламалы тізбектің (9.2-сурет) көмегімен энергияны түрлендіру процесін қарастырайық.

m -фазалық қозғалтқыштың желіден тұтынатын активті қуаты:

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1, \quad (9.13)$$

мұндағы U_1 және I_1 – статор кернеуі мен токтың фазалық мәндері, φ_1 – ток пен кернеу арасындағы фазалық уақыттың ауысуы.

Статор орамасындағы электр шығындары:

$$p_{эл1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_1. \quad (9.14)$$

Статор болатының шығындары

$$p_{мг} = m_1 \cdot E_1^2 / R_m. \quad (9.15)$$

Электромагниттік қуат (статордан роторға берілетін активті қуат) желіден тұтынылатын қуаттан электр және магниттік шығындарды шегергенде, тең:

$$P_{ЭМ} = P_1 - p_{эл1} - p_{мг} \quad (9.16)$$

Эквивалентті схемаға сәйкес, $P_{ЭМ}$ сандық ротор тізбегінің активті қуатына тең:

$$P_{ЭМ} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' / s. \quad (9.17)$$

Ротор орамасындағы электрлік шығындар былай анықталғандықтан

$$p_{эл2} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot R_2', \quad (9.18)$$

толық мезаникалық қозғалтқыш қуаты тең.

$$P_{мех} = P_{ЭМ} - p_{эл2} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{1-s}{s} R_2'. \quad (9.19)$$

(9.17), (9.18) және (9.19) өрнектерді салыстыру көрсеткендей

$$p_{эл2} = s \cdot P_{ЭМ}, \quad (9.20)$$

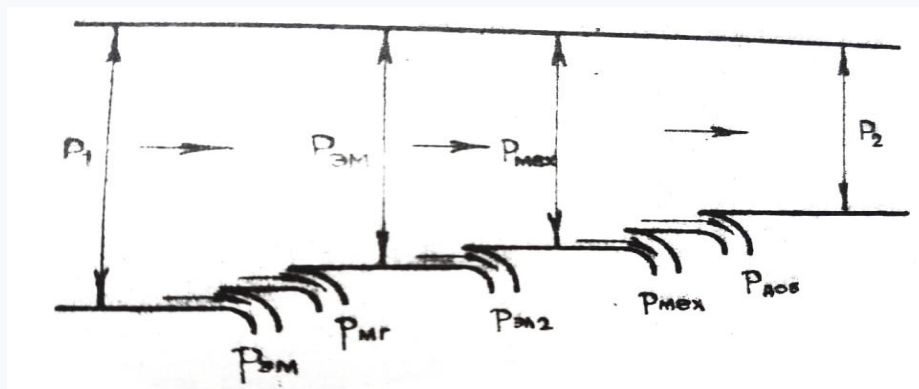
$$P_{мех} = (1 - s) \cdot P_{ЭМ}, \quad (9.21)$$

Яғни электромагниттік қуаттың бір бөлігі $(1 - s)$ механикалық қуатқа айналады, ал s бөлігі ротордағы электрлік шығындар түрінде бөлінеді. Демек, қозғалтқыштың үлкен сырғанаумен жұмыс жасауы экономикалық емес екенін көруге болады.

Қозғалтқыш білігіндегі механикалық қуат жалпы (немесе ішкі) механикалық қуаттан механикалық және қосымша шығындар мөлшерімен ерекшеленеді:

$$P_2 = P_{мех} - p_{мех} - p_{доб}. \quad (9.22)$$

P_2 қуаты – бұл машинаның пайдалы қуаты. Активті қуат компоненттері энергетикалық диаграммада көрсетілген (сур. 9.4).



Сур. 9.4. Асинхронды қозғалтқыштың энергетикалық диаграммасы

Асинхронды қозғалтқыштың пайдалы әрекет коэффициенті (ПӘК) тең:

$$\eta = P_2 / P_1 = 1 - \sum p / P_1, \quad (9.23)$$

мұнда $\sum p = p_{эл1} + p_{мг} + p_{эл2} + p_{мех} + p_{доб}$ – жалпы қуат шығыны.

Асинхронды қозғалтқыш желіден тұтынатын реактивті қуат тең:

$$Q_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1, \quad (9.24)$$

Статор орамасының сейілу өрістерін құруға кеткен реактивті қуат:

$$q_1 = m_1 \cdot I_1^2 \cdot X_{\sigma 1} . \quad (9.25)$$

Ауа саңылауында магнит өріс құруға кететін реактивті қуат:

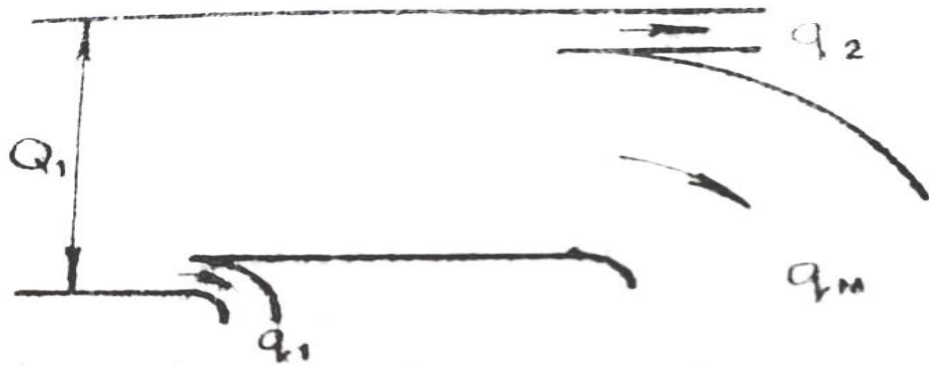
$$q_m = m_1 \cdot E_1^2 / X_m . \quad (9.26)$$

Ротор орамасының сейілу өрістерін құруға кеткен реактивті қуат:

$$q_2 = m_1 \cdot I_2^2 \cdot X_{\sigma 2}' . \quad (9.27)$$

Сонымен

$$Q_1 = q_1 + q_m + q_2 . \quad (9.28)$$



Сур. 9.5. Асинхронды қозғалтқыштың реактив қуаттын энергетикалық диаграммасы

Энергетикалық диаграммаға сәйкес (9.5-сурет) тұтынылатын реактивті қуаттың көп бөлігі машинаның ауа саңылауында жұмыс істейтін магнит өрісін құруға қажет қуат болып табылады. Яғни, бұл қозғалтқыштың әдеттегі мәндері 0,8-0,95 болатын қуат коэффициентінің шамасын анықтайтын қоздыру қуаты.

Лекцияны меңгеруге арналған сұрақтар

1. Энергияны түрлендіру үшін электр машиналар қалай бөлінеді?
2. Магнит тізбегі үшін толық ток заңы.
3. Магнит тезбегі үшін Ом заңы.
4. Электр магниттік индукция заңы.
5. Оң қол ереже.
6. Сол қол ереже.
7. Энергияны түрлендіру үшін электр машиналар қалай бөлінеді?
8. Магнит тізбегі үшін толық ток заңы.
9. Магнит тезбегі үшін Ом заңы.
10. Электр магниттік индукция заңы.
11. Оң қол ереже.
12. Сол қол ереже.

Негізгі әдебиеттер тізімі

1. Жумагулов Қ.Қ., Шидеров М., Гали К.О. Электр машинасы. – Алматы: АЭЖБИ, 2008. – 4, 5, 24, 25.
2. Задания для программированного изучения раздела "Трансформаторы" по курсу "Электрические машины". – Караганда, 2007. – с. 5-9.