

6. Энергияны электромеханикалық түрлендіру принциптері

6.1. Электр машиналардың классификациясы

Электр машинасы – бұл электромагниттік индукция құбылыстарына және магнит өрісінде қозғалатын ток өткізгішке әсер ететін Ампер күшіне негізделген электромеханикалық энергия түрлендіргіші.

Теориялық бойынша электр машиналарға екі ережемен жұмыс істеуге болады. Генератор режимде механикалық энергия электр энергияға түрлендіріледі, ал қозғалтқыш режимде электр энергияға механикалық энергияға түрлендіріледі. Егер бір типтегі электр энергиясы басқа типтегі электр энергиясына айналғанда, электр машинасы электромеханикалық түрлендіргіш немесе трансформатор болады, ал механикалық және электр энергиясы жылуға айналғанда, электр машинасы электромагниттік тежегіш болады. Көптеген машиналар үшін бір машина қозғалтқыш ретінде де, генератор немесе электромагниттік тежегіш ретінде де әрекет ете алатын кезде қайтымдылық принципі орындалады.

Осындай түрлендіруді жасау үшін машинаның ішінде ораманың токтары магнит өрісті жасау керек және туғызған магнит ағынға өтетін жол салу керек. Олай болса электр машиналарда болаттан жасалған өзекшені құрылу керек. Көптеген электр машиналарында ротор – өзекшенің айналмалы бөлік, ал статор – бекітілген бөлік, сондай-ақ оларды бөлетін ауа саңылауы бөлінеді.

Негізгі жұмыс магниттік ағынының туғызатын токты қоздыру ток I_v және бұл токты өткізетін ораманы қоздыру орамасы деп атайды. Қоздыру орамадан ауа аралықпен бөлген орамаларды және одан өтетін токтарды якорлық орама (катушка) және якорлық ток I_a деп атайды. Якорлық катушканың әрі-бір өткізгіште (орамада) электромагниттік құбылысымен индукциялаған ЭҚК-тердің бағыттары бір болған кейін, олар қосылып якорлық ЭҚК E_a туғызады. Якорде айнымалы магнит ағыны өткенде, ферромагнетик өзекшеде құйынды токтар түзіледі. Құйынды токтар арқылы шығындарды азайту үшін электр машинаның өзекшесің өте жиіше электр техникалық болаттан жасалған

Жұмыс принципі бойынша келесі машина түрлері бөлінеді:

1. **Асинхронды машина** – айнымалы токтың электр машинасы, онда ротордың жылдамдығы ауа саңылауындағы магнит өрісінің жылдамдығынан сырғанау жиілігіне дейін ерекшеленеді.

2. **Синхронды машина** – ротор мен магнит өрісінің айналу жиілігі тең болатын айнымалы ток электр машинасы.

3. **Тұрақты ток машинасы** – тұрақты токпен қоректенетін және коллекторы бар электр машинасы.

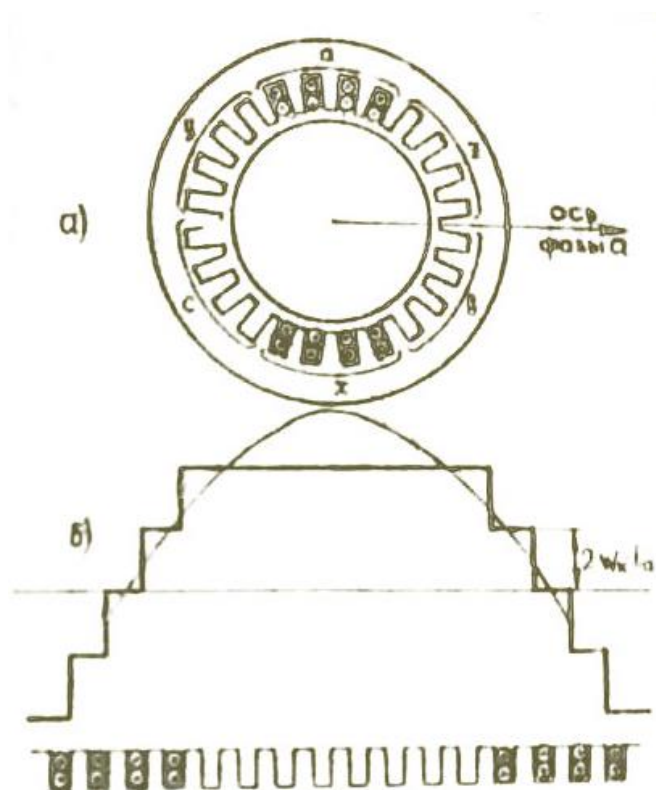
4. **Трансформатор** – бұл тұрақты жиілікте айнымалы токты бір кернеуден екінші кернеуге түрлендіруге қызмет ететін статикалық электромагниттік аппарат.

Электр машиналарын үш сыныпқа бөлуге болады:

- индуктивті электр машиналары – олардағы энергияны электромеханикалық түрлендіру магнит өрісі арқылы жүзеге асырылады;
- сыйымды электр машиналары – олардағы энергияны электромеханикалық түрлендіру электр өрісі арқылы жүзеге асырылады;
- индуктивті-сыйымдылықты электр машиналары.

6.2. Айнымалы ток машиналардың айналмалы өрісі

Электр машинасында магнит өрісін күшейту және шоғырландыру үшін ол үшін магниттік тізбек жасалады. Электр машинасы екі негізгі бөліктен тұрады (сур. 6.1а): бекітілген статор және айналмалы ротор, сәйкесінше қуыс және қатты цилиндр түрінде жасалады.



Сур.6.1. Үшфазалы машинаның түрі (а) және айнымалы ток орамының магниттеуш күші (б)

Статорда үш бірдей орамалар орналасқан, олардың магниттік осьтері магнит тізбегінің бойымен полюстің бөлінуінің $2/3$ бөлігіне ауысады, оның мәні өрнекпен анықталады:

$$\tau = \frac{2\pi R}{2p} = \frac{\pi R}{p}, \quad (6.1)$$

мұндағы R – магнит тізбегінің радиусы, ал p – полюстер жұптарының саны (суретте көрсетілген магнит өрісін саны $p=1$).

Статордың ішкі шеңберінде ойықтар жасалған фазалы ораманың

катушкаларың таратушы үшін. Үш фазаның орамалары бірдей. Олардың магнит осьтарының арасы 120° тең, катушкалары w орамдармен жасалған. Суретте тек қана a фазаның катушкалары көрсетілген, b және c фазаларын катушкалары көрсетілген жоқ.

Болаттың магниттік өткізгіштігін шексіз үлкен етіп қабылдай отырып, біз белгілі бір уақыт t үшін A фазасының орамасы жасаған машинаның ауа саңылауында магниттік индукцияның таралу қисығын құрамыз (сур. 6.1б). Құрылыс кезінде қисықтың катушкалар орналасқан жерлерде секіріспен өзгереді, ал ток жоқ жерлерде көлденең қималар болатындығын ескереміз. Біз бұл қисықты синусоидамен алмастырамыз (нақты машиналарда алынған өріс үшін фазалық орамалардың тиісті орындалуына байланысты мұндай ауыстыру өте аз қателіктермен байланысты екенін көрсету керек).

Ораманың бір полюсы түзетіліп көрсетілген (сур. 6.1б). Мұнда магниттеуш күштің толқыны қадамының биіктігі $2w i_a$ сериясымен ұсынады. Бұл магниттеуш күш бір ойықтың толық токқа тең. Сонымен $2p$ -полюсты ($p = 1, 2, \dots$) үшфазалы айнымалы ток машинада таратылған якорлық ораманың бір фазаның магниттеуш күші тең:

$$F_a = \frac{4}{\pi} * \frac{w * k}{2p} * i_a * \cos \alpha, \quad (6.2)$$

мұнда w – фазаның тізбектегі орамалар саны; k – орама коэффициенті, $k = k_T * k_K$ (k_T – ораманың тарату коэффициенті, k_K – ораманың қысқарту коэффициенті); p – жұп магнит полюстер саны; i_a – якорлық токтың күші.

Магниттеуш күшінің шыңысы F_{max} якорлық токқа i_a пропорционалды. Егер ток синусоидалы болса

$$i_a = \sqrt{2} I_a * \cos \omega t,$$

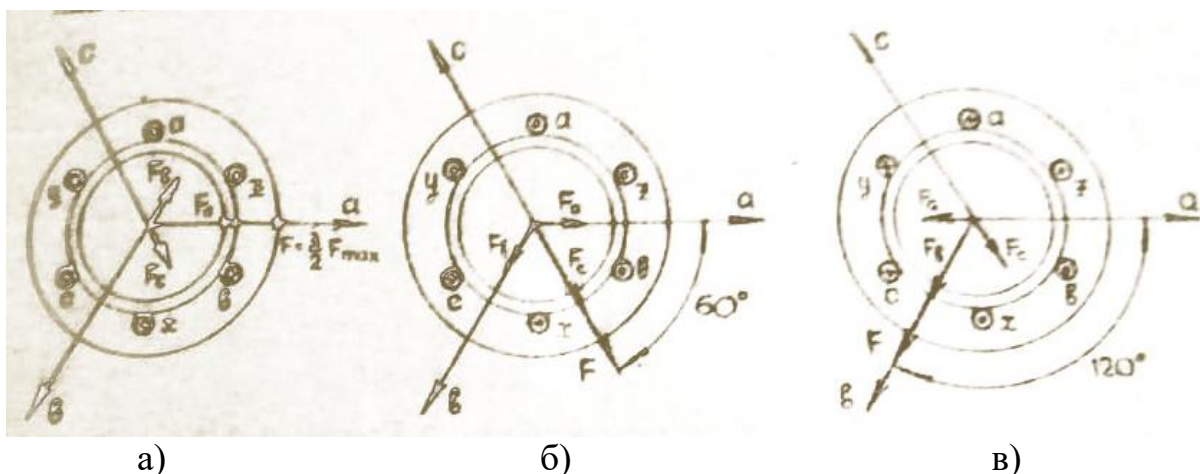
магниттеуш күшінің уақыттағы шыңыс тең:

$$F_{max} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} * \frac{w * k}{2p} * I_a, \quad (6.3)$$

мұнда I_a – фазалық әсер етуші токтың мәні.

Магниттеуш күшінің толқыны кеңістікте жылжымай тұрып уақыт өтумен синусоида сияқты ω бұрышты жиілігімен лүпілдейді, егер i_a синусоидалы ток болса.

6.2 суретте екіполюстік машинаның үшфазалық орамасы топталған ax , by , cz қадамы толық катушкалармен көрсетілген. Катушкалардың және фазалық магниттеуш күштің толқындардың арасы $\frac{2}{3} \pi$ радианға (120°) тең.



а) б) в)
Сур. 6.2. Айналмалы өрісінің үшфазалы орамада жасау

Фазадағы токтары уақыт өтуумен синусоидалық заңымен өзгереді:

$$\left. \begin{aligned} i_a &= \sqrt{2} I_a \cos \omega t \\ i_b &= \sqrt{2} I_a \cos(\omega t - 2/3 \pi) \\ i_c &= \sqrt{2} I_a \cos(\omega t - 4/3 \pi) \end{aligned} \right\}$$

мұнда I_a – фазалық әсер етуші токтың мәні; уақыт санау басталмағанда ($t = 0$) «а» фазаның тогы максималды токқа тең ($i_a = \sqrt{2} I_a$).

Сонымен кеңістікте жылжымай тұрған фазалық магниттеуш күштің толқындары уақыт өтуумен синусоидалық заңымен өзгереді. Олай болса, әрбір магниттеуш күшті фазаның магниттік ось бағытымен кеңістік вектормен көрсетуге болады. Үш фаза магниттеуш күштердің векторларды қосқанда, ол жалпы магниттеуш күш бөп шығады:

$$\vec{F} = \vec{F}_a + \vec{F}_b + \vec{F}_c. \quad (6.4)$$

Ең басында ($\omega t_0 = 0$) «а» фазаның тогы максимал $\sqrt{2} I_a$, «b» және «с» фазалардың токтары бірдей $-\sqrt{2} I_a/2$ тең. «А» фазаның магниттеуш күші ең үлкен $\vec{F}_a = \vec{F}_{max}$ және оның бағыты «а» фазаның осьпен сәйкес (сур. 6.2а). «В» және «с» фазалардың магниттеуш күштері $F_b = F_c = F_{max}/2$, олардың бағыттары «b» және «с» фазалардың магниттік осьтарына сәйкес. Үш векторды $\vec{F}_a, \vec{F}_b, \vec{F}_c$ қоссақ (6.4), жалпы магниттеуш күштің векторы $\vec{F} = 3 \vec{F}_{max}/2$ «а» фазаның магниттік осімен бағытталады (сур. 6.2а).

Біраз уақыт өткеннен кейін $\omega t_1 = \pi/3 \text{ рад} (60^\circ)$ «а» және «b» фазалардың токтары жарты максималды токқа тең $\sqrt{2} I_a/2$, «с» фазаның тогы теріс максималды токқа тең $i_c = -\sqrt{2} I_a$. Осы уақыттың фазалық және жалпы магниттеуш күштер сурет 6.2б көрсетілген. Жалпы магниттеуш күшінің вектордың амплитудасы $F = 3F_{max}/2$ сурет 6.2а жалпы вектормен ($\omega t_0 = 0$) бірдей, бірақ оның бағыты кеңістікте сағат тіліне сәйкесті $\pi/3$ бұрышқа бұрылған (сур. 6.2б).

Қайтадан сондай уақыт өткен кейін $\omega t_2 = 2\pi/3 \text{ рад} (120^\circ)$ «b» фазаның

тогы максималды токқа тең $i_b = \sqrt{2} I_a$, «а» және «с» фазалардын токтары жарты максималды токқа тең $i_a = i_c = -\sqrt{2} I_a / 2$. Бұл жағдайда жалпы магниттеуш күштің векторы $\vec{F}$ бұрынғы саның (ұзындығын сақтап, енді $\pi/3$ бұрышқа бұрылады (сур. 6.2в). Ал басынан қарасақ, $\vec{F}$ вектор $2\pi/3$ радианға бұрылды.

Сонымен жалпы магниттеуш күшінің толқыны синусоидалық түрімен амплитудасын сақтап, уақыт өтумен якорь шеңберімен жылжыйды. Олай болса, үшфазалы токпен құрылатын магнит өрісі ток жиілігіне сәйкес жылдамдықпен (ω) айналады. Жалпы магниттеуш күштің математикалық түрі осындай:

$$F(\alpha, t) = \frac{3}{2} F_{\max} * \cos(\alpha - \omega t). \quad (6.5)$$

Айнымалы токтың бір циклдың ішінде екі полюстік машинаның магниттеуш күштің толқыны бір айналыс жасайды және 2р-полюстік машинада толқын айналыстың $1/p$ бөлшекті өтеді. Магниттеуш күш толқының бұрышты жылдамдығы тең $\omega [\text{рад/с}] = 2\pi f$ (f [Гц] – якорлық токтың жиілігі).

Өрістің айналу механикалық жылдамдығы 2р-полюстік машинада тең:

$$\omega_{\text{мех}} = \frac{\omega}{p} \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad (6.6)$$

немесе

$$n = \frac{60f}{p} \frac{\text{айналыс}}{\text{мин}} \quad (6.7)$$

7. Айнымалы ток машиналардың құрылғылары және жұмыс істеу принципі

7.1. Жалпы түсініктері

Электромагниттік индукция заңы бойынша магнит өрістерінің уақыт бойынша өзгеруінен индуктивтелген ЭҚК пайда болады. Магнит өрісінің өзгеруі механикалық қозғалысқа негізделген кезде энергияның электромеханикалық түрленуі орын алады. Электр машиналарындағы ЭҚК өткізгіште немесе катушкада магнит өрісіндегі механикалық айнарудан немесе машинаның магнит өткізгішінің магниттік кедергісінің ротордың айналуынан өзгеруінен индуктивтелінеді. Кез-келген жағдайда әр бір өткізгішпен немесе катушкамен айқасқан ағын циклды түрде өзгереді және ЭҚК индуктивтелінеді. Өзара ЭҚК-тері қосылатындай етіп жалғанған өткізгіштердің немесе катушкалардың жиынтығын **якорь орамы** деп атайды. Тұрақты ток машинасының якорь айналатын бөлшегі болып

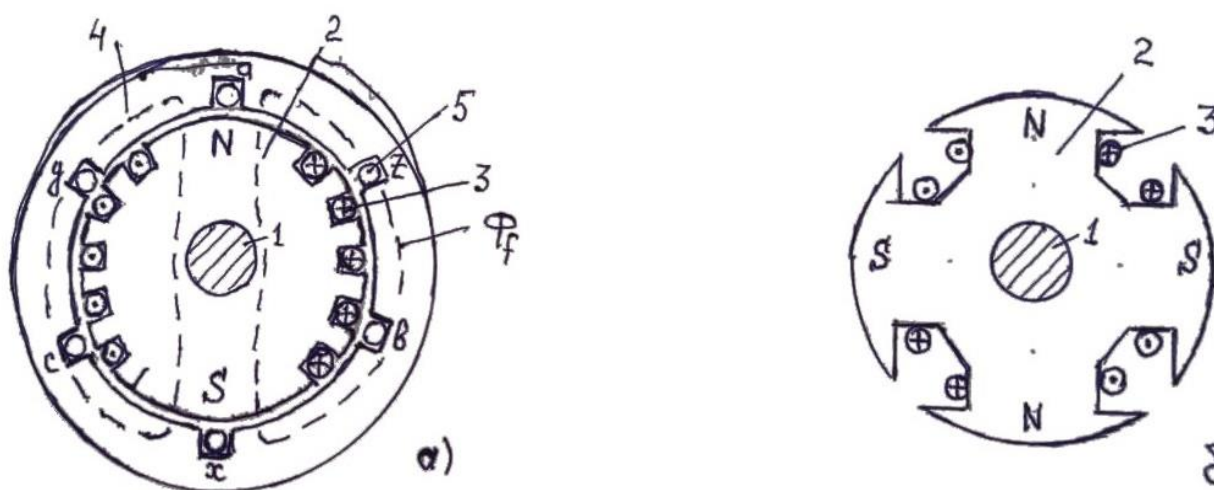
табылады – бұл **ротор**. Синхронды машиналарда якорь қозғалмайды және ол **статор** деп аталады.

Якорь айнымалы магниттік ағын әсеріне ұшырайды. Оның ферромагниттік өзекшесінде күйінды токтар индуктивтелінеді. Олардан болатын шығындады азайту үшін якорь өзекшесін электротехникалық болат жапырақшаларымен толтырады. Машинаның айналатын және қозғалмайтын бөлшектері бір-бірінен ауа саңылауы арқылы бөлінген. Якорьге қарсы бөлшекте **қоздыру орамы** орналастырылған. Аз қуатты машиналарда осы мақсатқа кейде тұрақты магнитті қолданады.

7.2. Синхрондық генератордың құрылысы және жұмыс істеу принципі

Синхрондық машинада тұрақты токпен қоздырылатын полюстер айналатын роторда орналасады ал, айнымалы ток орамасы машинаның қозғалмайтын статорда жатады.

Электр жүйелердің белгілі жиілігі ($f = 50\text{Гц}$) синхрондық машинаның айналу жылдамдығын жұп полюстер саңы берілген кезде анықтайды. Егер де қуаты үлкен машинаның жұп саны $p = 1$ және $p = 2$ болса, онда (6.7) формула бойынша айналу жылдамдығы $n = 3000 \frac{\text{ай}}{\text{мин}}$ және $n = 1500 \frac{\text{ай}}{\text{мин}}$ болады, яғни мұндай үлкен қуатты электр машиналардың айналу жылдамдығы да өте үлкен болады. Сондықтан ротордың механикалық беріктігін қамтамасыз ету үшін және қоздыру орамасын мықтап бекіту үшін оны ротордың үстіңгі бетіне біркелкі етіп бөліп тарату қажет болады, сол себептен ротордың орамасы **айқындалмаған полюсте** жасалады (сур. 7.1а). Синхрондық генераторларды айналдыру үшін бу және гидравликалық турбиналармен жалғастырады. Біріншісі – **турбогенератор**, ал екіншісі – **гидрогенератор** деп аталады.



Сур. 7.1. Айқын емес (а) және айқын полюсті (б) ротордың көлденең бөлінуі: 1– білік (вал), 2– полюс, 3– қоздыру орамы, 4– статор, 5– якорлық орама.

Бу турбинасың шапшан жүретін машиналарға жатады, сол себептен турбогенератор айқындалмаған полюсті етіп жасалады. Гидравлика турбина баяу жүретін машинаға жатады, сол себептен гидрогенератор роторы **айқындалған полюсті** (сур. 7.2б) етіп жасалады.

Шектік қуатты өсіру электромагниттік көрсеткіштерді көбейтумен және салқындату дәрежесін күшейтумен тікелей байланысты.

Қазіргі уақытта зерттеліп пайдалануға криогендік генератор берілді. Олардың оралмалары сұйық гелимен салқындатылады. Сол себептен орамалары асқан өткізгіш боп табылады. Келешекте осыған байланысты генератордың шектік қуатты оның аумағын өсірмей-ақ 10 миллион киловатқа (1000 МВт) жеткізуге болады (тоқтың шамасын өсіру арқылы).

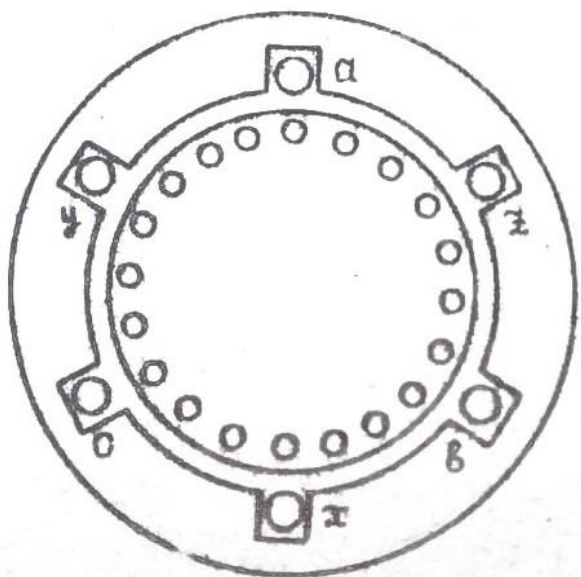
Синхрондық генератордың жұмыс істеу принципі электромагниттік индукцияның құбылысына негізделген. Генератор механикалық энергияны электр энергиясына түрлендіреді. Қоздыру орамасымен өтетін тұрақты ток i_f магниттеуші күшті тудырады және тұрақты магнит ағынды Φ_f (магнит өрісін) қоздырады. Бұл өріс ротормен бірге айналады, статордың өткізгіштерді (катушкаларды) кесіп өтіп, үш орамада үшфазалы электр қозғаушы күшті (ЭҚК) индукциялайды. Якорлық орамасын жүктемегі тіркеген кезде ЭҚК-тің әсерімен статор орамаларында және жүктеме тұратын тізбекте синусоидалы ток жүре бастайды. Бұдан бұрын көрсетілген үш фазалық тоқтан туған магнит өрістің айналу жылдамдығы (6.7 қара) қоздыру өрістің жылдамдығына (ротор айналуымен) бірдей (синхронды) боп шықты.

Сонымен, бұл электр машина турбинаның (бірінші реттік қозғалтқыш) механикалық энергиясына пайдаланып, үш фазалы тоқтың электр энергияға түрлендіреді. Сол себептен электр машинаны синхрондық генератор деп атайды.

7.3. Асинхронды қозғалтқыштың құрылысы және жұмыс істеу принципі

Асинхронды машина негізгі екі бөліктен құрылады: қозғалмайтын статордан және айналмалы ротордан. Бұлардың арасында ауа саңылау (0,2 -3 мм) бар. Оның шамасын үлкейткен кезде қуат коэффициенті $\cos\varphi$ және қозғалтқыштың айналдыру моменті азаяды.

Статордың денесі бүйірі қалың сақина тәріздес жұқа электротехникалық болат табақтарынан жиналады. Бұның ішкі орамасын жатқызу үшін арнаулы ойықтар штампталады. Статор орамасымен бірге машинның қозғалмайтын табанына бекітеледі (сур. 7.2).

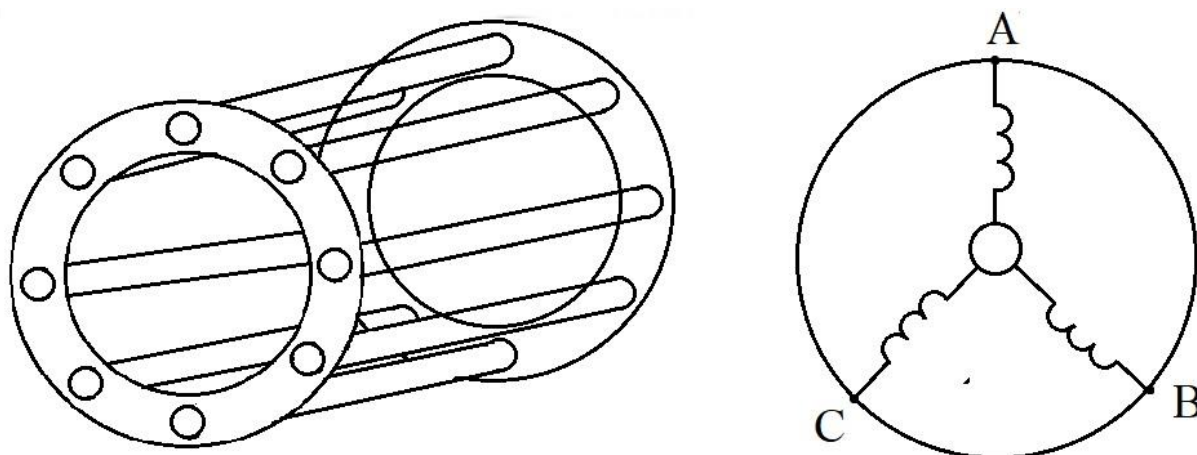


Сур. 7.2 Асинхронды машинасы

Ротордың денесі де элетротехникалық болат табақтардан жиналды да, машинаның білігіне бекітіледі. Оның құрылысына қарай асинхрондық қозғалтқыш **қысқа тұйықталған ротор** және **фазалық ротор** болып екі түрге бөлінеді.

Қысқа тұйықталған ораманы жасау үшін ротор саңылауларына алюминий құйылады. Сонан кейін алюминий стерженьдерге екі жағынан сақиналары кигізіледі. Мұндай қысқа тұйықталған ротордың орамасы, түрі ұқсас болған кейін, "тиін дөнгелегі" деп аталады (сур. 7.2а).

Фазалық ротордың орамасы статор орамасына ұқсас үш фазаға бөлінеді (сур. 7.2б) жұлдызша жалғаустырған жүріс реостаттармен байланасу үшін ораманың ұштары білікте орналысқан үш сақинаға жалғауады.



Сур. 7.3 Асинхронды машинаның роторлы орамалары:

а) қысқа тұйықталған; б) фазалық

Асинхронды қозғалтқышты іске жіберу үшін статордың орамасына үшфазалы айнымалы тоқты жібереді. Бұл ток ротор мен статордың арасындағы ауа саңылауында тұрақты жылдамдықпен n_1 (6.7 қара) айналатын магнит өрісін туғызады. Магнит өрісінің күш сызықтары машинаның орамаларын кесіп өткенде орамада ток жүре бастайды.

Ораманың өткізгіштеріндегі ток пен статордың айнымалы магнит өрісінің арасындағы өзара әрекеттесудің, арқасында механикалық күш $F[N]$ пайда болады. Оның бағыты "сол қол" ережесі бойынша анықталады. Егер механикалық күшті F ротордың білігімен өткізгіштің осьтік сызықтары арақашықтығына (R) көбейтсек, онда **айналдырушы моментті $M[N \cdot m]$** табамыз:

$$M = F \cdot R \quad (7.1)$$

Ротордағы өткізгіштердің саны көп болады да, сол себептен қосында айналдырушы электромагниттік момент айналдырушы моменттердің қосындысына тең. Айналдырушы моменттің әсерімен қозғалтқыштың роторы айналмалы магнит өрісінің айналу жағына айналады.

Егер ротордың айналу жылдамдығы n статор туғызған магнит өрісінің жылдамдығына n_1 -ге тең болса, ротор орамының өткізгіштер статордың айналыпатқан өріс бойынша жылжымайды да, электромагниттік моменті нөлге тең болатынеді. Сонымен қозғалтқыштың роторы статор өрісінің қалып айналу керек.

Ротордың статор айналушы магнит өрісінен артта қалу дәрежесі **сырғанау** (тайғанау) s арқылы сипатталады. Сырғанау s шамасы n_1 мен n айырымының статор өріс жиілігіне қарағанда салыстырмалы мәнімен анықталады:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (7.2)$$

бұдан

$$n = (1 - s) \cdot n_1 \quad (7.3)$$

Сырғанау s тең емес 0 (n тең емес n_1) болғанда ротор мен магнит өрісі бірге айнамайды. Сол себептен электр машинаны **асинхронды машина** деп атайды. Бұл машинада ротордың орамасында индукцияланған E_2 ЭҚК-інің тайғанау жиілігі мынадай:

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (7.3)$$

E_2 ЭҚК-тен түйықталған роторда туған f_2 жиілігімен айнымалы токтары ротор магнит өрісін жаратады. Бұл өріс ротор бойынша $s \cdot n_1$ жылдамдықпен айналады және жылжымайтын статор бойынша жылдамдығы тең:

$$n + s \cdot n_1 = (1 - s) \cdot n_1 + s n_1 = n_1 \quad (7.4)$$

Сонымен статор мен ротор магниттік өрістері бір жылдамдықпен айналып, біріне-бірі қарсы жылжымайды. Айналмалы өріс ротор токтарымен өзара әрекет жасап тұрақты **электромагниттік моментті** туғызады, асинхронды

момент деп атайтын. Қозғалтқыш ережеде асинхронды машинаның сырғанауы өзгертін диапазоны $0 < s < 1$.

Лекцияны меңгеруге арналған сұрақтар

1. Синхронды генератордың құрылысы.
2. Синхронды қозғалтқыштың құрылысы.
3. Синхронды генератордың жұмыс істеу принципі.
4. Қысқа тұйықталған асинхронды қозғалтқыштың құрылысы.
5. Фазалық роторлы асинхронды қозғалтқыштың құрылысы.
6. Асинхронды қозғалтқыштың моментімен сырғанау.
7. Асинхронды генератордың жұмыс істеу принципі.
8. Электр машиналардың классификациясы.
9. Үшфазалы машинаның айнымалы ток орамының магниттеуш күші.
10. Айнымалы ток машиналарының айналмалы магнит өрісі.
11. Асинхронды машинаның құрылысы.
12. Асинхронды генератордың жұмыс істеу принципі.
13. Асинхронды қозғалтқыштың жұмыс істеу принципі.
14. Синхронды генератордың құрылысы.
15. Синхронды қозғалтқыштың құрылысы.
16. Синхронды генератордың жұмыс істеу принципі.

Негізгі әдебиеттер тізімі

1. Жумагулов Қ.Қ., Шидеров М., Гали К.О. Электр машинасы. – Алматы: АЭЖБИ, 2008. – 24-27, 46-47 б.
2. Задания для программированного изучения раздела "Общие вопросы теории" по курсу "Электрические машины". – Караганда, 1997. – с. 10-14, 19-31.