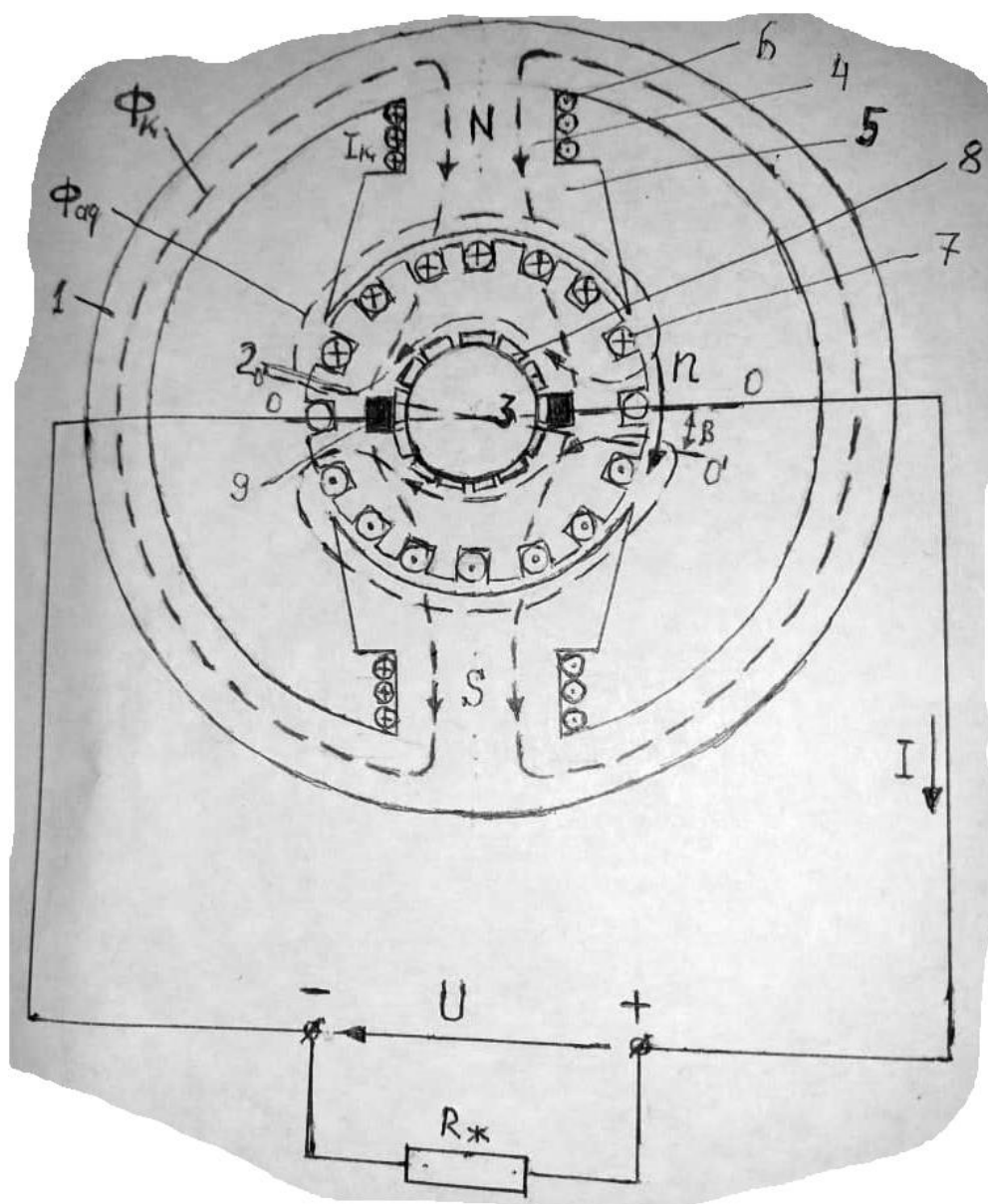


Лекция 12. Тұрақты ток машиналары, жалпы сұрақтар

12.1. Тұрақты ток машинасының құрылысы

Тұрақты ток машиналар, басқа (айнымалы ток) электр машиналары сияқты, қозғалмайтын статордан 1 және соның ішінде айналатын ротордан 2 құралған (сур. 12.1).



Сур. 12.1. Тұрақты ток машинасының көлденең тілігі

Статордың арқауы болаттан құйылады. Арқауға бір-біріне қарама-қарсы магнит полюстер 4 құрылады. Полюстер полюс ұштарымен 5 бірге жалпақболатты тілігілерден теріледі (жуандығы 0,5-1,5 мм), құйынды токтарды және магнит гистерезис шығындарың азайту үшін. Мыстан жасалған қоздыру орама 6 полюстерге орналастырады.

Ротордың өзекшесі жуандығы 0,5 мм штампталған электротехникалық болат табақтардан жиналады, құйынды токтарды азайту үшін. Якорь

ораманы 7 орналастыру үшін табақтардың шеңбері бойынша тесіктер жасалады. Оқшауланған бір біреуінен табақтарды ойықтарды тексеріп пакетке жинайды. Дайын пакетті болаттық білекке 3 отырғызады.

Якорь орамасын оқшауланған мыс сымынан жасайды. Ораманың бірнеше орамдары секцияға бірлестіреді. Секцияның басы мен шегі бөлек жуан мыстан жасалған тіліктерге дәнекерленеді (жапсырады). Бұл тіліктерді коллекторлық тіліктер 8 деп аталады. Оқшауланған бір біреуінен коллекторлық тіліктер білікке престоуленеді. Осылай мыстан жасалған цилиндрді коллектер деп аталады. Коллектордың үстінен саны жұп көмірмен графиттен жасалған щеткалар 9 жабыстырылады. Қозғалмайтын щеткалар арқылы айналып жүрген якорь орамасы сыртқы қысқыштармен байланысты.

12.2. Тұрақты ток генератордың жұмыс істеу принципі

Генератор жұмыс тәртібінде электр машинасының роторы жетекті қозғалтқыш пен тұрақты $n \left[\frac{\text{айн}}{\text{мин}} \right]$ жылдамдықпен айнала бастайды. Полюстердегі қоздыру орамадаға 6 тұрақты ток I_k беріледі. Бұл ток Φ_k қоздыру ағынды тудырады, оның күш сызықтарының бағыты бұрандама ережесімен анықталады.

Электр магниттік индукция құбылысы бойынша қоздыру өрісінің күш сызықтарды айналып жатқан якорь ораманың өткізгіштері қиып өткенде, орамада ЭҚК индукцияланады. Электр магниттік индукция заң бойынша ЭҚК-інің мәні:

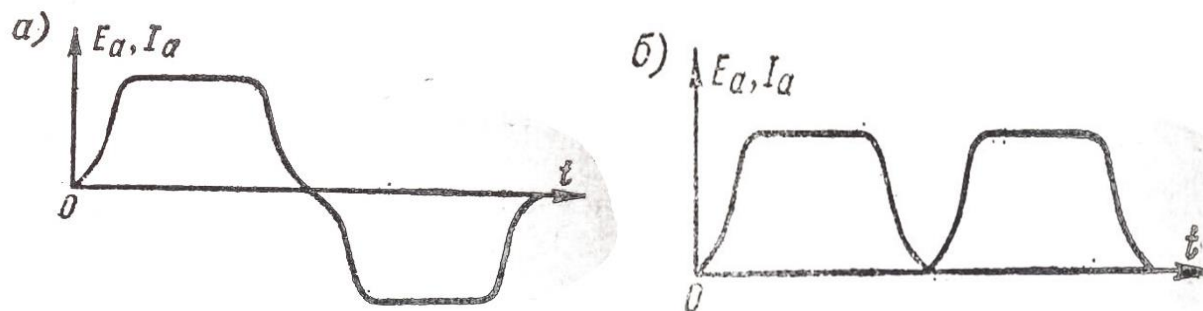
$$e = B_\delta \cdot l_a \cdot v, \quad (12.1)$$

мұнда B_δ [Тл] – ауа саңылаундағы магнит өрісінің индукциясы;

l_a [м] – өткізгіштің ұзындығы;

$v \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$ – өткізгіштің жылдамдығы.

ЭҚК-інің бағыты оң қол ережесімен табылады. Олай болса ротор бір толық айналғанда якорь орамасында индукцияланған ЭҚК жарты айналыстан бағыты өзгереді (сур. 12.2).



Сур. 12.2. Якорь орамасындағы (а) және сыртқы тізбектегі (б) ЭҚК және ток қисықтары

Якорь ораманың орамалары бір-бірімен тізбектеп байланысты болған кейін ораманың ЭҚК, бір-біреуіне қосылып, жалпы якорлық ЭҚК E_a ротор жарты шеңберін өткенде ЭҚК-і бағытын қарама-қарсысына айырбастайды. Бірақ, щеткалармен коллектор электромеханик түзеткіш ретінде 2-ші бөлмеленетін ЭҚК "-" таңбаларын "+" аударады. Сонымен, екі щетканың арасында тұрақты ЭҚК-тің мәні:

$$E_a = c_e \cdot \Phi_\delta \cdot n, \quad (12.2)$$

мұнда $c_e = \frac{pN}{60\alpha}$ – машинаның тұрақты шамасы;

p – полюстердің жұп саны;

N – якорлық орамалардың жалпы саны;

α – параллель тармақтардың жұп саны;

Φ_δ – ауа саңылаундағы магнит ағыны;

$n \left[\frac{\text{айн}}{\text{мин}} \right]$ – ротордың жылдамдығы.

Енді якорь қысқыштарына (щеткалардың арасына) электрлік жүк қосылса, онда сырты тізбекпен тұрақты ток өтеді. Сонымен электр машина жетекші қозғалтқыштан алған механикалық энергиясың тұрақты ток электр энергияға түрлендіреді. Бұл машина тұрақты ток генератор болып істейді.

12.3. Тұрақты ток қозғалтқыштың жұмыс істеу принципі

Қозғалтқыш жұмыс тәртібінде машинаның негізгі полюстерінде қоздыру орамаға (6) Φ_k қоздыру ағынды тудыратын тұрақты ток I_k беріледі (генератордың жұмыс тәртібі сияқты). Якорлық орама коллектор мен щеткаларының арнайымен тұрақты кернеу көзіне қосылады. Сондықтан якорь орамасындағы ток I_a (7) аққан кезде әрбір өткізгішке электромагниттік күш әрекет етеді:

$$F_{эм} = B_\delta \cdot l_a \cdot I_a, \quad (12.3)$$

Күштің бағыты сол қол ережемен табылады. Ротор шеңбері бойымен бірдей бағытқа ие якорлық орамасының өткізгіштерінің электромагниттік күштері (сағат тілімен немесе сағат тіліне қарсы) бірге машинаның айналдушы электромагниттік моментін жасайды. Осы моменттің өрнек келесі формулаға келтірілетінін көрсетуге болады:

$$M_{эм} = c_M \cdot \Phi_\delta \cdot I_a, \quad (12.4)$$

мұнда $c_M = \frac{pN}{2\pi\alpha}$ – моменттің тұрақты шамасы.

Егерде (12.2)-ні пайдалы (12.4)-не қойсақ, онда моменттің тағы бір түрін табамыз:

$$M_{эм} = \left(\frac{60}{2\pi n}\right) E_a I_a = 9,55 \frac{P_{эм}}{n}, \quad (12.5)$$

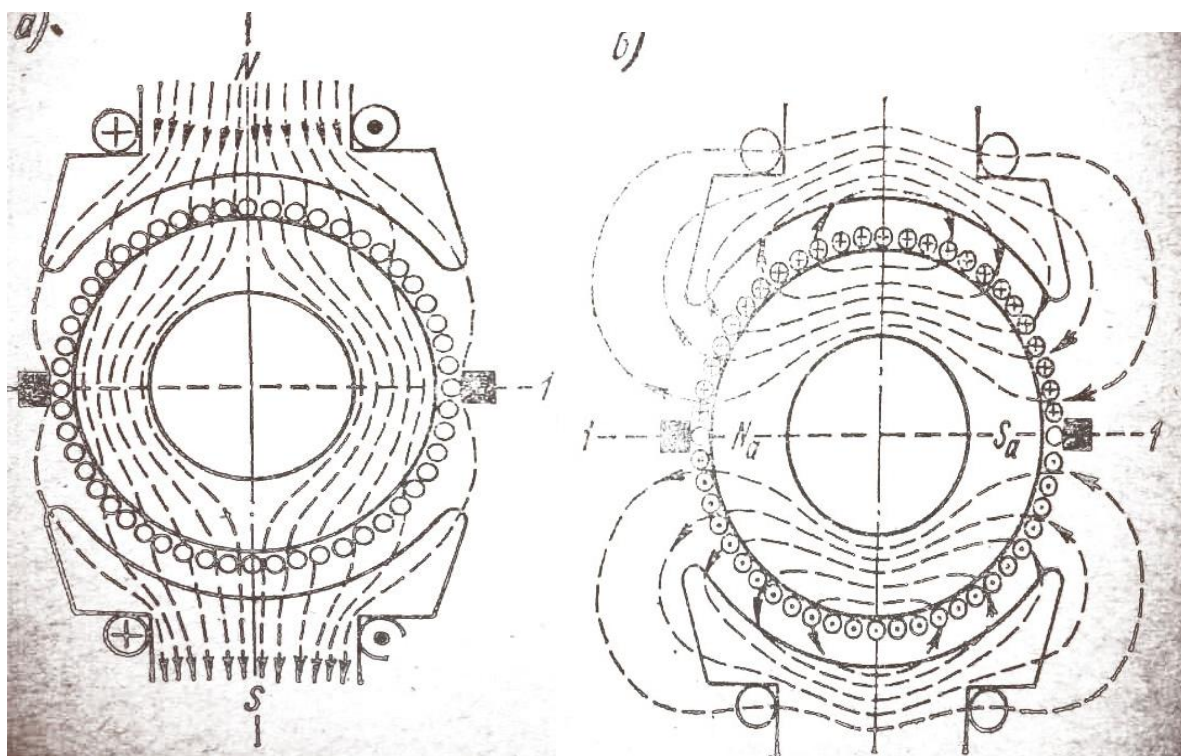
мұнда $P_{эм} = E_a I_a$ – тұрақты ток машинаның электромагниттік қуаты.

Қозғалтқыштың білікпен байланысты механикалық жүктеме (генератор, жетектер) бар. Бұған ротордың салмағы және шығындары қосылғанла білекке тежеуіш момент қосылады M_T . Егер электромагниттік моменті тежеуіш моменттен асып алса ($M_{эм} > M_T$), машинаның роторы орнынан қозғалады ($n > 0$). Якордың жылдамдығы өсуімен, электромагниттік моменті азаяды. Электромагниттік моменту азайып тежеуіш моментке жеткенде, ротор тұрақты жылдамдықпен айналатын болады ($M_{эм} = M_T, n = \text{const}$).

Сонымен, тұрақты ток машина сыртынан алған электр энергияны механикалық энергияға түрлендіреді қозғалтқыш ретінде.

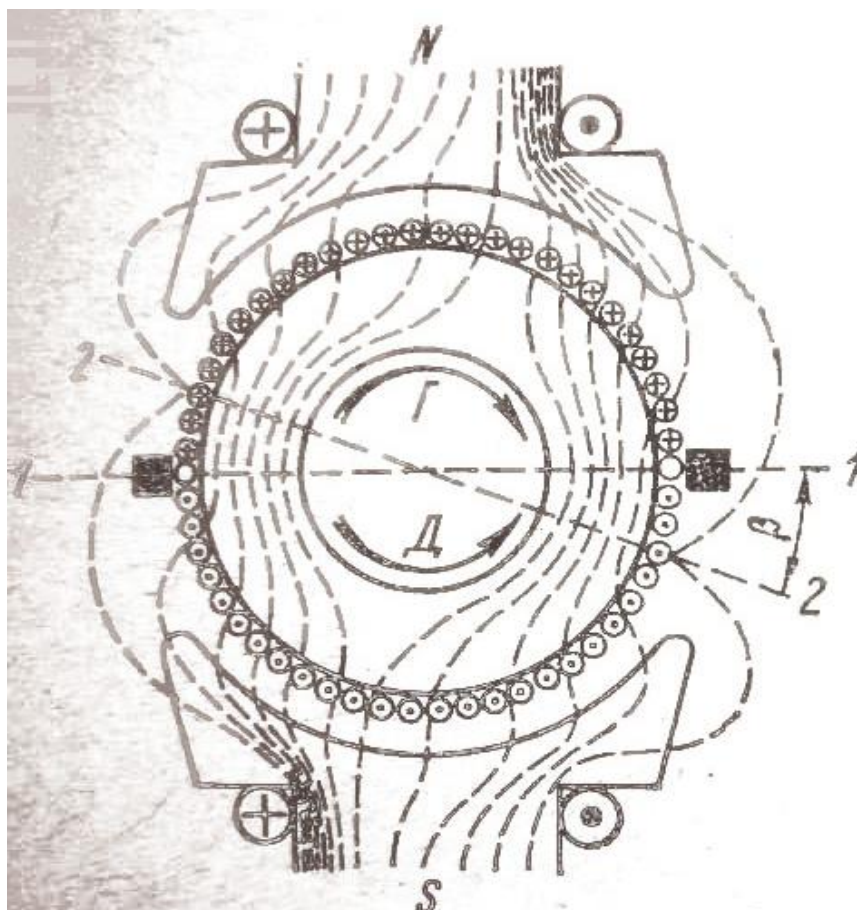
12.4. Якорь реакциясы

Машина жүктелген кезде оның якорь орамасымен ток ағады да, сол себептен якордың МҚК-і F_{aq} пайда болады. Машинаның негізгі магниттік өрісіне якордың МҚК-інің әсері якорь реакциясы деп аталады. Егер машинаның магниттік тізбегі қаныққан болса оның қоздыру ораманың F_k МҚК-і және якорь ораманың F_{aq} МҚК-і ауа саңылауна магниттік ағындарды Φ_k және Φ_{aq} (сур. 2.3) өткізуге жұмсалады.



Сур. 12.3. Индуктор (а) және якорь (б) бөлек магнит өрістері

12.3 суретте щеткалардың арасында өтетін сызықты 1–1 **геометриалық бейтарап сызығы** деп аталады. Бұл сызық қоздыру өрісінің магниттік сызықтарына перпендикуляр болса (сур. 12.3а), якорлық токтардың өрісінің сызықтарымен параллель болып көлденең жатыр (сур. 12.3б). Сол себептен бұл өрістің ағынды **көлденең якорь реакцияның магнит ағыны Φ_{aq}** деп атайды. Екі өріс қосылып, машинаның жалпы магнит өрісті жасайды (сур. 12.4).



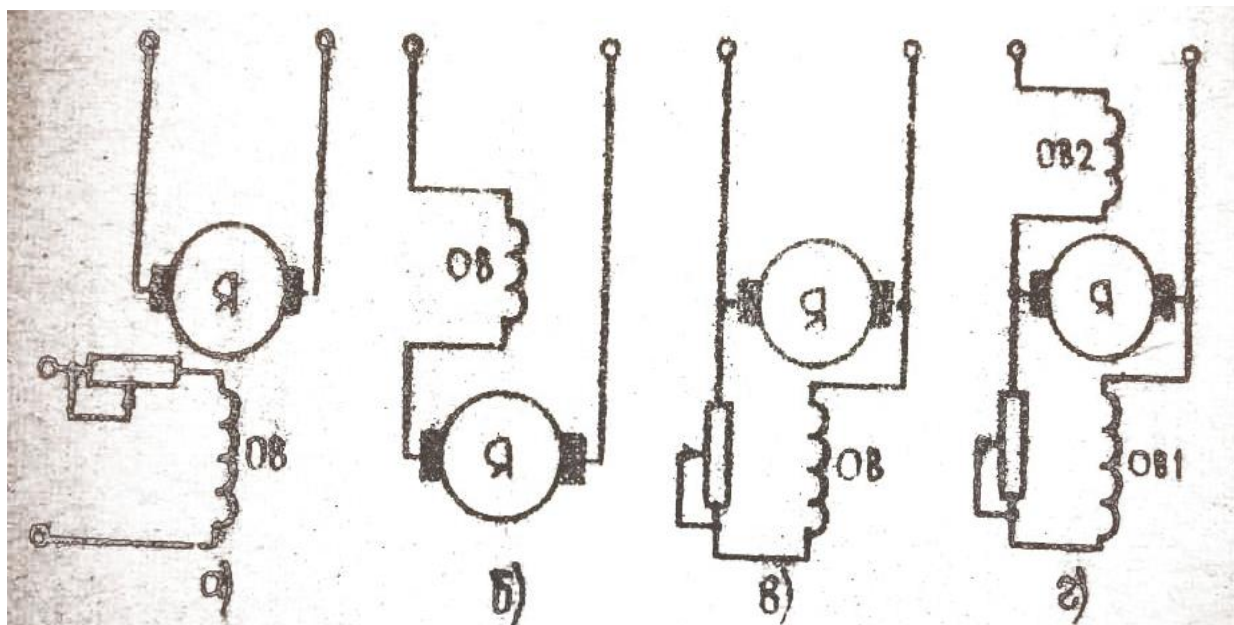
Сур. 12.4. Щеткаларды геометриялық бейтарап күйге келтіргенде пайда болатын магнит өрісі

Полюстің бір шетінде якорь реакция ағынының магниттік сызықтары қоздыру ағынының магниттік сызықтарымен бағыттары сәйкес болады (12.4-сурет полюстің оң шетінде), негізгі магниттік өрісін күшейтіп, ал басқа шетінде (12.4-сурет полюстің сол шеті) бұл сызықтардың бағыттары бір-біріне қарсы болады, негізгі магниттік өрісін әлсіретіп.

Бұл жағдайда **физикалық нейтраль 2–2** (якордың индукциясы нөлге тең нүктелерді қосатын сызық) геометриялық нейтраль 1–1-ге қарағанда кейбір бұрыш β -ға бұрылады. Генераторда физикалық нейтраль якорь айналу жағына бұралады, ал қозғалтқышта айналу жағына кері бұрылады. Сонымен якорь реакциясы нәтежелі ағынды азайтады.

12.5. Тұрақты ток машиналарын қоздыру әдістері

Тұрақты ток машиналардың қоздыру орамасын якорь орамасына қарай мұндай әдістерімен қосуға болады (сур. 12.5):



Сур. 12.5. Тұрақты ток машиналарын қоздыру әдісі

- а) Тәуелсіз қоздыру – машинаның қоздыру орамасы сыртқы ЕҚК-ке қосылады (қоздырушы генератор, айнымалы тоқты түзеткіш, аккумулятор мен батареялар);
- б) Тізбекті қоздыру – қоздыру орамасы якорь орамаға тізбекті қосылады;
- в) Параллель қоздыру – қоздыру орамасы якорь орамаға параллель қосылады;
- г) Аралас қоздыру – бірнеше қоздыру орамасы якорь орамаға параллель қосылады, екінші қоздыру орамасына тізбекті қосылады.

Бұл суретте I_a – якорь ораманың тогы; I_f – қоздыру тогы; I – жүктеме тогы.

Әдетте қоздыру ток үлкен емес тәуелсіз не параллель қосылған қоздыру орамада (1-3%-не тең якорьдың номинал тоғының).

Лекция 13. Тұрақты ток машиналардың энергетикалық диаграмма мен генератордың сипаттамалары

13.1. Энергетикалық диаграммалар

Тұрақты ток машиналарға анализ жасағанда электр магниттік моменты мен ЭҚК формулары негізгі арақатынас боп қызмет етеді:

$$M_{эм} = c_M \cdot \Phi_\delta \cdot I_a, \quad (12.4)$$

$$E_a = c_M \cdot \Phi_\delta \cdot \omega_{мех}, \quad (13.1)$$

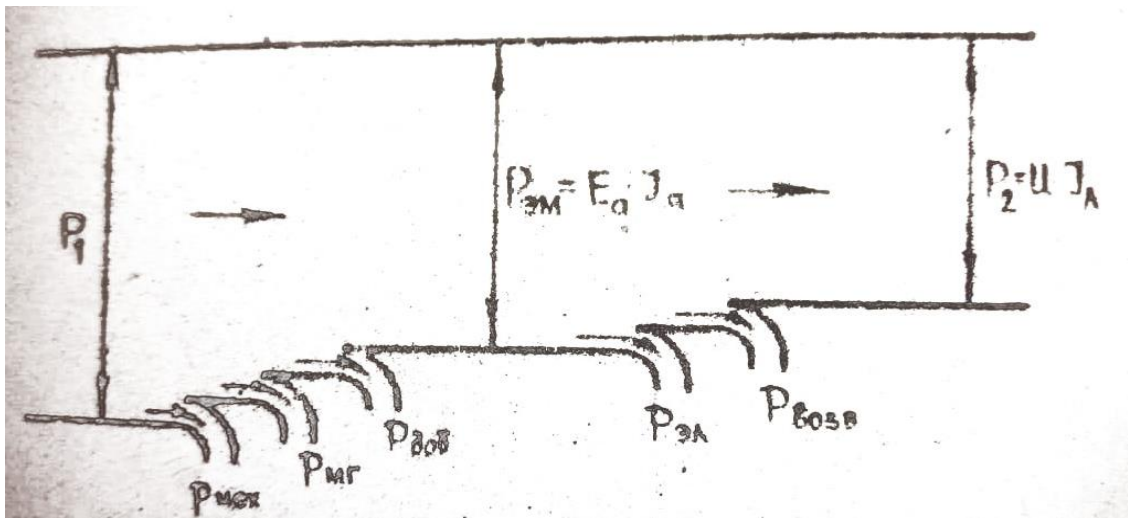
мұнда $\omega_{мех} = \frac{\omega}{p} \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right]$ – якордың айналу механикалық жылдамдығы.

Якордың ішкі электр қуаты $E_a \cdot I_a$ электромагниттік қуатына $M_{эм} \cdot \omega_{мех}$ тең:

$$E_a \cdot I_a = M_{эм} \cdot \omega_{мех} = P_{эм}. \quad (13.2)$$

Бұл теңдеу электр қуатты механикалық қуатқа түрлендіруіне математика жағынан көрсетеді.

Электр машинаның активті қуат балансының энергетикалық диаграммамен көрсетуге ыңғайлы. Тұрақты ток генератордың білігіне алғашқы козғалтқышпен жеткізген механикалық қуат P_1 механикалық $p_{мех}$, магниттік $p_{мг}$ және $p_{доп}$ шығындарды алыған кейін электромагниттік қуатына $P_{эм}$ түрлендіреді (сур. 13.1).



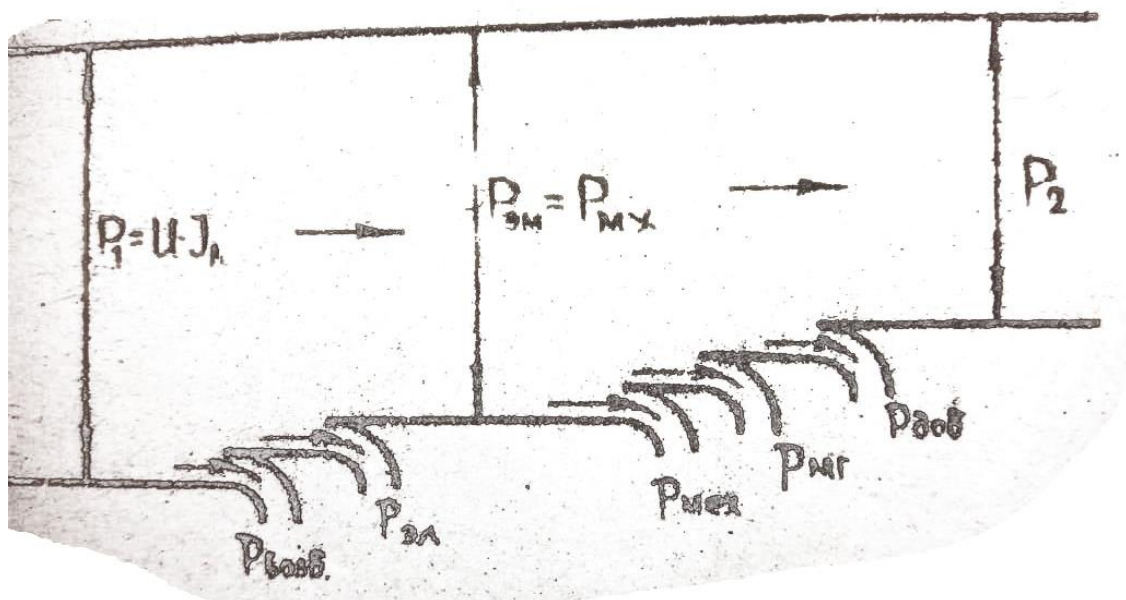
Сур. 13.1. Тұрақты ток генератордың энергетикалық диаграммасы

Механикалық шығындар $p_{мех}$ щеткалардың қажалғандағы, айналмалы тіректерде (подшипниктерде) қажалғандағы және желдетуге жұмсалатын шығындардың қосындысына тең. **Магниттік шығындар** $p_{мг}$ магнит гистерезистің және құйынды токтардың шығындарының қосындысына тең.

Машина жүктелегенде **қосымша шығындары** $p_{доп}$ пайда болады. Оның ішінде ораманың өткізгіштерде және сырғушы түйіспенде токтын біркелкі емес таратылғанынаң шығындары және якорь реакция бойынша магнит өрісінің таратылғанынан бұрмалай өзекшедегі туатын шығындар.

Электромагниттік қуат $P_{эм}$ жарым-жартылай якорь тізбегіндегі кедергіде болатын **электрлік шығындарына** $p_{эл}$ және **қоздыру орамадағы шығындарына** $p_{воз}$ таратылады. Бұл шығындардан қалған электромагниттік қуаты жүктемеге жетіп пайдалы қуат P_2 боп шығады.

Қозғалтқыш тәртібінде электр қуаты $P_1 = U \cdot I$ тұрақты ток көзінен алынады. Қоздыру $p_{воз}$ және электрлік $p_{эл}$ шығындарынан азайғанынан кейін қуат машинаның толық механикалық қуатына түрлендіреді (сур. 13.2).



Сур. 13.2. Тұрақты ток қозғалтқыштың энергетикалық диаграммасы

Бұл қуат механикалық $p_{мех}$, магниттік $p_{мг}$ және қосымша $p_{доп}$ шығындарды алғаннан кейін қозғалтқыштың біліктен алатын пайдалы механикалық қуат P_2 деп қалады.

Тұрақты ток машинаның қосынды шығындары тең:

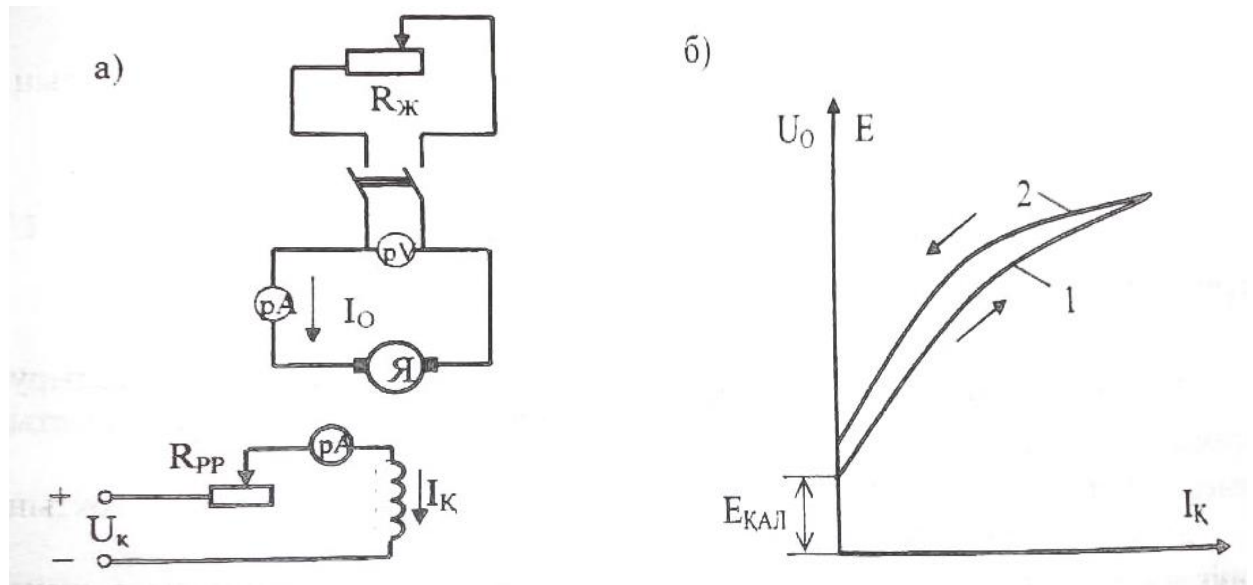
$$\sum P = p_{мг} + p_{мех} + p_{воз} + p_{доп} + p_{эл} \quad (13.3)$$

Машинаның пайдалы әрекет коэффициенті (ПӘК) дегеніміз жүктемеге жеткізген қуат P_2 машинаға келіп түскен қуат P_1 -ге қатынасы:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_1} \quad (13.4)$$

13.2. Генератордың бос жүріс мінездемесі

ЭҚК-тің қоздыру токтан тәуелділігі, жүктемеге тізбегі ажыратылып тұрғанда және ротор жылдамдығы тұрақты болғанда ($n = \text{const}$, $I = 0$), **бос жүріс сипаттама** $E_a = f(I_K)$ деп аталады.



Сур.13.3. Тәуелсіз қоздырылатын генератордың принципиялды сулбасы (а) және бос жүріс мінездемесі (б)

Генератордың бос жүріс ережесінде (жүктеме тізбегі ажыратылып тұрғанда) якорь қысқыштарында U_0 кернеуі ЭҚК-ке тең ($U_0 = E_a$). Якорьдың айналу жиілігі тұрақты болғандықтан, кернеу тек Φ_δ магниттік ағынына тәуелді, яғни бұл ағынды туғызатын қоздыру ток I_K -ға тәуелді. Сол себептен мінездеменің $U = f(I_K)$ магниттік мінездеме сияқты $\Phi_\delta = f(I_K)$ (сур. 13.3б).

Бос жүріс мінездемені эксперименттік түсіруге болады (сур.13.3б). Бұл үшін алдымен қоздыру ток арқылы U_0 кернеудің мөлшерін $1,1 U_{\text{ном}}$ -ға тең етіп орнатады, содан кейін қоздыру токты нөлге дейін төмендетеді де, қайтадан бұрынғы мөлшеріне жеткізеді. Мінездемелер бір нүктеден шығатын ұлғаймалы қисық сызық 1-болып шығады. Қоздыру ток I_K азайғанда ЕҚК E_a қисық сызық 2-болып азаяды магниттік гистерезис бойынша. Сызықтар арасындағы айырмашылық гистерезис құбылысы болғандықтан пайда болады. Ток $I_K = 0$ болған кезде $U_{\text{ном}}$ -ды 2-4 % тең қалдық магнетизм индукциялайтын $E_{\text{қал}}$ ЭҚК якорь орамасында қалады.

13.3. Генератордың сыртқы сипаттамалары

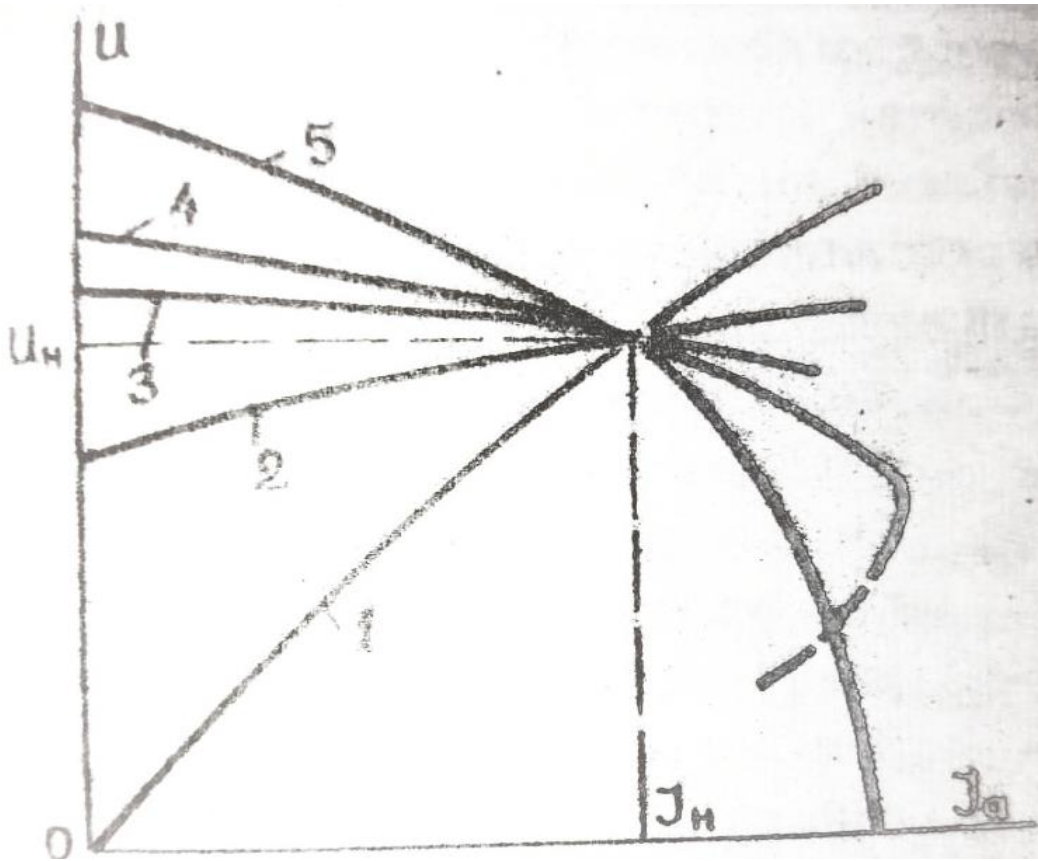
Якорь қысқыштарында кернеу U жүктеме токтан I тәуелділігі, қоздыру тізбектің кедергісін және айналу жиілікті тұрақты ұстағанда ($R_K + R_p = \text{const}$, $n = \text{const}$), **сыртқы мінездесі** $U = f(I)$ деп атайды.

Якорь тізбектің кернеу теңдеуі былай жазылады:

$$U = E_a - R_a I_a \quad (13.5)$$

мұнда E_a, R_a, I_a – якордың ЕҚК, кедергісі және тогы.

Сыртқы мінездесінің түрі машинаның қоздыру әдісіне байланысты (сур. 13.4).



Сур. 13.4. Тұрақты ток генератордың сыртқы сипаттамалары

Жүктеме ток $I = I_a$ өскенде тәуелсіз қоздырылатын генератордың кернеуі азаяды (13.4 суретінде 3-ші қисық сызық) екі себебімен:

- 1) жүктеме ток өсуімен (13.5) теңдеуде кернеудің түсуі $R_a \cdot I_a$ өседі;
- 2) якорь тогі өсуімен магнитсіз дендіру әрекеті күшейеді де, магниттік ағыны Φ_δ және ЕҚК ($E_a = c_e \cdot \Phi_\delta \cdot n$) азайа бастайды.

Параллель қоздырылған генераторда жүктеме ток I өскенде кернеу азаятын екі себебіне енді біреу қосылады:

- 3) кернеу азайғанымен Ом заңы бойынша қоздыратын тогы ($I_k = \frac{U}{R_k + R_p}$) азайады.

Онымен бірге магниттік ағыны Φ_δ және якорь ораманың ЕҚК E_a азаяды. Сонымен параллель қоздырылған генератордың сыртқы мінездесінің 4-ші қисық сызығы 3-ші қисық сызығынан құламалы боп көрінеді (сур. 13.4).

Тізбекті қоздырылған генераторда жүктемеден, якорь және қоздыру орамаларда бірақ ток өтеді $I = I_a = I_k$. Сол себептен сыртқы мінездесі бос жүріс мінездесімен бірдей болады (1-ші қисық). Аралас қоздырылатын генераторда тізбекті қоздыру ораманың магниттік ағыны якорь реакция магниттік ағынына қарсы бағытталады. Сол себептен жүктеме ток өскенде ауа саңылау ағыны да өсу бастайды және

кернеудің өзгерісі аз болады (2-ші қисық сызығы). Егер тізбекті қоздыру ораманың магниттік ағыны якорь реакция магниттік ағынына сәйкес бағытталынса, онда кернеу ең тік қисық бойымен 5 төмендейді.

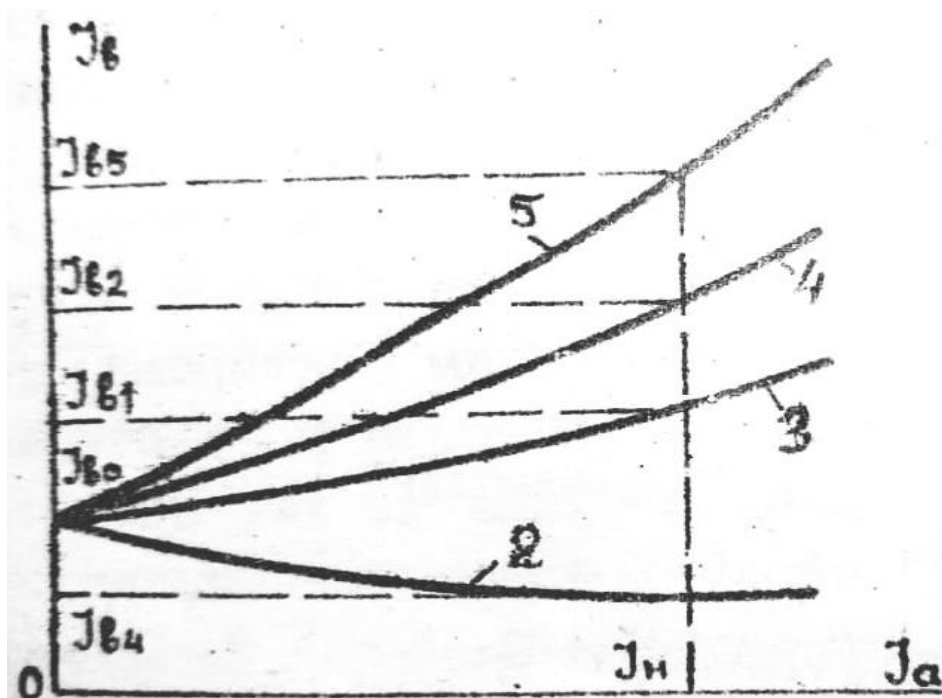
13.4. Генератордың реттеу сипаттамалары

Қоздыру токтың I_k жүктеме токтан I тәуелділігі, генератордың айналу жиілікті және кернеуді тұрақты ұстағанда ($n=const$, $U=const$), **реттеу мінездесі** $I_k = f(I)$ деп аталады.

(13.5) формуладан ЕҚК тең:

$$E_a = U + R_a I_a. \quad (13.6)$$

Реттеу мінездесінің түрі машинаның қоздыру әдісіне байланысты (сур. 13.5).



Сур. 13.5. Тұрақты ток генератордың реттеу сипаттамалары

Жүктеме ток I өскенде ЕҚК E_a үлкейеді. Олай болса ауа саңылауда магниттік ағынды Φ_δ қоздыру токпен көтеру керек.

Реттеу сипаттамаларының түрі сыртқы мінездерімен анықталады (сур. 13.4). Сонымен 13.5-ші суретте тәуелсіз (3-ші қисық сызық), параллель (4-ші) және аралас (2-ші мен 5-ші) қоздырылатын генераторлардың реттеу мінездемелері көрсетілді. Реттеу сипаттамаларының сызықтық еместігі қоздыру тогы реттелген кезде магниттік тізбектің қанықтылығының өзгеруіне байланысты.

13.5. Параллельді қоздыру генераторының өздігінен қозуы

Өздігінен қозу – бұл генератор қысқыштарындағы кернеудің қар көшкініне ұқсас және стихиялық өсу процесі, бұл қоздыру орамасын якорьмен параллель қосқанда пайда болады. Өзін-өзі қоздыру үшін қажетті (бірақ жеткіліксіз) шарт – бұл машинаның магниттік тізбегіндегі қалдық магнетизм ағынының болуы, бұл әдетте номиналдың 2-3% құрайды. Бұл ағын айналмалы якордың орамында кішкентай ЭҚК тудырады, якорь мен қоздыру орамалардың қысқыштарда кернеуді көтеріп. Өскен кернеу арқылы қоздыру орамында аз бастапқы ток ағып кетеді.

Егер осы токпен құрылған полюстер ағыны бағытта қалдық ағынымен сәйкес келсе, онда пайда болатын магнит ағыны және, демек, якорь ЭҚК-і артады. Бұл, өз кезегінде, қоздыру тогының жоғарылауын тудырады және т.с.с. Процесс якорь ЭҚК-іне дейін және генератор қысқыштарындағы кернеу тұрақты күйге жеткенше жалғасады. Егер қоздыру орамасы якорьмен ол жасаған ағын магниттіліктің қалдық ағынына қарсы бағытталған етіп қосылса, өздігінен қозу пайда болмайды. Сондықтан қоздыру орамының ұштары керісінше болуы керек.

Өздігінен қозу процесі қоздыру орамасының кедергісі белгілі бір сындық кедергіден аз болған жағдайда ғана жүреді ($R_k < R_{k\text{кр}}$). Генератордың бос жүріс сипаттамасын қолдану арқылы критикалық қоздыру кедергісінің мәнін анықтауға болады. Басталған өзін-өзі қоздыру процесі генератордың магниттік тізбегінің қанықтылығына байланысты соңғысының бейсызықтығына байланысты бос сипаттаманың белгілі бір кезеңінде тоқтатылады.

Лекцияны меңгеруге арналған сұрақтар

1. Тұрақты ток генератордың энергетикалық диаграммасы
2. Тұрақты ток генератордың реттеу сипаттамалары
3. Тұрақты ток генератордың сыртқы сипаттамалары
4. Тәуелсіз қоздырылатын генератордың принципіалды сұлбасы және бос жүріс мінездемесі
5. Тұрақты ток қозғалтқыштың энергетикалық диаграммасы
6. Генератордың бос жүріс мінездемесі
7. Тұрақты ток машинасының көлденең тілігі
8. Тұрақты ток машиналарын қоздыру әдісі
9. Синхронды қозғалтқыштың U-тәрізді қисықтары
10. Щеткаларды геометриялық бейтарап күйге келтіргенде пайда болатын магнит өрісі
11. Индуктор және якорь бөлек магнит өрістері
12. Якорь орамасындағы және сыртқы тізбектегі ЭҚК және ток қисықтары

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.