**Коммерциялық емес
акционерлік
қоғам**

**АЛМАТЫ
ЭНЕРГЕТИКА
ЖӘНЕ
БАЙЛАНЫС
УНИВЕРСИТЕТІ**

Өнеркәсіп қондырғыларының
электржетегі және
автоматтандыру кафедрасы

ЭЛЕКТР МАШИНАЛАРЫ

5В071800 – Электр энергетикасы мамандығының студенттеріне
арналған дәрістер жинағы

Алматы 2015

ҚҰРАСТЫРҒАНДАР: Р.М. Шидерова, К.О. Гали, А.Н. Бестерекова
Электр машиналары. 5В071800 – Электр энергетикасы мамандығының студенттеріне арналған дәрістер жинағы. - Алматы: АЭжБУ, 2015. – 82 бет.

«Электр машиналары» курсы бойынша дәрістер жинағы оқу жұмыс бағдарламасына сәйкес өңделген және 5В071800 – Электр энергетикасы мамандығының бакалаврлары үшін 30 сағатқа есептелген. Машиналардың жұмыс жасау принциптері, құрылыстары және сипаттамалары толықтай келтірілген.

Дәрістер жинағы 5В071800 – Электр энергетикасы мамандығының студенттеріне арналған.

Суреттер 74, әдеб. – 15 атау.

Пікір беруші: аға оқытушы Курпенов Б.К.

«Алматы энергетика және байланыс университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамының 2015 ж. баспа жоспары бойынша басылады.

© «Алматы энергетика және байланыс университеті» КЕАҚ, 2015 ж.

Мазмұны

	Кіріспе…….	3
1 дәріс.	Қысқаша тарихы. Электр машиналары туралы жалпы……. мағлұмат……..	5
2 дәріс.	Келтірілген трансформатор……..	8
3 дәріс.	Қысқаша тұйықтау тәжірибесі. Пайдалы әсер коэффициенті. Трансформаторлардың топтары.....	13
4 дәріс.	Трансформаторлардың параллель жұмысы…….	19
5 дәріс.	Айнымалы ток машиналары теориясының ортақ сұрақтары	23
6 дәріс.	Асинхронды машинаның жұмыс істеу принціпі. Теңдеулері мен орынбасу сұлбалары……	28
7 дәріс.	Асинхронды машинаның режимдері мен қуаттары.....	33
8 дәріс.	Асинхронды машиналардың тұрақты жұмыс істеу шарты. Айналу жылдамдығы……	39
9 дәріс.	Синхронды машиналар……	44
10 дәріс.	Синхронды генератордың кернеулерінің теңдеулері. Векторлық диаграммалар. Сипаттамалар…….	49
11 дәріс.	Синхронды машиналардың параллель жұмысы……..	55
12 дәріс.	Қоздырылмаған айқындалған полюсті машина. Синхронды қозғалтқыштар және компенсаторлар.....	61
13 дәріс.	Тұрақты ток машиналары.....	66
14 дәріс.	Тұрақты ток генераторлары……..	71
15 дәріс.	Тұрақты ток қозғалтқышы…….	76
	Әдебиеттер тізімі…….	82

Кіріспе

Электр энергиясының энергияның басқа түрлерімен салыстырғанда өте үлкен артықшылығы бар: оны өте үлкен қашықтыққа жеткізуге болады, тұтынушылар арасында бөліп таратуға ыңғайлы және оны жоғары ПӘК. энергияның басқа түрлеріне түрлендіру қарапайым жолмен іске асырылады.

Электр энергиясын түрлендіру үрдісін оңай басқарып және бұл кезде түрлендірілген энергияның қажетті сипаттамаларын автоматты түрде алуға болады.

Электрлендірудің дамуы оны кеңінен пайдалануды және әртүрлі электротехникалық құралдарды дамытуды талап етеді. Бұл құралдардың негізгі түрлерінің бірі ол электр машиналары болады.

Механикалық энергияны электр энергиясына түрлендіретін машинаны, генератор деп атайды. Электр энергиясын механикалық энергияға түрлендіру қозғалтқыштар арқылы іске асырылады. Кез келген электр машинасын генератор ретінде де, қозғалтқыш ретінде де пайдалануға болады. Электр машиналары тұрақты токтың және айнымалы токтың машиналары болып бөлінеді. Айнымалы ток машиналарын бір фазалы және көп фазалы (әдетте үш фазалы) деп бөлуге болады, ал жұмыс істеу принципіне баланысты синхронды және асинхронды деп бөлінеді.

Электр машиналарына олардағы физикалық құбылыстар бірдей болатындықтан трансформаторларды да жатқызады.

Электр машиналарының дамуы электр машиналарының жұмыс істеу принципі негізделген, 1831 жылы ағылшын физигі М. Фарадей ашқан және кейін Д. Максвел дамытқан электромагниттік индукия заңынан бастау алады. 1832 жылы Э. Ленц электр машиналарының қайтымдылығын түсіндірді.

М.О. Доливо-Добровольскийдің жұмыстары айнымалы токты пайдалануға үлкен себебін тигізді. XX ғасырдың басында-ақ электр энергиясының артықшылығы және оны кеңінен пайдалануға болатындығы белгілі болды. Электр энергиясын өндіруді, түрлендіруді, трансформатциялауды, бөліп беруді және алыс қашықтыққа жеткізуді қарапайым жолмен іске асыруға болатын тамаша қасиеттері сәйкестелінді және іске асырылды.

1876 жылы П.Н. Яблочков өзі ойлап тапқан электр шырағын қоректендіру үшін трансформатор пайдаланды. Трансформаторды ойлап шығару, осы уақытқа дейін ешбір жерде қолданылмаған айнымалы токты пайдалануға қызығушылық туғызды.

Ұлы орыс ғалымы М.О. Доливо-Добровольский 1889 жылы үш фазалы айнымалы ток жүйесін ұсынды және ол бірінші үш фазалы асинхронды қозғалтқыш пен бірінші үш фазалы трансформаторды жасап шығарды, олардың негізгі құрылыстық элементтері осы уақытқа дейін қолданылуда.

.

1 Дәріс №1. Қысқаша тарихы. Электр машиналары туралы жалпы мағлұмат

Дәрістің мазмұны;

- электромагниттік индукция заңы;
- трансформатор туралы жалпы мағлұмат, жұмыс істеу принципі;
- ЭҚК әсерлік мәнінің ағынға тәуелділігі.

Дәрістің мақсаты:

- электромагниттік индукция құбылысымен танысу;
- трансформатордың жұмыс істеу принципін оқып үйрену.

Электромагниттік индукция құбылысы бойынша айнымалы магнит өрісінде тұрған өткізгіште ЭҚК индукцияланады. Егер тұрақты магнит немесе электромагнит полюстерінің магнит өрісінде (В.1 сурет) *N* мен *S* арасына өткізгіш орналастырып және қандай да бір күшпен F_1 қозғаса, онда бұл өткізгіште ЭҚК пайда болады:

$$e = Blv\sin\alpha = Blv, \qquad (1.1)$$

мұнда *B* – өткізгіш тұрған жердегі магниттік индукция;

l – өткізгіштің активті ұзындығы (сымның магнит өрісінде жатқан бөлігі);

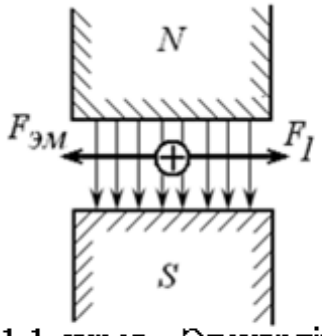
v – магнит өрісіндегі өткізгіштің қозғалу жылдамдығы;

α –максимал магнит индукциясы және өткізгіштің қозғалу жылдамдығы векторларының арасындағы бұрыш (қарастырылып отырған жағдай үшін $\alpha = \pi/2$, яғни $\sin\alpha = 1$).

Өткізгіште индукцияланатын ЭҚК бағыты оң қол ережесі бойынша анықталады.

Оң қол ережесі.

Оң қолдың алақанын оған магнит өрісінің күш сызықтары кіретіндей етіп ұстаймыз, бұл кезде жазылған бас бармақ магнит ағынына қатысты сымның қозғалу бағытын көрсетсе, онда созылған төрт саусақ ЭҚК бағытын көрсетеді.



1.1 сурет - Электрлік машинаның әсер ету принципі

Егер сымды қандайда-бір энергия қабылдағышының кедергісі арқылы тұйықтасақ, онда пайда болған тізбекте ЭҚК әсерінен *I* ток жүреді және оның бағыты өткізгіштегі ЭҚК бағытымен бағыттас болады. Өткізгіштегі ток пен полюстердегі магнит ағынының әрекеттесу нәтижесінде электромагниттік күш $F_{ЭМ}=lBI$

пайда болады, оның бағыты сол қол ережесі бойынша анықталады.

Сол қол ережесі.

Сол қолдың алақанын, магнит өрісінің күш сызықтары алақанға кіретіндей етіп ұстаймыз, бұл кезде төрт созылған саусақ токтың бағытын көрсетсе, онда жазылған бас бармақ магнит өрісіндегі тогы бар өткізгішке әсер ететін күштің бағытын көрсетеді

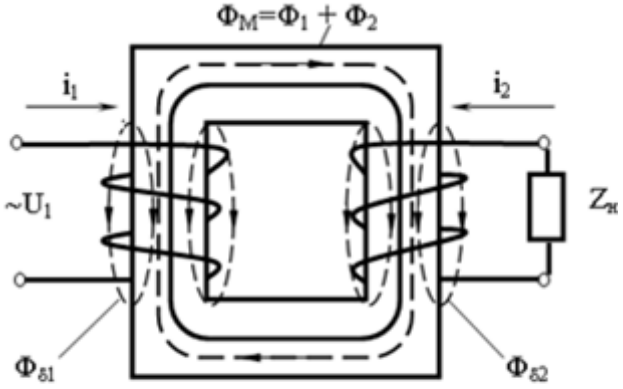
Бұл күш F_1 күшіне қарсы бағытталған және $F_{ЭМ}= F_1$ болған кезде өткізгіш тұрақты бір жылдамдықпен қозғалады. Сонымен, өткізгіштің қозғалуына жұмсалатын механикалық энергия шықпалық қабылдағыштың кедергісіне берілетін электр энергиясына түрленеді, яғни машина *генератор режимінде* жұмыс істейді.

Егер электр энергиясының басқа бір қорек көзінен өткізгіш арқылы ток жүргіссе, онда өткізгіштегі ток пен полюстердегі магнит өрісінің өзара әрекеттесу нәтижесінде $F_{ЭМ}$ электромагниттік күш пайда болады, осының әсерінен өткізгіш қандайда-бір механикалық энергия қабылдағышының тежеуші күшін жеңіп магнит өрісінде қозғала бастайды, яғни машина *қозғалтқыш* болып жұмыс істейді. Сонымен, электромагниттік индукция және электромагниттік күштер заңдарының ортақ болу себебінен кез келген электр машинасы генератор режимінде, сондай-ақ қозғалтқыш режимінде де жұмыс істей алады.

1.1 Трансформаторлар

Трансформатор – ол бір кернеудің айнымалы тогын сол жиіліктегі басқа бір кернеудің айнымалы тогына түрлендіретін статикалық электромагниттік түрлендіргіш. Трансформатордың жұмыс істеу принципі болаттан жасалған тұйықталған магнит өткізгішінде орналасқан, екі (немесе бірнеше) орамалардың арасындағы өзара индукция құбылысына негізделген. Трансформаторларды электр энергиясын алыс қашықтыққа беру және оны тұтынушылар арасында тарату кезінде, сондай-ақ өлшеуші, қорғаушы және басқа да әртүрлі түрлендіргіш құрылғыларда, автоматика жүйесінде, байланыста және т.б. көптеген жерлерде пайдаланады.

1.1.1 Трансформатордың құрылысы және жұмыс істеу принципі.



2.1 сурет - Бірфазалы тансформатордың жүктемелік режимі

Трансформатор құйын тогын азайту үшін қалыңдығы 0.35 немесе 0.5мм болатын, электротехникалық болат табақшалардан құрастырылған магнит өткізгішінен және екі немесе бірнеше орамалардан, шықпалардан, бактен тұрады. Трансформаторлардың магнит өткізгіші әдетте салқындай иленген болаттан жасалады, олардың прокат

бойындағы магниттік қасиеті, ыстық иленген болаттан жоғары болады.

ЭҚК ағынға тәуелділігі:

$$\boldsymbol{e} = -W\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\psi}{dt}. \qquad (1.2)$$

Магнит ағыны синусоидалы өзгереді:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t,$$

оны 1.1 өрнекке қойып және дифференциялдап, келесі өрнекті аламыз:

$$e = -\omega W \Phi_m \cos \omega t = \omega W \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)\omega t. \qquad (1.3)$$

(1.2) өрнек бойынша, магнит ағынының векторы ЭҚК векторынан *90°* алда болады.

ЭҚК максимал мәні:

$$E_m = \omega W \Phi_{m.} \qquad (1.4)$$

E_m мәнін $\sqrt{2}$ бөліп және $\omega=2\pi f$ қойып ЭҚК әсерлік мәнін аламыз:

$$E = 4{,}44 f W \Phi_m. \qquad (1.5)$$

Трансформациялық коэффициент:

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}. \qquad (1.6)$$

Бірінші реттік ораманы айнымалы ток көзіне қосқан кезде осы ораманың орамдарында айнымалы ток i_1 жүреді, пайда болған магнит қозғаушы күші $F_1= i_1W_1$ магнит өткізгішінде айнымалы магнит ағынын Φ_1 және сейілу магнит ағынын $\Phi_{\sigma 1}$ тудырады. Магнит ағыны Φ_1 магнит өткізгішімен тұйықталып, екі орамамен (бірінші реттік және екінші реттік) ілігісіп оларда *ЭҚК* индукциялайды:

$$e_1 = W_1\frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{d\psi_1}{dt}; \qquad e_2 = W_2\frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{d\psi_2}{dt}\ . \qquad (1.7)$$

Екінші реттік орама жүктемеге қосылған кезде $F_{2=}i_2W_2$ магнит қозғаушы күші пайда болады, ол өз кезегінде Φ_2 ағынын және $\Phi_{\sigma 2}$ сейілу ағынын тудырады.

Φ_2 ағыны, Ленц заңы бойынша екінші реттік ЭҚК тудыратын себептерге қарсы магниттік әрекет етеді. Ол себеп негізгі магнит ағыны Φ_1, сондықтан екінші реттік ораманың МҚК i_2W_2 негізгі магнит ағынына Φ_1 қарсы бағытта

болатын $Ф_2$ магнит ағынын туғызады, яғни оған қарама-қарсы фазадағы және оны әлсіретуге ұмтылады.

Кирхгофтың екінші заңы бойынша бірінші және екінші реттік орамалар үшін:

$$u_1 + e_1 + e_{s1} = i_1 R_1 ; \qquad (1.8)$$
$$u_2 - e_1 - e_{s1} = -i_2 R_2 .$$

Магниттік тепе-теңдік теңдеуі:

$$i_1 W_1 + i_2 W_2 = i_0 W_1 ,$$

мұнда $i_0 W_1$ – негізгі магнит ағынын тудыратын магнит қозғаушы күші;

R_1 және R_2 – бірінші және екінші реттік орамалардың активті кедергілері.

Егер теңдеуге кіретін барлық шамаларды синусоидалы деп есептесек, онда лездік мәндерден кешендік мәндерге өтуге болады:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{S1} + R_1 \dot{I}_1; \quad \text{немесе} \quad \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jX_1\dot{I}_1 + R_1 \dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_1;$$
$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{S2} - R_2\dot{I}_2; \quad \text{немесе} \quad \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - jX_2\dot{I}_2 - R_2\dot{I}_2 = \dot{E}_2 - Z_2\dot{I}_2;$$
$$\dot{I}_0 W_1 = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 . \quad \dot{I}_0 W_1 = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 . \qquad (1.9)$$

мұнда $\dot{E}_{S1} = -j\dot{I}_1\dot{X}_1$ и $\dot{E}_{s2} = -j\dot{I}_2\dot{X}_2$;

X_1 және X_2 – бірінші және екінші реттік орамалардың индуктивті сейілу кедергілері;

Z_1 және Z_2 – бірінші және екінші реттік орамалардың толық кедергілері.

2 Дәріс №2. Келтірілген трансформатор

Дәрістің мазмұны:

- келтірілген трансформатор;

-трансформатордың жүктеме кезіндегі жұмысы, векторлық диаграммаларды және орынбасу сұлбаларын тұрғызу;

- бос жүріс тәжірибесі.

Дәрістің мақсаты:

- әртүрлі жүктеме кезіндегі векторлық диаграммаларды тұрғызып үйрену;

- бос жүріс тәжірибесінен трансформатордың орынбасу сұлбасының параметрлерін және бос жүріс шығынын қалай анықтауға болатынын көрсету;

- трансформатордың орынбасу сұлбасы және бос жүріс шығыны.

2.1 Келтірілген трансформатор

Жалпы жағдайда трансформатордың бірінші реттік орамасының

параметрлері екінші реттік ораманың параметрлерінен айырмашылықта болады, әсіресе трансформациялық коэффициент үлкен болған кезде, ол талдауды, есептеуді және орынбасу сұлбасы мен векторлық диаграммаларды тұрғызуды қиындатады. Аталған қиындықтар трансформатордың барлық параметрлерін бірдей орамдар санына келтірумен жойылады. Әдетте екінші реттік ораманы біріншіге $W_1=W_2^{/}$ келтіреді.

Бірінші реттік параметрлерді келтірген кезде энергетикалық көрсеткіштері нақты трансформатордікіндей болып қалуы керек, атап айтсақ: келтірілген трансформатордың екінші реттік орамасындағы және нақты трансформатордағы барлық қуаттар, шығындар және фазалық ығысулар тең болуы керек.

а) келтірілген ЭҚК:

$$E_2^{/} = kE_2; \tag{2.1}$$

б) келтірілген трансформатордың тогы $\dot{I}_2^{/}$ нақты және келтірілген трансформаторлардың электромагниттік қуаттарының тең болу шарты бойынша анықталады:

$$E_2 \cdot I_2 = E_2^{/} \cdot I_2^{/}, \text{ мұнан} \qquad I_2^{/} = I_2 \frac{w_2}{w_1} = \frac{\mathrm{I_2}}{\mathrm{k}}\ ; \tag{2.2}$$

в) келтірілген трансформатордың активті кедергісі $r_2^{/}$ нақты және келтірілген трансформаторлардың активті кедергілеріндегі шығындардың тең болу шарты бойынша анықталады:

$$\left(I_2^{/}\right)^2 r_2^{/} = (I_2)^2 r_2 \quad \text{откуда } r_2^{/} = k^2 r_2; \tag{2.3}$$

г) келтірілген трансформатордың индуктивті сейілу кедергісі $X_2^{/}$ нақты және келтірілген трансформаторлардың реактивті қуаттарының тең болу шарты бойынша анықталады:

$$\left(I_2^{/}\right)^2 x_2^{/} = (I_2)^2 x_2 \quad \text{откуда } x_2^{/} = k^2 x_2; \tag{2.4}$$

д) келтірілген трансформатордың толық кедергісі:

$$Z_2^{/} = k^2 Z_2. \tag{2.5}$$

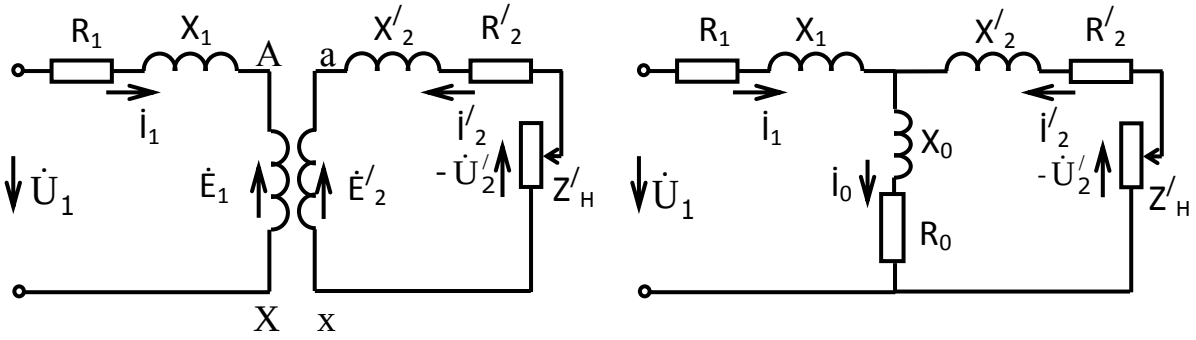
2.1.1 Келтірілген трансформатордың теңдеулері:

$$\begin{aligned} U_1 &= -\dot{E}_1 + jX_1\dot{I}_1 + R_1\dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + Z_1\dot{I}_1; \\ \dot{U}_2^{/} &= \dot{E}_2^{/} - jX_2^{/}\dot{I}_2^{/} - R_2^{/}\dot{I}_2 = \dot{E}_2^{/} - Z_2^{/}\dot{I}_2^{/}; \end{aligned} \tag{2.6}$$

$$\frac{\dot{I}_0 W_1}{W_1} = \frac{\dot{I}_1 W_1}{W_1} + \frac{\dot{I}_2 W_2}{W_1} \text{ нан } \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-I_2^{/}\right) \text{ немесе } \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\dot{I}_2^{/}\right). \qquad (2.7)$$

2.1.2 Трансформатордың орынбасу сұлбалары.

Трансформаторда бірінші және екінші реттік орамалар арасындағы байланыс негізгі магнит ағыны бойынша іске асырылады. Бұл трансформатордың жұмысын талдауды қиындатады. Электромагниттік үрдістерді зерттеуді жеңілдету үшін орамалар арасындағы магниттік байланыс электрлік байланыспен ауыстырылады. Ол үшін келтірілген трансформатордың электрлік сұлбасы қолданылады.



а) балама сұлбасы; б) электрлік орынбасу сұлбасы.

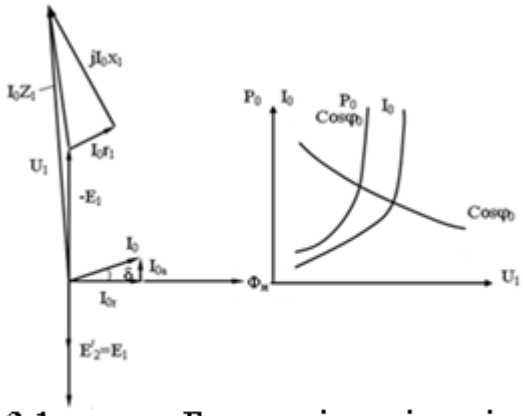
1.2 сурет – Трансформатордың орынбасу сұлбасы

1.2, а суретте келтірілген трансформатордың балама сұлбасы көрсетілген, онда *R* мен *X* кедергілер шартты түрде өздеріне сәйкес орамалардан шығарылып, оларға тізбектеп қосылған. Келтірілген трансформаторда $K=1$, демек $E_2 = E_2^{/}$, сондықтан *A* мен *a*, сондай-ақ *X* пен *x* жалғауға болады және бұл кезде Т-тәріздес орынбасу сұлбасы алынады. Ол (1.13) және (1.14) теңдеулермен толықтай сәйкес келеді. Магниттеуші тармақтың $Z_0=R_0+jX_0$ параметрлері $\dot{I}_0$ токпен анықталады. Кедергі R_0 магниттік шығындармен пайда болған жалған кедергі деп аталады.

Орынбасу сұлбасының жүктеме кедергісін $Z^{/}_{ж}$ өзгертіп трансформатордың барлық жұмыс режимдерін алуға болады.

2.1.3 Трансформатордың векторлық диаграммасы.

Келтірілген трансформатордың орынбасу сұлбасын және кернеулері мен токтарының негізгі теңдеулерін пайдаланып, трансформатордың токтарының, ЭҚК мен кернеулерінің арасындағы қатынастарды және фазалық ығысуларды айқын көрсететін трансформатордың векторлық диаграммасын тұрғызуға болады. Векторлық диаграмма – трансформатордың негізгі теңдеулерінің графиктік кескіні.



2.1 сурет - Бос жүріс кезіндегі сипаттамалар және векторлық диаграммалар

2.2 Бос жүріс және қысқаша тұйықтау режимдері. Трансформатордың орынбасу сұлбасының параметрлерін тәжірибемен анықтау

2.2.1 Бос жүріс тәжірибесі.

Трансформатордың бірінші реттік орамасы синусоидалы кернеуге қосылады, ал екінші реттік орама ажыратулы. Онда $Z_Ж=\infty$, $I_2=0$. Бұл жағдайда трансформатордың теңдеулері келесідей түрде жазылады:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + jX_1\dot{I}_1 + R_1\dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + Z_1\dot{I}_0; \qquad (2.8)$$
$$\dot{U}_2^{/} = \dot{E}_2^{/};$$
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0.$$

Бірінші реттік кернеу U_{10}, ток $I_1=I_0$ және қуат $P_O=P_1$, сондай-ақ екінші реттік кернеу U_2 өлшенеді.

Тәжірибе мәліметі бойынша трансфарматордың трансформациялық коэффициенті, бос жүріс шығыны P_0, магнит тізбегінің параметрлері (трансформатордың орынбасу сұлбасындағы магниттеуші тармақтың толық, активті және индуктивті кедергілері), қуат коэффициенті анықталады.

Бос жүріс қуаты

Бос жүріс режимінде трансформатор тұтынатын қуат P_0 бірінші реттік орамадағы электр шығынына $I_0^2R_1$ және магниттік шығынға (құйын тогы мен гистерезис шығыны $P_{К.Т}+P_Г$) жұмсалады:

$$P_0 = I_0^2R_1 + P_{К.Т} + P_{Г.} \qquad (2.9)$$

Бос жүріс тогы номинал токтың *(2-10)%* пайызын құрайды, мұнан басқа R_1 кедергі өте аз болатындықтан бос жүріс қуаты тек қана B^2f^β пропорционал болатын болаттағы шығынды өтеуге жұмсалады деп санауға әбден болады:

$$P_0 = P_{К.Т} + P_Г. \qquad (2.10)$$

Бос жүріс тогы номинал токтың *(2-10)%* пайызын құрайды, мұнан басқа R_1 кедергі өте аз болатындықтан бос жүріс қуаты тек қана B^2f^β пропорционал болатын болаттағы шығынды өтеуге жұмсалады деп санауға әбден болады:

$$P_0 = P_{К.Т} + P_Г. \qquad (2.11)$$

Физикалық мағына тек қана фаза орамасы үшін есептелген кедергінің шамасында ғана болады. Сондықтан ораманы жалғау сұлбасын ескерген дұрыс болады. Бірінші реттік ораманы жұлдызша жалғаған жағдайда:

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_2}; \quad R_0 = \frac{P_0}{3I_0^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \tag{2.12}$$

ал бірінші реттік ораманы үшбұрышша жалғаған жағдайда:

$$Z_0 = \frac{\sqrt{3}U_1}{I_2}; \quad R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \tag{2.13}$$

Қуат коэффициенті:

$$cos\varphi_0 = \frac{P_0}{3U_1 I_0}. \tag{2.14}$$

Үш фазалы трансформатордың трансформациялық коэффициентін фазалық кернеу бойыншада, сондай-ақ желілік кернеу бойыншада есептеуге болады. Трансформатор теориясы үшін аталған трансформациялық коэффициенттердің алғашқысы маңызды.

Электр машинасы теориясында кедергінің салыстырмалы шамасы пайдаланылады, ол бойынша қуаттары әртүрлі болатын трансформаторлардың параметрлерін салыстыруға болады:

$$Z_{O*} = \frac{Z_O}{Z_H} = \frac{Z_O I_H}{U_H}; \; R_{O*} = \frac{R_O}{Z_H} = \frac{R_O I_H}{U_H}; \; X_{O*} = \frac{X_O}{Z_H} = \frac{X_O I_H}{U_H}. \tag{2.15}$$

Бұл жерде I_H және U_H – номинал фазалық ток пен кернеу. Номинал кедергі:

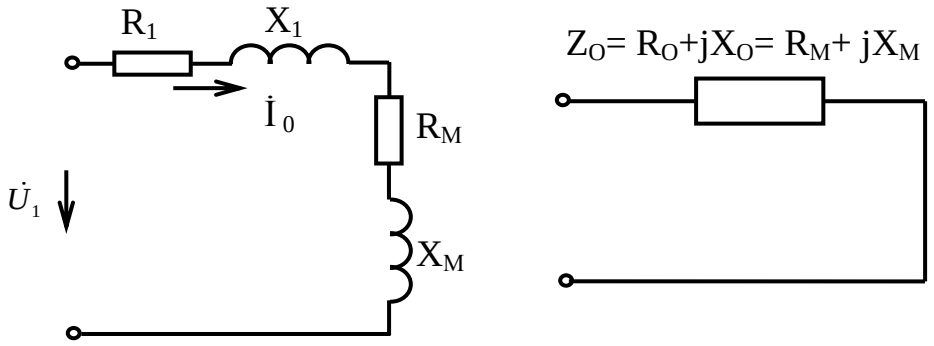
$$Z_H = \frac{U_H}{I_H}. \tag{2.16}$$

Қазіргі кездегі транзформаторларда U_H кезінде әдетте $Z_{O*} \approx X_{O*} = 25 \div 200$ және $R_{O*} = 5 \div 25$. Екінші сандар үлкен қуатты трансформаторлар үшін.

Күштік трансформаторларда R_1 мен X_1 оларға сәйкес келетін R_M мен X_M ондаған және жүздеген есе аз болады. Сондықтан үлкен сәйкестікпен бос жүріс параметрлері магниттеуші тізбектің параметрлеріне тең болады деп санауға болады:

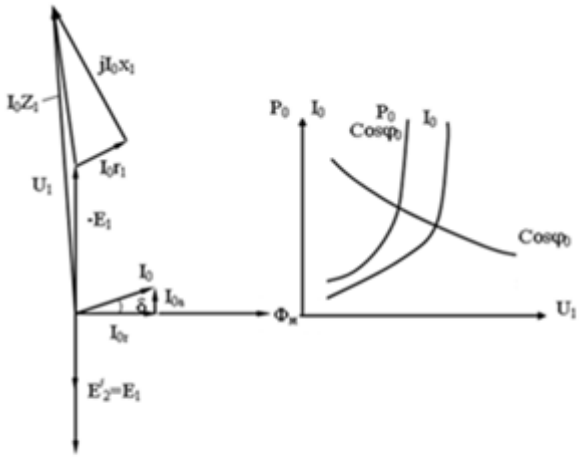
$$Z_O \approx Z_M; \quad R_O \approx R_M \quad \text{и} \quad X_O \approx X_M. \tag{2.17}$$

Осы себептен, бос жүріс қуаты P_O трансформатордың магнит өткізгіштігіндегі магниттік шығындарға $(P_К + P_Г)$ тең болады деп өте үлкен сәйкестікпен айтуға болады.



а) б)

2.2 сурет- Бос жүрістің орынбасу сұлбасы (а) және бос жүрістің ықшамдалған орынбасу сұлбасы (б)



2.3 сурет - Бос жүріс кезіндегі сипаттамалар және векторлық диаграммар

(2.8) теңдеулерге 2.3 суреттегі бос жүрістің векторлық диаграммасы сәйкес келеді.

Бос жүріс тәжірибесін U_0 бір қатар мәндері үшін жасайды: $U_0 \approx 0,3U_H$ ден $U_0 \approx 1,1U_H$ дейін және алынған мәліметтер бойынша бос жүріс сипаттамасын тұрғызады, ол I_0, P_0, $\cos\varphi_0$ бос жүріс кернеуіне U_0 тәуелділігін көрсетеді.

3 Дәріс №3. Қысқаша тұйықтау тәжірибесі. Пайдалы әсер коэффициенті. Трансформаторлардың топтары

Дәрістің мазмұны:

- қысқаша тұйықтау режимі, орынбасу сұлбасы, векторлық диаграммалар, сипаттамалар;
- пайдалы әсер коэффициенті, трансформаторлардың топтары.

Дәрістің мақсаты:

- қысқаша тұйықтау тәжірибесінен трансформатордың орынбасу сұлбасының параметрлері және қысқаша тұйықтау шығындары қалай анықталатынын көрсету;

-топтардың неден тәуелді болатынын талдау және трансформаторлардың негізгі топтарын тұрғызуды көрсету.

3.1 Қысқаша тұйықтау коэффициенті

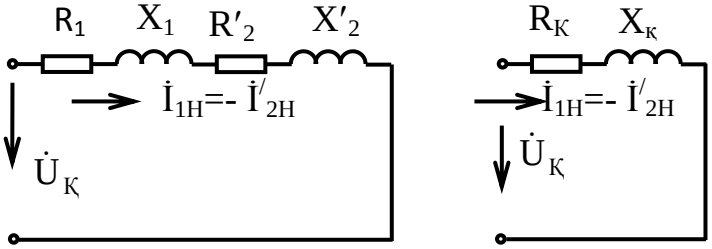
Кенеттен болатын апатты қысқаша тұйықтау деп бөледі, бұл кезде трансформатордың токтары рұқсат етілмейтіндей үлкен болады және тәжірибелік қысқаша тұйықтау деп бөледі, бұл параметрлерді алу үшін жасалады.

Қысқаша тұйықтау тәжірибесі кезінде екінші реттік орамалар қысқаша тұйықталады $\dot{U}_{2K}^{/} = 0$, ал бірінші реттік орамаларға трансформатор қызып кетпес үшін және зақымдалмас үшін трансформатордың орамаларында номиналдан аспайтын токтар жүретіндей кернеу беріледі.

Магнит өткізгішінің магнит ағыны бірінші реттік ораманың $U_{1қ}$ кернеуіне пропорционал болады, ол қысқаша тұйықтау тәжірибесінде U_{1H} номинал кернеудің *10%* аспайды, демек ол тудыратын ток I_M өте аз болады. Сондықтан қысқаша тұйықтау тәжірибесінде магниттеуші тармақты ескермесе де болады $\dot{I}_{1қ} = -\dot{I}_{2К}^{/}$ және орынбасу сұлбасы 3.1 суретте көрсетілгендей түрде болады.

Теңдеу келесі түрде жазылады:

$$\dot{U}_{1қ} = \dot{I}_{1қ}\left(R_1 + R_2^{/}\right) + J\dot{I}_{1қ}\left(X_1 + X_2^{/}\right) = \dot{I}_{1қ}Z_{қ} \qquad (3.1)$$



3.1 сурет- Қысқаша тұйықталу режимі

Қысқаша тұйықтау тогы номиналға $\dot{I}_{1қ} = \dot{I}_{1H}$ тең болған кездегі төмендетілген кернеу қысқаша тұйықтау кернеуі деп аталады және $u_{қ}$ белгіленеді.

Іс жүзінде u_K шамасы пайызбен көрсетіледі:

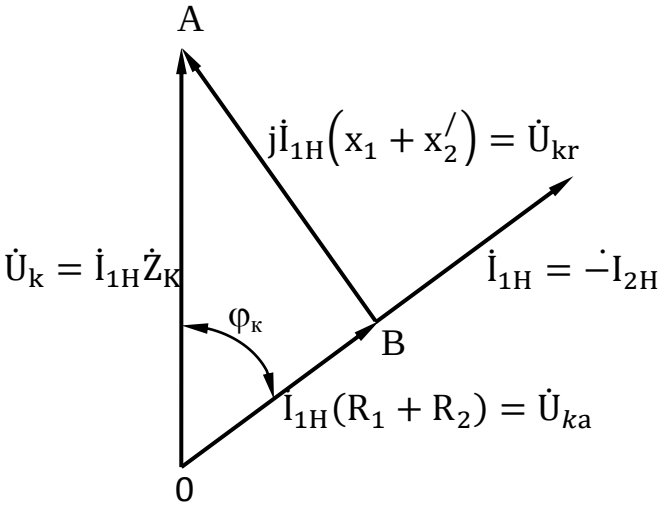
$$u_{қ\%} = \frac{U_{1қ}}{U_{1H}} \cdot 100\% = \frac{I_{1H}Z_{қ}}{U_{1H}} \cdot 100\%. \qquad (3.2)$$

Салыстырмалы бірлікте $u_{қ}$ шамасы қысқаша тұйықтау кедергісіне тең болады

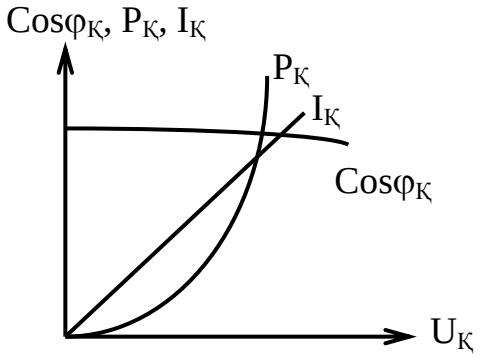
Салыстырмалы бірлікте:

$$u_{k*} = \frac{U_{1қ}}{U_{1H}} = \frac{I_{1Hқ}}{U_{1H}} = \frac{Z_{қ}}{Z_H} = Z_{қ*}. \qquad (3.3)$$

Векторлық диаграмма 3.2 суретте көрсетілген.



3.2 сурет – Қысқаша тұйықталудың векторлық диаграммасы



3.3 сурет – Қысқаша тұйықталудың сипаттамалары

OAB үшбұрышы қысқаша тұйықтау үшбұрышы деп аталады. Қысқаша тұйықтау тәжірибесінің көмегімен қысқаша тұйықтау шығынын – $P_к$, қуат коэффициентін $cos\varphi_k = \frac{P_К}{3U_К I_К}$, орынбасу сұлбасының параметрлерін Z_R, $R_К$,$X_К$ анықтауға болады.

Қысқаша тұйықтау қуаты $P_{К.Т} = I_1^2 R_1 + \left(I_2^{/}\right)^2 R_2^{/} = I_1^2 R_К$, яғни қысқаша тұйықтау шығынына тең болады – $P_К$ ($I_1 = -I_2^{/}$, болатынын ескеріп), ал бұл кезде болаттағы шығын аз болады.

Толық $Z_К$, активті $R_К$ және реактивті $X_К$ қысқаша тұйықтау кедергілері бос жүріс жағдайы үшін берілген өрнектерге ұқсас өрнектер бойынша есептеледі.

1.8 суретте қысқаша тұйықтау сипаттамалары бейнеленген. Олар $I_К$, $P_К$, $cos\varphi_К$ қысқаша тұйықтау кернеуіне тәуелділіктерін көрсетеді.

3.2 Пайдалы әсер коэффициенті

Трансформатордың пайдалы әсер коэффициентін жанама әдіспен анықтауға болады: бос жүріс және қысқаша тұйықтау тәжірибелері бойынша:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} \cdot 100 = \left(1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P}\right) \cdot 100 , \qquad (3.4)$$

мұнда $P_2 = k_{нг} S_н cos_{\varphi 2}$ – трансформатордан берілетін қуат;

$\sum P$ – трансформатордағы шығындардың қосындысы;

$S_н$ – трансформатордың номинал қуаты;

$k_{ж}$ – жүктеме коэффициенті;

$cos_{\varphi 2}$- қуат коэффициенті.

Трансформатордағы шығын болаттағы шығын мен электрлік шығыннан тұрады:

$$\sum P = P_{Б} + P_{Э}\,. \tag{3.5}$$

Егер кернеудің аздап түсуін ескермесе, онда болаттағы шығынды тұрақты деп есептеуге болады:

$$P_{Б} = P_0 = \text{const.} \tag{3.6}$$

Орамалардағы шығындар $\mathrm{P_э} = I_1^2 r_k$ немесе, $I_1 = k_{ж} I_{н}$ болатындықтан:

$$P_{э} = k_{ж}^2 I_{Н}^2 r_{қ} = k_{ж}^2 P_{к.н}\,; \tag{3.7}$$

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{бол} + P_{э}}{P_2 + P_{бол} + P_{э}}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{P_0 + k_{ж}^2 P_{кн}}{k_{Ж} S_{н} cos_{\varphi 2} + P_0 + k_{Ж}^2 P_{кг}}\right) \cdot 100. \tag{3.8}$$

Айнымалы шығын тұрақты шығынға тең болған кезде пайдалы әсер коэффициенті максимал болады, яғни:

$$P_0 = P_{э} = k_{Ж}^2 I_{Н}^2 r_{К} = k_{Ж}^2\,, \text{онда} \quad k_{\mathrm{Ж}} = \sqrt{\frac{\mathrm{P_0}}{\mathrm{P_{к.н}}}}\,. \tag{3.9}$$

3.3 Орамаларды жалғау топтары

Трансформаторды басқа трансформаторлармен параллель жұмысқа қосу үшін бірінші және екінші реттік орамалардың желілік *ЭҚК* арасындағы фазалық ығысуды білу керек. Осы ығысуды сипаттау үшін орамаларды жалғау топтары туралы ұғым кіргізіледі. Сондықтан трансформатордың құжатында номинал мәндерден басқа міндетті түрде трансформатордың тобы көрсетіледі.

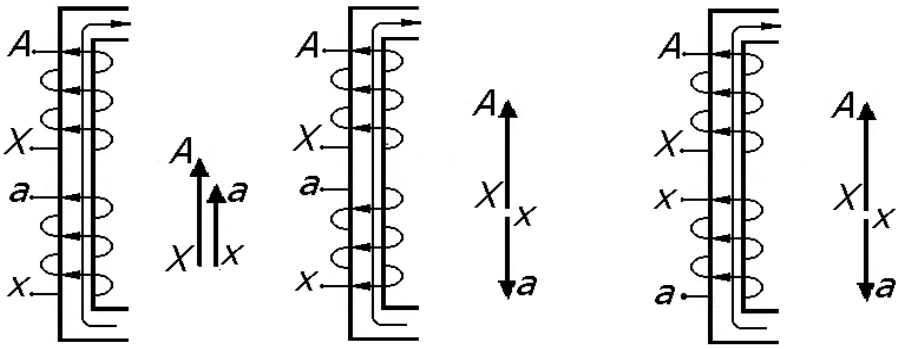
Трансформатордың тобы: 1) орамаларды орау әдісіне; 2) орамалардың соңдарын таңбалау әдісіне; 3) трансформатордың орамаларының соңдарын жалғау әдісіне тәуелді болады.

3.3.1 Бір фазалы трансформатор.

1.Топтың трансформаторды орау әдісіне тәуелділігі.

3.4а суретте жоғарғы және төменгі кернеудің орамалары оралған магнит өзекшесі бейнеленген. Таңбаланулары бірдей екі орама бір бағытта оралған. Екі орамада бір өзекшеде орналасқандықтан және екеуінендe бір негізгі магнит ағыны өтетіндіктен, орамаларда пайда болатын ЭҚК қыспақтарға қатысты бірдей бағытта болады. Мысалы, егер бірінші реттік

орамадағы ЭҚК *X* тен *A* бағытталған болса, онда екінші реттік орамадағы ЭҚК де *x* тен *a* бағытталатын болады.



а) б) в)

3.4 сурет – Орама қысқыштарының белгіленуіне және оралуына байланысты ЭҚК векторларының бұрыштық ығысулары

Демек, E_1 және E_2 ЭҚК фаза бойынша сәйкес келетін екі вектормен бейнеленеді.

3.4б суретте бірінші және екінші реттік орамалар әртүрлі бағытта оралған, сондықтан E_1 және E_2 ЭҚК әртүрлі бағытта болады (*X* тен *A* дейінгі бағыт оң деп қабылданған). Бірінші жағдайда ЭҚК ығысу фазасы нөл градус, ал екіншіде – 180^0.

ЭҚК арасындағы ығысу бұрышын градуспен көрсетпей, бұл бұрышты белгілеу үшін сағат бетін қолданған ыңғайлы болады. Бірінші реттік ЭҚК векторы *XA* ретінде сағат бетіндегі 12 цифрына қойылған минуттық тіл қабылданады, ал *xa* векторы сағат тілі ретінде қабылданады. Онда суретте сағат 0 немесе 12 көрсетіп тұрады, мұндай жалғау 0 топ немесе 12 топ деп аталады.

Егер U_1 және U_2 қарама-қарсы фазада болса, онда трансформатор 6 топқа жатады.

2.Таңбалауға тәуелділік.

3.4в суретте жоғарғы және төменгі кернеудің орамалары оралған магнитөткізгішінің өзекшесі бейнеленген. Екі орамада бірдей бағытта оралған, бірақ орамалардың белгіленуі әртүрлі. Сондықтан ЭҚК векторлары әртүрлі бағытта болады.

Сонымен, бір фазалы трансформаторларда тек қана екі топ болуы мүмкін.

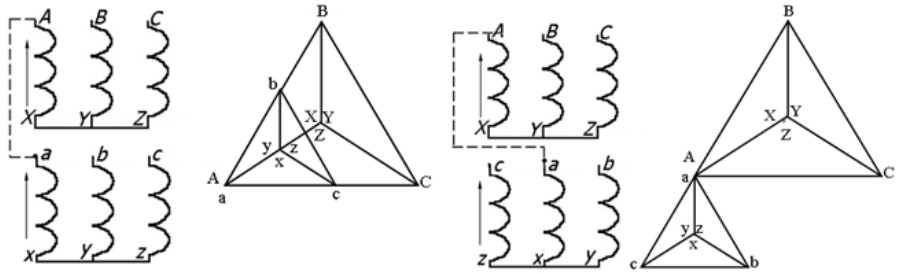
3.3.2 Үш фазалы трансформатор.

Үш фазалы трансформаторларда, алғашқыда қарастырылған екі себептерден басқа жалғау әдістерініңде мәні болады.

1. Y/Y жалғау әдісі.

Үш фазалы трансформаторларда бұрышты санау оңай болу үшін сызбада «*A*» мен «*a*» нүктелерін қосады.

3.5а суретте Y/Y- 0 топтың сұлбасы мен бірінші және екінші реттік орамалардың ЭҚК үшбұрыштары бейнеленген. 3.5б суретте екінші реттік ораманың таңбалануы шеңбермен айналдыру принципі бойынша өзгертілген – фазалар *120°* ығысқан. Желілік кернеулердің *А* мен *а* нүктелерін біріктіреміз және *ах* ветрының *ВУ* векторымен, *ву – CZ* векторымен, ал *cz – AX* векторымен сәйкес бағытталатынын ескеріп, төменгі кернеудің үш бұрышын тұрғызамыз.



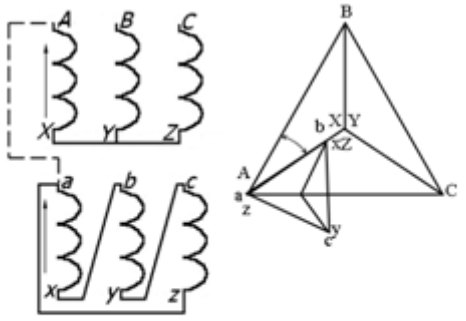
а) б)

3.5 сурет - Y/Y- 0 и Y/Y- 4 жалғану топтарының бірінші және екінші орамаларының ЭҚК сұлбалары және схемалары

Онда*120˚* бұрышқа ығысқан, желілік ЭҚК *АВ* және *ab* екі векторын аламыз. Себебі *АВ* векторы бірінші реттік, олай болса ол минуттық тілмен тура келеді, ал сағат тілімен тура келетін *ab* векторы трансформатордың тобын көрсетеді – 4.

2 Y/Δ жалғау әдісі.

Трансформатордың бірінші реттік орамасы «жұлдызша», ал екінші реттік орамасы «үшбұрышша» жалғанған (3.6 суретте). ТК және ЖК орамалар бір бағытта оралған және қыспақтардың таңбалануы бірдей болсын. Онда ЖК және ТК орамалардағы фазалық ЭҚК векторлары бағыттары бойынша тура келеді. Бұл кезде ТК ораманың желілік және фазалық ЭҚК тең болатынын естен шығармау керек. Желілік кернеулердің векторларындағы *А* және *а* аттас нүктелерін біріктіріп, *АВ* векторынан сағат тілі бойынша *30˚* бұрышқа ығысқан *ab* векторын аламыз, яғни трансформатордың 11 жалғау тобын.



3.6 сурет - Y/Δжалғану кезіндегі бірінші және екінші орамалардың ЭҚК сұлбалары

Сонымен, Y/Δ немесе Δ/Y жалғаған кезде барлық тақ топтарды, ал Y/Y немесе Δ/ Δ жалғаған кезде барлық жұп топтарды алуға болады.

Бұл кезде бірінші ЖК ораманың жалғануы, екінші ТК ораманың жалғануы белгіленген, ал «0» индексі сыртқа ораманың нөлдік нүктесі шығатынын көрсетеді.

4 Дәріс №4. Трансформаторлардың параллель жұмысы

Дәрістің мазмұны: трансформаторларды параллель жұмысқа қосу себептері.

Дәрістің мақсаты: параллель жұмысқа қандай трансформаторлардың қосылатынын көрсету, параллель жұмысқа қосу шарттары.

4.1 Трансформаторлардың параллель жұмысы

Төмендететін трансформаторлық станцияларда орнатылған трансформаторлық қуатты бөлшектеу қажеттілігі жиі туындайды. Бір трансформатордың орнына қуаттарының қосындысы осы трансформатордың қуатындай болатын екі немесе бірнеше трансформаторлар орнатады.

Қосалқы станциядағы жүктеменің тәуліктік және маусымдық өзгеруі кезінде онда параллель жұмыс істейтін екі немесе бірнеше трансформаторлардың болуы жүктеменің азаюы ұзақ уақытқа созылған кезде трансформаторлардың бір бөлігін ажыратып, осылайша трансформаторлардың магниттік шығынын жабуға жұмсалатын энергияны азайтуға мүмкіндік береді.

Трансформаторлардың параллель жұмысы, егер максимал жүктеме режимін іске асыру мүмкін болса идеалды деп есептеледі, оның толық қуаты S_{max} трансформаторлардың номинал қуаттарының қосындысына тең болады:

$$S_{max} = S_{H\gamma\beta\alpha} + S_{H\beta} + \cdots S_{H\gamma}. \quad (4.1)$$

Бұл трансформаторлардың толықтай пайдаланылуына сәйкес келеді. (1.1) қатынас келесі шарттар кезінде ғана орындалуы мүмкін:

1) жүктеме өскен кезде әрбір трансформатор номинал қуаттарына пропорционал жүктелуі керек;

2) жүктеме болмаған кезде$(I_{ж}=0)$ екінші реттік токтарда нөлге тең болуы керек.

Бұл шарттар сақталу үшін, параллель жұмыс істейтін трансформаторлардың:

1) орамаларды жалғау топтары бірдей болуы;

2) бірінші реттік және екінші реттік номинал кернеулері тең болуы немесе, сол сияқты трансформациялық коэффициенттері тең болуы:

$$U_1 = const; \quad \text{болғанда} \quad U_{2\alpha} = U_{2\beta} = U_{2\gamma} = \cdots \quad (4.2)$$

$$K_\alpha = K_\beta = K_\gamma \ldots ; \quad (4.3)$$

3) қысқаша тұйықтау кернеулері тең болуы

$$u_{K\alpha} = u_{K\beta} = u_{K\gamma} = \cdots \ . \quad (4.4)$$

керек.

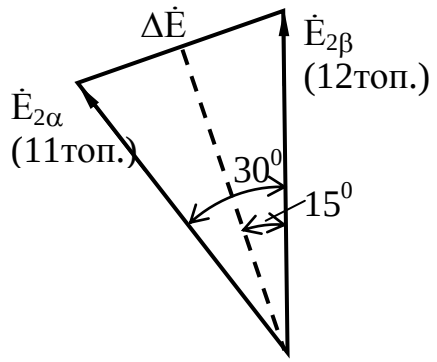
Іс жүзінде тек қана бірінші шарт сөзсіз орындалуы керек, екінші және үшінші шарттар белгілі шегіністермен орындалады, олар үшін рұқсат етілетін шекаралар қойылуы керек.

4.1.1 Орамалардың жалғау топтары бірдей болмаған кездегі трансформаторлардың параллель жұмысы.

Параллель жұмыс істейтін екі трансформатор α мен β екінші және үшінші шарттарды қанағаттандырады, бірақ бірінші шартты қанағаттандырмайды деп болжайық. Параллель жұмысқа бірінші реттік және екінші реттік номинал кернеулері тең болатын, орамалары Δ/Y-11 және Y/Y-12 жалғанған екі трансформатор қосылған. Онда бұл трансформаторлар үшін сәйкес фазалардағы E_2 *ЭҚК* шамалары бойынша тең болады, бірақ $30°$ ығысады (4.1 сурет). Екінші реттік орамалардың тұйықталған контурында бұл *ЭҚК* айырымы әсер етеді:

$$\Delta E = 2E_2 \ sin\, 15^0 = 0.51.$$

Теңгеруші ток тек қана трансформаторлардың бірінші реттік және екінші реттік орамалары бойынша жүреді және шамасы бойынша тек қана осы орамалардың кедергілерімен шектеледі, яғни қысқаша тұйықтау кедергілерімен:



4.1 сурет - Δ/Y-11 и Y/Y-12 топтары кезіндегі трансформаторлардың параллель жұмысы

$$I_{\text{теңα}} = I_{\text{теңβ}} = \frac{\Delta E}{Z_{k\alpha}+Z_{k\beta}} \qquad (4.5)$$

Егер, мысалы, трансформаторлардың қуаттары және $Z_{k\alpha} = Z_{k\beta} = u_{k\alpha} = u_{k\beta} = 0{,}05$, онда теңгеруші токтың салыстырмалы шамасы келесідей болады:

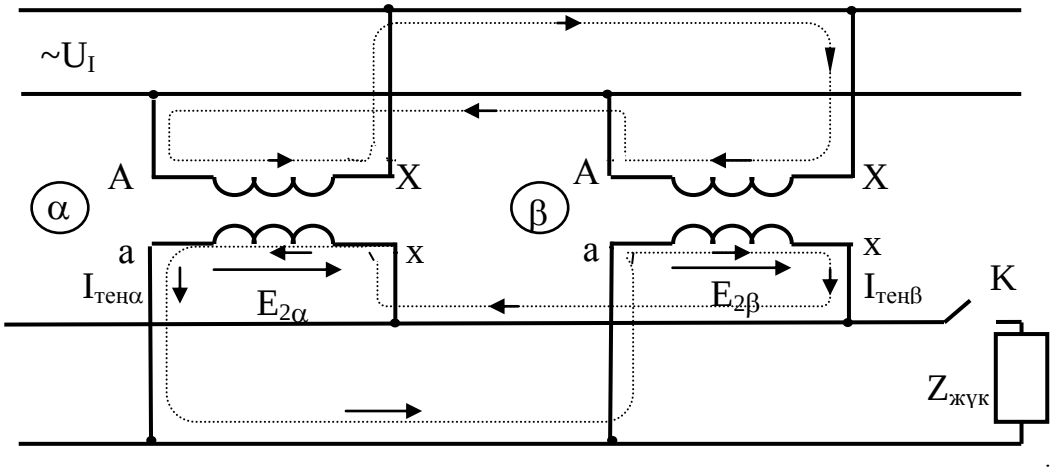
$$I_{*\text{тең}} = \frac{0{,}518}{0{,}05+0{,}05} = 5{,}18, \qquad (4.6)$$

яғни бұл ток номиналдан *5.18* есе көп болады. Мұндай токтың болуы шамамен қысқаша тұйықтау тогына тең. Сондықтан орамаларын жалғау топтары әртүрлі болатын трансформаторларды параллель қосуға рұқсат берілмейді.

4.1.2 Трансформациялық коэффициенттері бірдей емес трансформаторлардың параллель жұмысы.

Параллель жұмыс істейтін екі трансформатор α мен β бірінші және үшінші шарттарды қанағаттандырады, бірақ екінші шартты қанағаттандырмайды деп болжайық, әрі $K_\alpha > K_\beta$. Құбылыстың табиғатын анықтау үшін бір фазалы трансформаторлардың параллель жұмысын немесе

екі үш фазалы трансформаторлардың сәйкес келетін фазаларын қарастыру жеткілікті. Желінің кернеуі параллель қосылған трансформаторлардың әрқайсысының бірінші реттік номинал кернеулеріне тең деп есептейміз, яғни $U_{1\alpha} = U_{1\beta} = U_{1\gamma}$. Онда $E_{2\alpha} = \frac{U_1}{k_\alpha} < E_{2\beta} = \frac{U_1}{k_\beta}$, әрі $\dot{U}_{2\alpha}$ және $\dot{U}_{2\beta}$ векторлары фаза бойынша тура келеді.



4.2 сурет - α және β бірфазалы
трансформаторларының параллель жұмысы

1. Трансформациялық коэффициенттері бірдей емес трансформаторлардың бос жүріс кезіндегі параллель жұмысы.

Кілт К ашық. *ЭҚК* айырымының $\Delta\dot{E} = \dot{E}_{2\alpha} - \dot{E}_{2\beta}$ әсерінен теңгеруші ток $I_У$ пайда болады, оның лездік таралуы 1.13 суретте үзік сызықтармен көрсетілген. $I_У$ токқа қатысты α және β трансформаторлар қысқаша тұйықтау режимінде болады, сонымен бірге, бұл ток трансформатордың орамалары бойынша қарама-қарсы бағыттарда жүреді. Осыған сәйкес 4.2 суреттегі екі векторлар: $I_{\text{тең}\alpha}$ и $I_{\text{тең}\beta} = -I_{\text{тең}\alpha}$. Егер $Z_{*k\alpha}$ және $Z_{*k\beta}$ - α және β трансформаторлардың толық қысқаша тұйықтау кедергілері болса, онда $I_{теңдеу} = \frac{\Delta E}{Z_{k\alpha} + Z_{k\beta}}$. $Z_{k\alpha} = Z_{k\beta}$ деп есептейміз және активті кедергіні елемей келесі өрнекті аламыз:

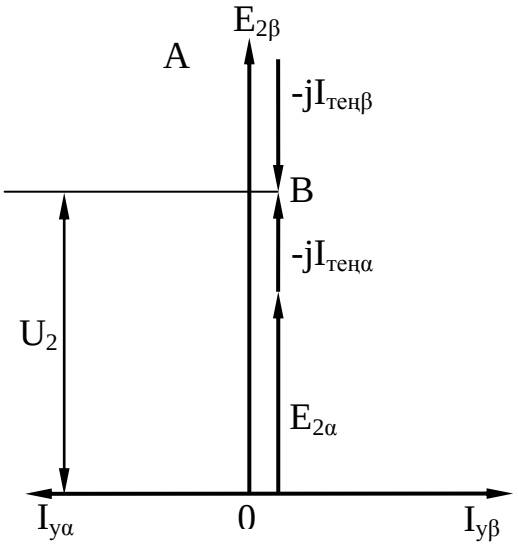
$$I_{\text{тең}} = \frac{\Delta E}{X_{k\alpha} + X_{k\beta}}; \tag{4.7}$$

мұнда $X_{k\alpha}$ *және* $X_{K\beta}$ - қысқаша тұйықтаудың индуктивті кедергілері.

Диаграмма келесі теңдеулер бойынша тұрғызылады:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{E}_{2\beta} - j\dot{I}_{\text{тең}\beta} X_k \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_{2\alpha} - j\dot{I}_{\text{тең}\alpha} X_k \end{aligned}\right\} \tag{4.8}$$

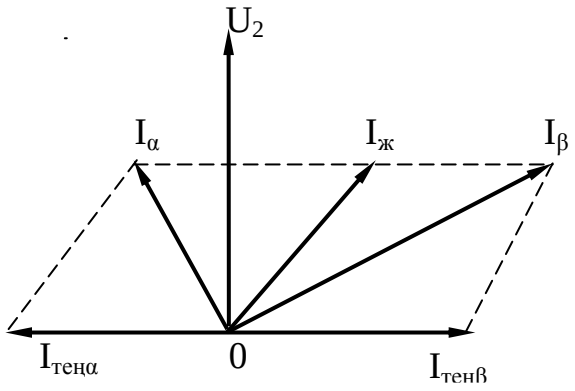
Егер $X_{k\alpha} = X_{k\beta}$, онда $\dot{I}_{\text{теңβ}} X_k = \dot{I}_{\text{теңα}} X_k$, олай болса A_1A_2 кесінді тең бөлінеді және бұл жағдайда $\dot{I}_{\text{теңβ}}$ ток $E_{2\beta}$ кернеуді екінші реттік шиналардағы ортақ кернеуге $U_2=OB$ дейін азайтады, ал $\dot{I}_{\text{теңα}}$ ток $E_{2\beta}$ кернеуді U_2 кернеуге дейін өсіреді. Теңгеруші токтың мәні осыда. Теңгеруші ток тек қана трансформаторлардың орамалары бойынша жүретіндіктен, оның шамасы айтарлықтай үлкен болады. Мысалы, параллель жұмыс істейтін трансформаторлардың қуаттары бірдей және $Z_{*k\alpha} = Z_{*k\beta} = 0{,}05$, ал олардың трансформациялық коэффициенттері 1% айырмашылықта болады делік. Онда $I_{*\text{тең}} = \frac{\Delta E_*}{Z_{k\alpha}=Z_{*k\beta}} = \frac{0{,}01}{2\cdot 0{,}05} = 0{,}1$ немесе *10*%.



4.3 сурет – Бос жүріс кезіндегі векторлық диаграмма

2. Трансформациялық коэффициенттері бірдей емес екі трансформатордың жүктеме кезіндегі параллель жұмысы.

Қарастырылатын режимді зерттеу негізіне екі режимдерді беттестіру әдісі алынады. Яғни бәрі бұлай өтеді, әрбір трансформаторда шықпалық жүктемеге сәйкес келетін екі ток - теңгеруші $I_{тең}$ және жүктеме тогы $I_{ж}$ болады деп есептеледі. Нақты жағдайда токтардың геометриялық қосындысын көрсететін тек қана қортынды ток болады.



4.4 сурет – Активті – индуктивтілікті жүктеме кезіндегі векторлық диаграмма

4.4 суретте жүтемелік ток *OA* активті – индуктивті сипатта. Қортынды токтар *OB* және *OC* векторлармен анықталады: $OB = \dot{I}_{\text{теңβ}} + \dot{I}_{НГ} = \dot{I}_{\text{теңβ}}$ және $OC = \dot{I}_{\text{теңα}} + \dot{I}_{НГ} = \dot{I}_{\text{теңα}}$.

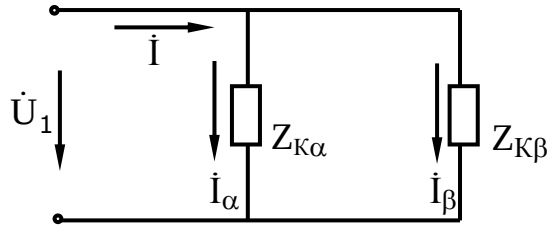
Диаграммада көрсетілгендей, трансформаторлардың асқын жүктемелік немесе толымсыз жүктемелік дәрежесі біріншіден, трансформаторлардың параметрлерімен анықталатын $I_{тең}$ және Ψ_K шамаларына, екіншіден тізбектің шықпалық параметрлерімен анықталатын $\varphi_Ж$ бұрышына тәуелді болады.

Трансформациялық коэффициенттер тең болмаған кезде қуаты аз трансформатордың трансформациялық коэффициенті үлкен болғаны дұрыс. Себебі трансформаторлар қызып кетпес үшін асқын жүктеме беруге болмайды, онда, сірә шықпалық жүктемені, асқын жүктемелі трансформатордың жүктемесі номинал болатындай етіп түсіру керек.

Бұл айтқандардан шығатыны, трансформациялық коэффициенттердің айтарлықтай айырмашылықта болуына рұқсат берілмейді. Мемілекеттік стандарт бойынша трансформаторлар үшін *K<3* және өзіндік мұқтаждықтар қосалқы станцияларындағы трансформаторлар үшін *ΔK≤1%*, басқа барлық трансформаторлар үшін *ΔK≤0,5%*.

4.1.3 Қысқаша тұйықтау кернеулері бірдей болмайтын трансформаторлардың параллель жұмысы.

Параллель жұмыс істейтін екі трансформатор α мен β бірінші және екінші шарттарды қанағаттандырады, бірақ үшінші шартты қанағаттандырмайды деп болжайық. Онда бірінші реттік орамаларды ортақ желіге қосқан кезде екінші реттік *ЭҚК* тең болады $\dot{E}_{2\alpha} = \dot{E}_{2\beta}$. $u_{K\alpha} > u_{K\beta}$ болса, онда α трансформатор, β трансформатордан аз жүктеледі, себебі $u_{*K} = Z_{*K}$ және сондықтан $Z_{*K\alpha} > Z_{*K\beta}$.



4.5 сурет – Параллель жұмыс жасайтын трансформаторлардың орынбасу сұлбасы

Параллель жұмысқа қосылатын трансформаторлардың әрбіреуі үшін u_K мәні, барлық трансформаторлардың қысқаша тұйықтау кернеулерінің арифметикалық орташа мәнінен 10% артық айырмашылықта болмауы керек және олардың номинал қуаттарының қатынасы 3:1 қатынасынан аспауы керек.

5 Дәріс №5. Айнымалы ток машиналары теориясының ортақ сұрақтары

Дәрістің мазмұны:

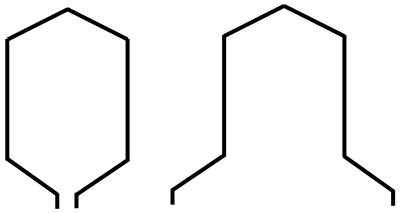
- айналушы магнит өрісінің пайда болу принципі;
- үш фазалы орамалардың сұлбалары.

Дәрістің мақсаты: айнымалы ток машиналары үшін кейбір ортақ теория сұрақтары мен құрылыстық бөліктері жөнінде түсінік беру.

Айнымалы токтың асинхронды және синхронды машиналарының жұмыс істеу принциптерінде және құрылысында айырмашылықтар болуына қарамастан, олардың теориясының негізінде орамаларда ЭҚК пайда болуына, машинаның магнит өрісінің пайда болуына және жиілікке, орамалар құрылысына және олардың индуктивті кедергілерін есептеуге, машинаның электрлік және магниттік шығындарына және кейбір басқада сұрақтарға байланысты бірқатар ортақ жағдайлар бар. Бұл, барлық көп фазалы машиналардың жұмыс істеуі айналушы магнит өрісі принципіне негізделуіне байланысты және сондықтан олардың теориясы ортақ болады.

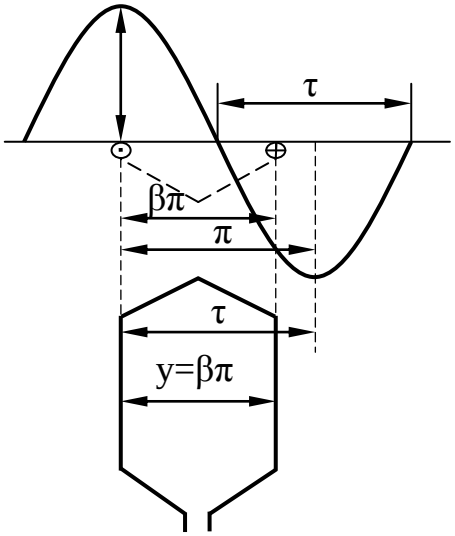
5.1 Айнымалы ток машиналарының статор орамалары

Статор орамалары екі қабатты және бір қабатты болады. Екі қабатты орамаларда секцияның активті жақтары статор ойықтарында екі қабатпен орналасады. Бір қабатты орамаларда орамалардың секциялары статор пазаларында бір қабатпен орналасады. Қазіргі кездегі айнымалы ток машиналарында орамаларды негізінен екі қабатты етіп орындайды. Түрі бойынша секциялар тұзақты және толқынды болып бөлінеді.



5.1 сурет – Толқындық және тұзақтық секциялар

Айнымалы ток машиналарының статор орамалары әрқашан дерлік таралған болып жасалады. Таралған орама секциялардан тұрады, олар бір орамды немесе көп орамды болуы мүмкін, дегенмен әдетте, көп орамды. Секциялар көлденен қимасы дөңгелек немесе тік бұрышты болатын оқшауламаланған мыстан немесе алюминиден жасалған сымдармен дайындалады.



5.2 сурет - Қысқа адымдық секциялар

Бір секцияның активті жақтарының арасындағы қашықтықты ораманың қадамы *y* деп атайды. Егер қадам полюстік бөлікке τ тең болса, онда ол толық немесе диаметрлік деп аталады. Қадам қысқартылған да болуы мүмкін, ол полюстік бөліктен аз болады ($y < \tau$) (5.2 сурет).

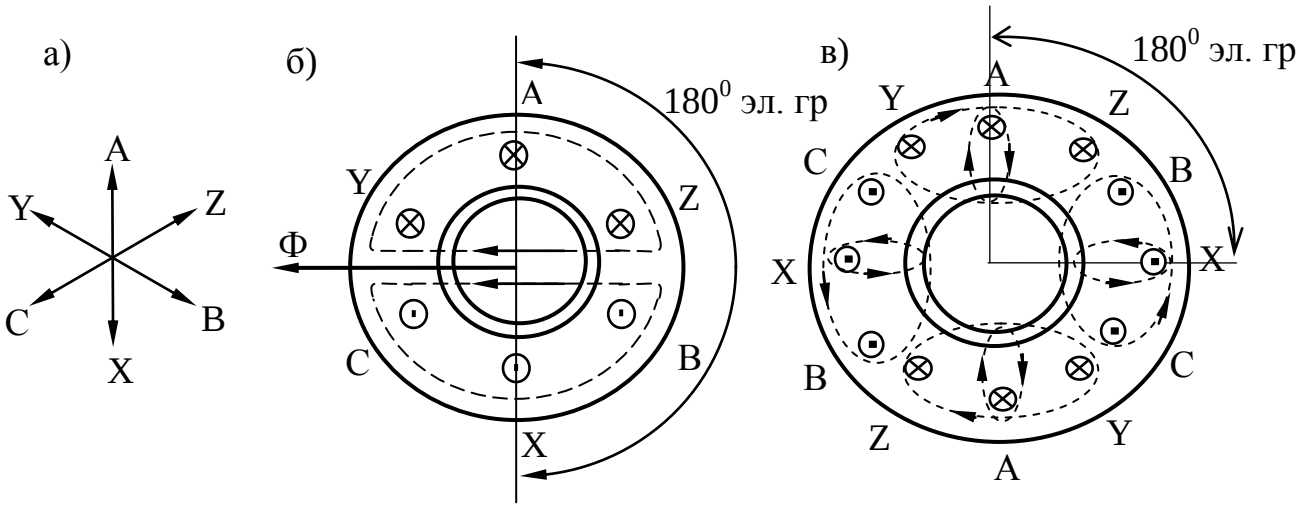
Қысқартылған қадамды орамалар жиі қолданылады, себебі қадамды қысқарту магниттеуші күштердің түрін, оны синусоидаға жақындатып жақсартады және маңдайлық бөліктерды қысқарту есебінен мысты үнемдейді.

Статор орамалары бір фазалы, екі фазалы және үш фазалы болуы мүмкін.

Үш фазалы орама кеңістікте статордың шеңбері бойынша бір бірімен салыстырғанда 120 эл. градусқа ығысқан үш бір фазалы орамалардан тұрады, яғни екі полюстік бөліктің 1/3 бөлігіндей.

Асинхронды қозғалтқыштарда айқындалған полюстер жоқ. Бірақ статор орамалары екі полюсті, төрт полюсті және көп полюсті болуы мүмкін. Ол, статор орамасы бойынша ток жүрген кезде қандай магнит өрісі пайда болатынына тәуелді болады. Соңғысы орама қадамының ұзындығымен және оны жалғау сұлбасымен анықталады. Бұны түсіну үшін 5.3 суретке қараймыз, онда орамалары үш фазалы екі статор бейнеленген. Бірінші статор орамасы

екі полюсті *2p=2* өріс тудырады. Екінші статор орамасы төрт полюсті *2p=4* өріс тудырады.



а) жұлдызша ЭҚК; б) екі полюсті орама; в) төрт полюсті орама.

5.3 сурет – Үш орамды статор орамалары

Егер статорда екі полюсті орама орналасса, онда бір геометриялық градусқа 1 эл. градус тура келеді. Бір полюстік бөлік τ 180 эл. градусқа тура келеді (5.3б сурет). Егер статорда төрт полюсті орама орналасса (5.3в), онда 1 геометриялық градус 2 эл. градусқа тура келеді, себебі полюстік бөлік τ (180 эл.градус) шеңбердің төрттен бір бөлігін алады, яғни 90 геометриялық градусты. Жалпы жағдайда 1 геометриялық градус p электрлік градусқа тура келеді (p – жұпталған полюстер саны).

2p=4 болған кезде полюстік бөлік шеңбердің төрттен бір бөлігін құрайды және статордың үш фазалы қарапайым орамасының әрбір фазасы қадамы $y=\tau$ болатын екі орамнан тұрады, олар бір-біріне қатысты 2τ ығысқан және бір-бірімен тізбектеп немесе параллель қосылуы мүмкін.

Жеке фазалар және олардың бастары A,B,C бұл кезде де бір-біріне қатысты 120^0эл. градусқа немесе бұл жағдайда шеңбердің 1/6 бөлігіне ығысқан. Суретте көрсетілгендей, мұндай орама *2p=4* болатын өріс тудырады. Бұл өріс те айналушы болады және токтың бір периодында ол да 2τ – ға немесе бұл жағдайда шеңбердің жартысына бұрылады, осының салдарынан өрістің жылдамдығы:

$$n_1 = \frac{f_1}{p} \text{айн/сек} \quad \text{немесе} \quad n_1 = \frac{f_1\,60}{p} \text{айн/мин.} \qquad (5.1)$$

Жалпы жағдайда ораманы *2p=6,8,10* және т.б. болатындай етіп дайындайды. Бұл кезде p жұпталған полюсті магнит өрісі алынады.

Статор шеңберінің бойымен өрістің сызықтық айналу жылдамдығы:

$$v_1 = \pi D_a \, n_1 = 2\text{p}\tau \frac{f_1}{\text{p}} = 2\tau f_1, \qquad (5.2)$$

мұнда D_a – статордың диаметрі.

Айнымалы ток орамаларын құрастырған кезде, ауа саңылауында айналушы өрістің индукциясы шеңбердің бойымен мүмкіндігінше синусоидаға жақын болып таралуын қамтамасыз етуге ұмтылады.

Суретте үш фазалы орама бейнеленген, оның әрбір фазасы бір орауыштан тұрады. Мұндай орама шоғырланған деп аталады. Негізінен таралған орамалар қолданылады, олар полюске және фазаға келетін ойықтар санымен сипатталады:

$$q = \frac{Z}{2pm_1},$$

мұнда Z – статордағы ойықтар саны;

m_1 – фазалар саны;

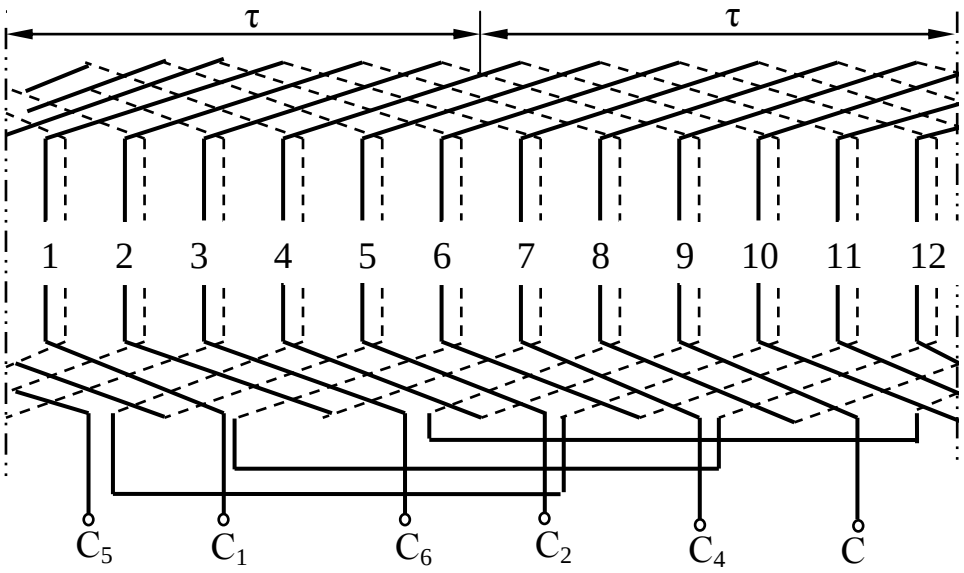
$2p$ – полюстер саны.

Көптеген машиналарда полюске және фазаға келетін ойықтар саны бірден көп болады $q>1$.

Үш фазалы машинада үш фаза болады және олардың әрбіреуіне келетін статордағы ойықтар саны бірдей болады. Әрбір полюстік бөлікте барлық үш фазаның өткізгіштері бар ойықтар орналасады.

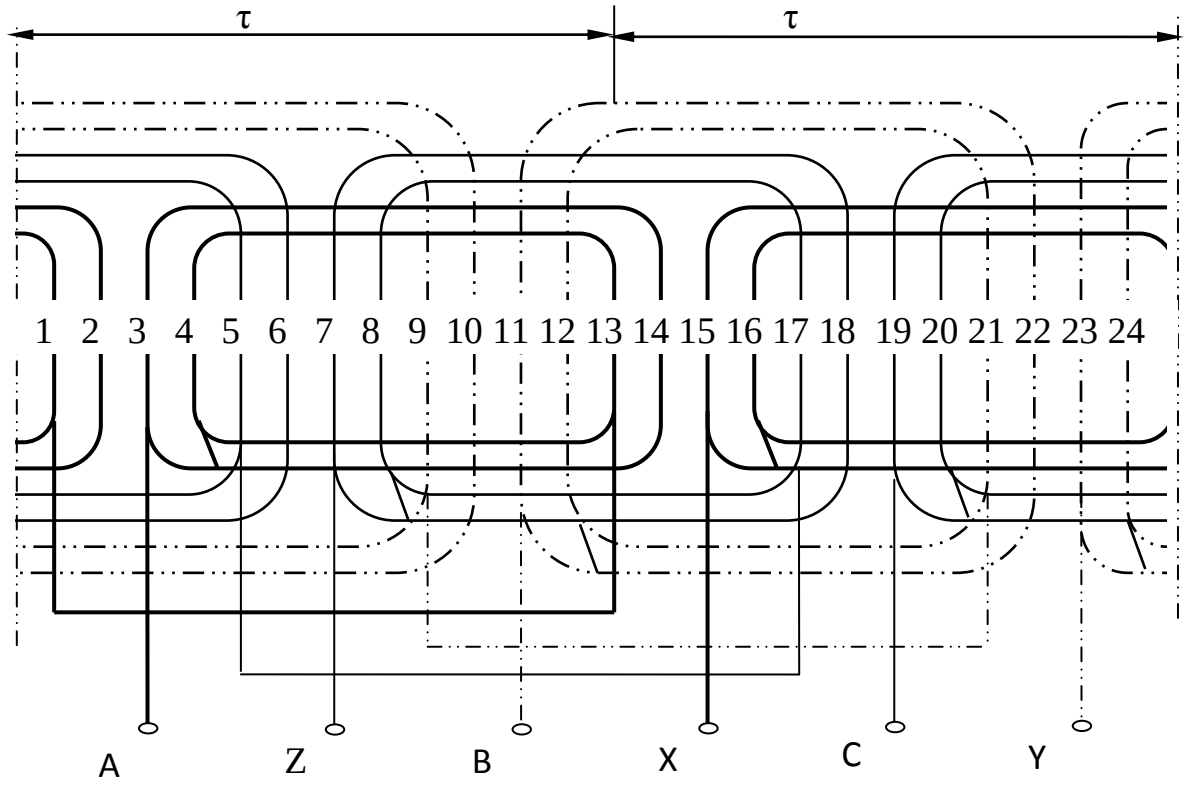
5.4 және 5.5 суреттерде бір қабатты және екі қабатты орамалардың жаймаларының сұлбалары бейнеленген.

A	A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y
A	Z	Z	B	B	X	X	C	C	Y	Y	A



5.4 сурет – Екі қабатты орама 2p=2, Z=12, q=2, y =6

A A A A Z Z Z Z B B B B X X X X C C C C Y YY Y



5.5 сурет - Z=24, 2p=2, q=4 үш жазықтықты концентритикалық орама

5.2 Асинхронды машиналар

Асинхронды машина деп, оның роторының айналу жылдамдығы жүктемеге тәуелді болатын айнымалы ток машинасын атайды. Асинхронды машинаның магнит өрісі статор және ротор орамаларындағы айнымалы токпен пайда болады. Ротордың айналу жылдамдығы өрістің айналу жиілігінен өзгеше болады.

5.2.1 Асинхронды машинаның құрылысы.

Машинаның қозғалмайтын бөлігі статор деп, ал қозғалатын бөлігі ротор деп аталады. Асинхронды машинаны ротордың құрылысы бойынша екі түрге бөледі: *түйіспелік сақиналы* немесе *фазалық роторлы* және *қысқаша тұйықталған роторлы.*

Фазалық роторлы және *қысқаша тұйықталған роторлы* қозғалтқыштардың статорларының құрылысы бірдей болады.

Статордың және ротордың өзекшесін екі жағы оқшауламалық лакпен жабылған, қалыңдығы 0,35÷0,5 мм болатын электртехникалық болат табақшалардан жинайды.

Статордың цилиндр тәріздес ішкі бетінде және ротордың цилиндр тәріздес сыртқы бетінде ойықтар болады, оларда статор және ротор орамаларының өткізгіштері орналастырылады. Статор орамасы үш фазалы болып жасалады және үш фазалы ток желісіне қосылады, сондықтан бірінші реттік деп аталады.

1) Фазалық ротор.

Ротор орамасының құрылысы статор орамасына ұқсас үш фазалы болып жасалады. Мұндай ротор орамаларындағы фазалардың соңдарын әдеттегіше жұлдызша жалғайды, ал бастарын түйіспелік сақиналардың және металл графиттік щеткалардың көмегімен сыртқа шығарады. Түйіспелік сақиналарға үш фазалы жүргізуші немесе реттеуші реостат қосылады. Ротордың фазалық орамасындағы полюстер саны статордағы сияқты магнит өрісінің полюстер санына тең болады.

2) Қысқа тұйықталған ротор.

Ротор орамасы тиін торлар түрінде орындалған. Бұл кезде әрбір ойықта мыстан немесе алюминиден жасалған оқтауша болады және барлық оқтаушалардың соңдары ротордың екі шетіндегі мыстан немесе алюминиден жасалған сақиналармен жалғанады, олар оқтаушаларды қысқаша тұйықтайды. Оқтаушаларды әдетте өзекшеден оқшауландырмайды.

Асинхронды машинаның статоры мен роторының арасындағы ауа саңылауын өндірістің шарттары және жұмысының сенімділігі бойынша мүмкіндігінше аз етіп жасайды және машина қаншама үлкен болса саңылау да соншалықты үлкен болады. Қуаты бірнеше *кВт* болатын машиналардағы ауа саңылауының мөлшері 0,4÷0,5мм, ал өте үлкен қуатты машиналардағы ауа саңылауы бірнеше миллиметр болады.

Асинхронды машина әдеттегідей ауамен суытылады.

6 Дәріс №6. Асинхронды машинаның жұмыс істеу принціпі. Теңдеулері мен орынбасу сұлбалары

Дәрістің мазмұны:

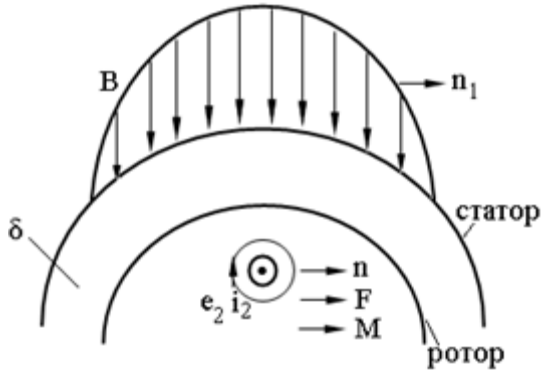
- асинхронды машинаның құрылысы мен жұмыс істеу принціпі;
- асинхронды машинаның роторы қозғалмай және айналып тұрған кездегі жұмысы.

Дәрістің мақсаты: трансформаторлардың теориясын асинхронды машиналар үшін де қолдануға болатынын көрсету.

6.1 Асинхронды машиналардың қозғалтқыш режиміндегі жұмыс істеу принціпі

Үш фазалы желіге қосылған статор орамасындағы үш фазалы ток, магнит өрісін тудырады, оның бірінші гармоникасы статорға қатысты $n_1=f_1/p$ жылдамдықпен айналады. Өріс статор орамасының өткізгіштерін қиып өтіп, оларда ЭҚК индукциялайды, оның бағыты *оң қол ережесімен* анықталады.

Егер ротор тізбегі тұйықталса, ол арқылы ток жүреді. Ротор тізбегі таза активті кедергіден тұрады делік, онда ток пен ЭҚК бір жаққа бағытталған. Ротор тогы өзінің магнит өрісін тудырады. Бұл екі өрістің (статордың және ротордың) өзара әрекеттесуінен электромагниттік момент пайда болады. Магнит өрісіндегі тогы бар өткізгішке әсер ететін күштің бағытын *сол қол ережесі* бойынша анықтауға болады.



6.1 сурет - Үш фазалы магнит өрісі

Ротордың n айналу жылдамдығы, n_1 ден міндетті түрде айырмашылықта болуы керек, себебі $n=n_1$ болған кезде ротор статор өрісіне қатысты қозғалмайды, сондықтан ротор орамасындағы ЭҚК мен ток нөлге тең болады және электромагниттік момент болмайды.

Салыстырмалы бірлікте көрсетілген, n мен n_1 жылдамдықтарының айырымы:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \qquad \text{немесе пайызбен } s = \frac{n_1 - n}{n_1} 100\% \qquad (6.1)$$

асинхронды машинаның сырғымасы деп аталады және машинаның жұмысын анықтайтын ең маңызды шамалардың бірі болады.

Қозғалтқышты жүргізген кезде $n=0$, $s=1$, ал ротор статор өрісімен синхронды немесе синхронды жылдамдықпен айналған кезде $n=n_1$, $s=0$. Қозғалтқыш режимінде әрқашан $0<n<n_1$ и $1>S>0$.

6.2 Роторы қозғалмай тұрған кездегі үш фазалы асинхронды машина

Роторы қозғалмай тұрған кездегі асинхронды машина трансформаторды елестеді, оның әдеттегі трансформатордан айырмашылығы тек қана құрылысында болады, яғни онда жайылған статор және ротор орамасының, ауа саңылауының және т.б. болуы. Физикалық құбылыстың мәніне келсек, онда ол екі жағдай үшін де бірдей болады. Сонан соң асинхронды машина жөніндегі көріністі трансформатор ретінде, сондай-ақ оны роторы айналып тұрған машина үшінде таратуға болады.

Төменде роторында фазалық орамасы бар үш фазалы асинхронды машина қарастырылады, бұл жағдайда қалауы бойынша ротор тізбегін ажыратуға, қысқаша немесе кедергі арқылы тұйықтауға болады.

Жұмысын зерттеген кезде барлық айнымалы шамалардың – ЭҚК, токтың, МҚК тек қана бірінші гармоникасы есепке алынады.

Статор орамасы желіге қосылады. Екінші реттік орама кейбір кедергілермен тұйықталады. U_1 кернеудің әсерінен статор орамасы бойынша I_o ток жүреді. Бұл токтан пайда болған МҚК F_1 магнит ағынын тудырады,

оның бір бөлігі $Ф_m$ статор және ротор орамаларымен, ал басқа бөлігі $Ф_{σ1}$ тек қана статор орамасымен ілігеді. Бірінші ағын негізгі, екіншісі статордың сейілу ағыны болып шығады. F_1 және $Ф_m$ $n_1=f_1/p$ *[айн/сек]* жылдамдықпен айналады.

$Ф_m$ қозғалтқыш қозғалмай тұрған кезде статор және ротор орамаларында келесі өрнектермен анықталатын E_1 мен E_2 *ЭҚК* тудырады:

$$E_1 = \pi\sqrt{2}\, f_1 w_1 k_{\text{ор}1} \Phi_m = 4{,}44 f_1 w_1 k_{\text{ор}1} \Phi_m; \qquad (6.2)$$

$$E_2 = \pi\sqrt{2}\, f_1 w_2 k_{\text{ор}2} \Phi_m = 4{,}44 f_1 w_2 k_{\text{ор}2} \Phi_m, \qquad (6.3)$$

мұнда $k_{\text{ор}1}$ және $k_{\text{ор}2}$ - статор мен ротор орамаларының орамалық коэффициенттері.

$Ф_{σ1}$ мен $Ф_{σ2}$ статор және ротор орамаларында тудыратын сейілу ЭҚК $E_{\sigma 1} = -jI_0X_1$ және $E_{\sigma 2} = -jI_0X_2$,

мұнда X_1 мен X_2 – статор және ротор орамаларының индуктивті сейілу кедергілері.

Бұдан басқа, статор және ротор орамаларында R_1 мен R_2 активті кедергілер болады. Жоғарыда айтылғандарды ескеріп трансформаторға жазғандай, асинхронды машинаның бірінші және екінші реттік орамалары үшін де кернеулердің теңдеулерін жаза аламыз:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + R_1\dot{I}_1;$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} - R_2\dot{I}_2;$$

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2. \qquad (6.4)$$

Санына қатысты екі теңдеулер жүйесінің арасында елеулі айырмашылық бар. Себебі асинхронды машиада ауа саңылауы болады, сол себептен I_0 тогы номинал I_H токтың 20 дан 50% дейінгі мөлшерін құрайды, (трансформаторларда номиналдың 3÷10%) мұнан басқа, асинхронды машинаның орамаларындағы кедергі трансформатордағылармен салыстырғанда көп болады. Сондықтан асинхронды машинадағы статор орамасына түсетін кернеу бос жүріс кезінде номинал кернеудің U_H 2÷5% құрайды (трансформаторларда номинал кернеудің 0,1÷0,4% болады).

6.2.1 Келтірілген асинхронды машина және трансформациялық коэффициент.

Асинхронды машиналарда, трансформатордағыдай, екінші реттік ораманы біріншіге келтіреді. Бұл кезде екінші реттік ораманың параметрлері трансформаторлардағыдай қайта есептеледі. Тек қана трансформациялық коэффициентте айырмашылық болады.

$$K_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 f_1 W_1 K_{ор2} \Phi_m}{4.44 f_1 W_2 K_{ор2} \Phi_m} = \frac{W_1 K_{ор1}}{W_2 K_{ор2}} \ . \qquad (6.5)$$

6.3 Асинхронды машинаның роторы айналған кездегі жұмысы

Асинхронды машинаны роторы айналмай тұрған кезде ғана емес, сондай-ақ роторы айналған кезде де трансформатор ретінде қарастыруға болады. Бұл жағдайда ол жалпыланған трансформатордай болады, яғни бұл кезде тек қана кернеулер, токтар және фазалар саны емес, сондай-ақ жиілік және энергияның тегі де түрлендіріледі.

1) Статор орамасындағы кернеулердің теңдеуі.

Асинхронды машина кернеуі U_1 және жиілігі f_1 тұрақты болатын желіге қосылады деп болжайық. Асинхронды машинаның роторы айналған кезде статорда, роторы тежелген машинадағыдай ЭҚК болады және сондықтан екі жағдай үшін де кернеулердің теңдеуі бірдей болып жазылады.

2) Ротор орамасында индукцияланатын ЭҚК жиілігі.

n_1 жылдамдықпен айналатын магнит өрісінде ротор n жылдамдықпен айналған кезде, барлығы егер ротор айналмай тұрғанда магнит ағыны $\Phi_м$ онымен салыстырғанда:

$$n_2 = n_1 - n = n_1(1 - s) = \frac{f_1}{p}(1 - s) \ , \qquad (6.6)$$

жылдамдықпен айналып тұрғандай болып өтеді демек, ротор орамасында индукцияланатын ЭҚК жиілігі:

$$f_2 = p(n_1 - n) = pn_1 \frac{n_1 - n}{n_1} = f_1 S. \qquad (6.7)$$

тең болады.

3) Ротордың ЭҚК:

$$E_{2S} = 4{,}44 f_2 W_2 k_{\text{ор2}} \Phi_m = 4{,}44 f_1 W_2 S k_{\text{ор2}} \Phi_m = E_2 S, \qquad (6.8)$$

мұнда E_2 – қозғалмай тұрған ротордың *ЭҚК* (3.3).

Егер, мысалы $n=0$ болған кезде және ротор ажыратулы болғанда сақиналарда $U_2=E_2=500$ В болады, онда ротордың n айналу жылдамдығын $n=n_1$ дейін ақырындап өсіріп E_{2S} *ЭҚК* $E_{2S}=500$ В ден $E_{2S}=0$ дейін өзгертеміз.

4)Ротордың активті кедергісі.

Ротор тізбегінің активті кедергісі сырғуға тәуелсіз болады:

$$R_2 = r_2 + R_Д, \qquad (6.9)$$

мұнда r_2 – ротор орамасының активті кедергісі,

$R_Д$ – түйіспелік сақина арқылы тізбекке қосылатын қосымша кедергі.

$R_2 = r_2 + R_Д = const$ деп есептейміз.

5) Индуктивті сейілу кедергісі :

$$X_{2S} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 S L_2 = X_2 S, \qquad (6.10)$$

мұнда L_2 – ротор орамасының сейілу индуктивтілігі, сейілу ағыны ауа бойынша өтетіндіктен $L_2 \approx const$;

X_2 - қозғалмайтын ротордың индуктивті кедергісі.

Онда роторлық кернеулерінің теңдеуі:

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{S2} = R_2 \dot{I}_2 \text{ содан}$$
$$\dot{E}_2 S = R_2 \dot{I}_2 + jX_2 S\dot{I}_2 = \dot{I}_2\left(R_2 + j\dot{X}_2 S\right) = Z_{2S}\dot{I}_2, \qquad (6.11)$$

мұнда $Z_{2S} = R_2 + jX_{2S}$ – айналып тұрған роторлық толық кедергісі.

6) Магниттік тепе-теңдік теңдеуі.

Магниттік тепе-теңдік теңдеуі, егер ротор мен статордың МҚК бір – бірімен салыстырғанда қозғалмайтын болса дұрыс болады.

Ротор орамасы бойынша өтетін ток I_2 ротормен салыстырғанда ротор тогының жиілігіне *f2* сәйкес келетін *n2* жылдамдықпен айналып F_2 тудырады. Бұдан басқа ротордың өзі *n* жылдамдықпен айналады. Демек, F_2 қандайда – бір қозғалмайтын нүктеге қатысты, мысалы статорға, $n_2 + n$ жылдамдықпен айналады:

$$n + n_2 = n_1 - n + n = n_1 \qquad (6.12)$$

Яғни роторлық *МҚК* F_2 арқашан кеңістікте (жұмыс режиміне тәуелсіз) статордың *МҚК* F_1 тең жылдамдықпен және сол бағытта айналады, олай болса олар бір - біріне қатысты қозғалмайды. Бұл көз қарас бойынша қозғалмайтын және айналатын ротор арасында айырмашылық жоқ, бірақ мұнда F_2 МҚК жылдамдығы n_2 және *n* жылдамдықтардың қосындысы болады.

F_1 және F_2 *МҚК* бір – бірімен салыстырғанда қозғалмайтындықтан, онда F_0 ескеріп сол қатынасты алады, яғни ротор айналып тұрған кездегі МҚК теңдеуі ротор қозғалмай тұрған кездегідей болады:

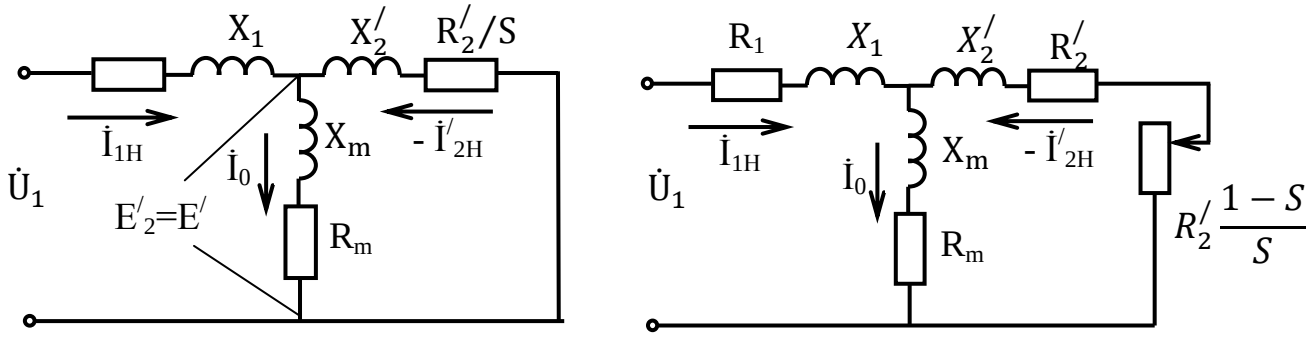
$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0, \quad \dot{I}_1 + \dot{I}_2^{/} = \dot{I}_0, \quad \dot{I}_1 = -\dot{I}_2^{/} + \dot{I}_0. \qquad (6.13)$$

Роторы айналып тұрған кездегі келтірілген асинхронды қозғалтқыштың теңдеуі:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1\dot{I}_1 + jX_1\dot{I}_1 = -\dot{E}_1 + Z_1\dot{I}_1,$$
$$0 = \dot{E}_2^{/} - jX_2^{/}\dot{I}_2^{/} - \frac{R_2^{/}}{S}\dot{I}_2^{/}; \qquad (6.14)$$
$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2^{/} + \dot{I}_0.$$

6.4 Асинхронды қозғалтқыштың орынбасу сұлбасы

Теңдеу бойынша орынбасу сұлбасын сызуға болады



3.2 сурет– Орынбасу сұлбасы

$\frac{R_2^/}{S}$ кедергісін келесідей түрде жазуға болады:

$$\frac{R_2^/}{S} = \frac{R_2^/}{S} + R_2^/ - R_2^/ = R_2^/ + R_2^/ \frac{1-S}{S}. \qquad (6.15)$$

Онда R_2' - ротор фазасындағы ораманың $n = 0 (S = 0,)$ болған кездегі келтірілген активті кедергісі, ал $R_2^/ \frac{1-S}{S}$ - сырғуға тәуелді болатын кедергі, онда асинхронды қозғалтқыштың механикалық қуаты бөлінеді. Орынбасу сұлбасы асинхронды қозғалтқыштың барлық жұмыс режимдерін бейнелейді. Шеткі екі режимді қарастырамыз.

Сырғанау $S = 0, n = n_1$ болған кезде – идеалды бос жүріс режимі, бұл кезде $R_2^/ \frac{1-S}{S} \to \infty$.

Сырғанау $S = 0, n = 0$ болған кезде – қысқаша тұйықтау режимі немесе жүргізу режимі, бұл кезде $R_2^/ \frac{1-S}{S} = 0$.

7 Дәріс №7. Асинхронды машинаның режимдері мен қуаттары

Дәрістің мазмұны:

- асинхронды машинаның қуаттары;
- асинхронды машинаның қозғалтқыш, генератор және электромагниттік тежеуіш режимдері.

Дәрістің мақсаты:

- қайтымдылық принципін көрсету;
- асинхронды қозғалтқыштың әртүрлі режимдердегі жұмысының артықшылығы мен кемшіліктерін көрсету.

7.1 Асинхронды машинаның режимдері мен қуаттары

7.1.1 Қозғалтқыш режимі.

Орынбасу сұлбасына сәйкес асинхронды қозғалтқыштардағы қуаттың түрлену үрдісін қарастырамыз.

Асинхронды машинаның желіден тұтынатын активті қуаты:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 cos\varphi_1. \qquad (7.1)$$

Бұл қуаттың бір бөлігі электрлік шығын түрінде статор орамасында:

$$p_{эл1} = m_1 I_1^2 R_1, \qquad (7.2)$$

және магниттік шығын түрінде статор өзекшесінде жоғалады:

$$p_{мг1} = m_1 I_M^2 R_M = \frac{m_1 E_1^2}{R_{мг}} = \frac{m_1 U_{12}^2}{R_{мг}}. \qquad (7.3)$$

Қуаттың қалған бөлігі электромагниттік қуат деп аталады және ол роторға беріледі:

$$Р_{ЭМ} = P_1 - р_{эл} - р_{мг1}; \qquad P_{эм} = m_1 I_2^{/2} \frac{R_2^/}{s} = m_2 I_2^2 \frac{R_2}{s}, \qquad (7.4)$$

оның бір бөлігі ротор орамасындағы электрлік шығын түрінде жоғалады:

$$p_{эл2} = m_1 I_2^{/2} R_2^/ = m_2 I_2^2 R_2, \qquad (7.5)$$

ал, қалғаны – механикалық қуатқа айналады:

$$P_{мх} = P_{эм} - p_{эл2}; \qquad P_{мх} = m_1 I_2^{/2} R_2^/ \frac{1-s}{s} = m_2 I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s}. \qquad (7.6)$$

Пайдалы қуат механикалық қуаттан механикалық және қосымша шығындарды алған кездегі механикалық қуатқа тең болады:

$$P_2 = P_{мх} - p_{мх} - p_{құал}. \qquad (7.7)$$

Қозғалтқыштағы шығындардың қосындысы:

$$p_{\sum} = p_{эл1} + p_{мг} + p_{эл2} + p_{мх} + p_{құал}.$$

(6.21) және (6.22) өрнектерден шығатыны, ол:

$$p_{эл2} = sP_{эм}; \qquad P_{мх} = (1-s)P_{эм}\ . \qquad (7.8)$$

Яғни ротор оамасындағы шығындар аз болу үшін, машинаның сырғанауы аз болатындай етіп жобалау керек.

Пайдалы әсер коэффициенті:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - p_\Sigma}{P_1} = 1 - \frac{p_\Sigma}{P_1}. \qquad (7.9)$$

Қуаты *P=1÷1000 кВт* қозғалтқыштардың номинал жүктеме кезіндегі ПӘК η=0,7÷0,95 аралығында болады. Үлкен мәндер қуаты көп және айналу жылдамдығы үлкен болатын қозғалтқыштарға тиісті.

7.1.2 Генератор режимі $-\infty < S < 0$.

Асинхронды машина (АМ) кернеуі U_1=const және жиілігі *f=const* желіге қосылған делік. Егер біз жылдамдықты $n > n_1$ дейін өсірсек, онда сырғанау *S* теріс болады. Ағын Φ_{m1} шамасы бойынша тұрақты бола отырып, кеңістікте бұрынғы жылдамдығымен n_1 айналуын жалғастыра береді, бірақ оның айналу бағыты роторға қатысты кері бағытқа өзгереді, осыған сәйкес роторда индукцияланатын $E_{2S}=E_2S$ ЭҚК таңбасы өзгереді.

Онда ротор тогының активті және реактивті құрамдары келесідей болады:

$$I_{2a}^{/} = \frac{E_2^{/}S}{\sqrt{R_2^{/2} + X_2^{/2}S^2}} \cdot \cos\psi_2 = \frac{E_2^{/}S}{\sqrt{R_2^{/2} + X_2^{/2}S^2}} \frac{R_2^{/}}{\sqrt{R_2^{/2} + X_2^{/2}S^2}} < 0; \qquad (7.10)$$

$$I_{2r}^{/} = \frac{E_2^{/}S}{\sqrt{R_2^{/2} + X_2^{/2}S^2}} \cdot \sin\psi_2 = \frac{E_2^{/}S}{\sqrt{R_2^{/2} + X_2^{/2}S^2}} \frac{X_2^{/}S}{\sqrt{R_2^{/2} + X_2^{/2}S^2}} > 0. \qquad (7.11)$$

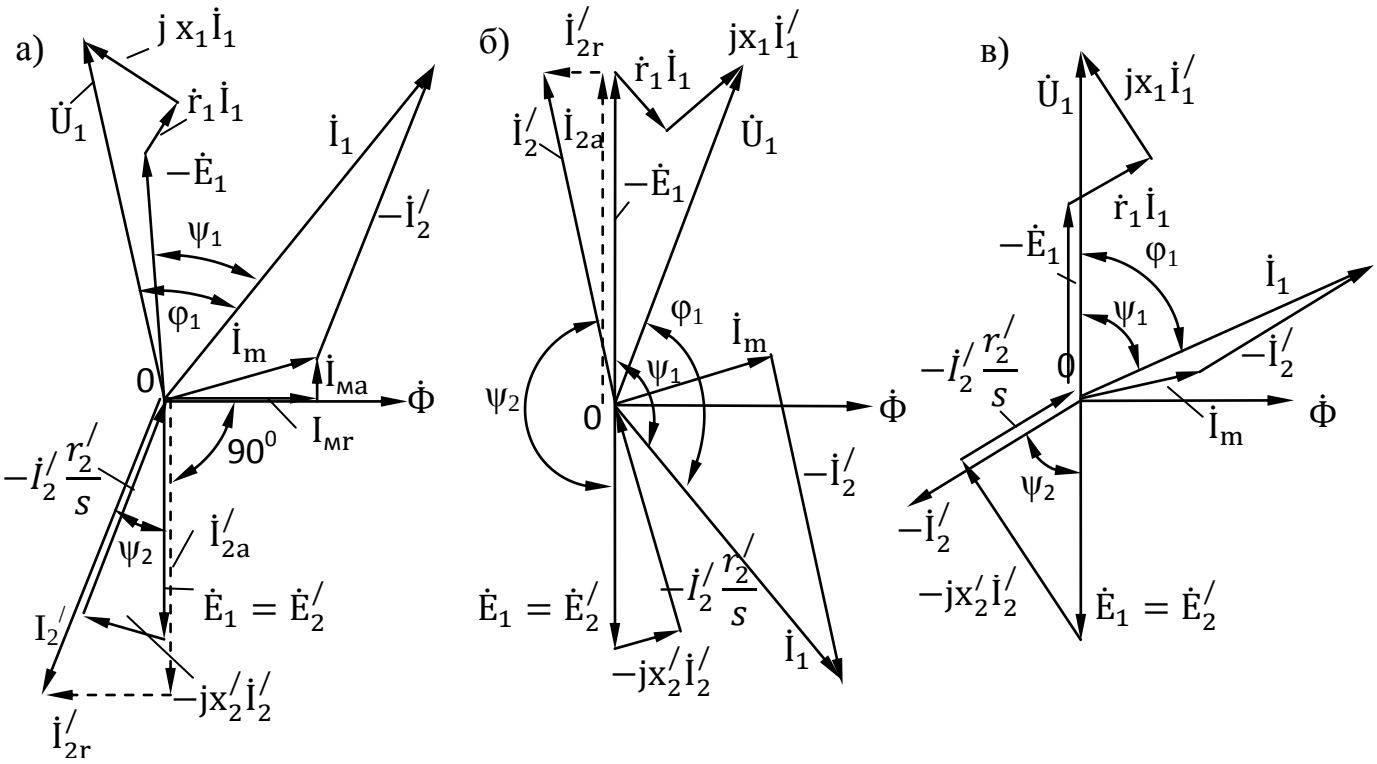
Біз, сырғанау теріс болған кезде екінші реттік токтың активті құрамының таңбасы өзгеретінін, онда бұл токтың индуктивті құрамы өзінің таңбасын сақтайтынын көреміз. Ток ротордың айналу бағытына қатысты қарсы бағытта болатын күш туғызады. Сондықтан, $M_{ЭМ}$ тежеуші момент болады және АМ генератор режимінде жұмыс істейді. Бұл енді машина қозғалтқыш режиміндегідей тұтынбайтынын, ал желіге активті қуат пен активті токты беретінін көрсетеді, яғни генератор режимінде жұмыс істейді және біліктен тұтынатын механикалық энергияны электрлікке түрлендіреді.

Машина қозғалтқыш режимінен генераторға өткен кезде реактивті ток және реактивті қуат өздерінің таңбаларын сақтайды. Ол асинхронды генератор да желіден реактивті қуат пен реактивті токты тұтынатынын білдіреді, бұл оларды пайдалануды шектейтін асинхронды генератордың айтарлықтай кемшілігі болады.

7.1.3 Қарама-қарсы қосу режимі 1< S< ∞.

Бұл режимде асинхронды машинаның роторы сырттан роторға берілетін механикалық энергияның әсерінен өрістің айналуына қарсы бағытта

айналады, осының салдарынан ротордың айналу жылдамдығы $n < 0$. Әдетте практикада бұл режимде 1<S<2.



а) қозғалтқыштық режим; б) генераторлық режим; в) кері қосу.

7.1 сурет – Асинхронды машинасының векторлық диаграммалары

Қозғалтқыш, сондай-ақ қарама-қарсы қосу режимінде S>O болатындықтан, (6.25 және 3.26) өрнектеріне сәйкес екінші реттік токтың активті және реактивті құрамдарының таңбалары қарама-қарсы қосу режимінде оң болады. Машина желіден активті қуат тұтынады және өрістің айналу бағытымен бағыттас әсер ететін оң таңбалы айналдырушы моментті үдетеді. Бірақ, ротор кері бағытта айналатындықтан оны бұл момент тежейді.

Қарама-қарсы қосу режимінде машинада біліктен механикалық энергияны тұтынады. Сыртқы айналдырушы момент ротордың айналу бағытымен бағыттас әсер ететіндіктен, онда желіден тұтынатын қуатта, сондай-ақ біліктен тұтынатын қуатта машинадағы шығынға жұмсалады. Сондықтан машина пайдалы қуат үдетпейді, қызуға қатысты ауыр режим болады. Бұл режим қысқа мерзімге ғана рұқсат етіледі.

7.2 Асинхронды машиналардың айналдырушы моменттері мен механикалық сипаттамалары

7.1.1 Сырғанаудың электромагниттік моментке туәлділігі:

$$M = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\Omega_1} = \frac{p_{\text{эл2}}}{S\Omega_1} = \frac{m_2 I_2'^2 R_2'}{\frac{S\omega_1}{p}} = \frac{m_1 p I_2'^2 R_2'}{S 2\pi f_1}, \qquad (7.12)$$

мұнда $P_{ЭМ}$ – электромагниттік қуат;

Ω_1- статор өрісінің механикалық бұрыштық айналу жылдамдығы.

Моментті берілген фазалық кернеу U_1, машинаның параметрлері және сырғанау арқылы жазамыз. Ол үшін осы шамалар арқылы I_2' көрсетеміз және (3.27) қоямыз.

Асинхронды машинаны оқып үйренген кезде Г-тәріздес деп аталатын басқа орынбасу сұлбасы пайдаланылады, онда $\dot{I}_{00}$ тогы бар магниттелуші тармақ сыртқы желінің кернеуі U_1 қыспақтарға шығарылады, бұл кезде ток $I_2'' \cong I_2'$.

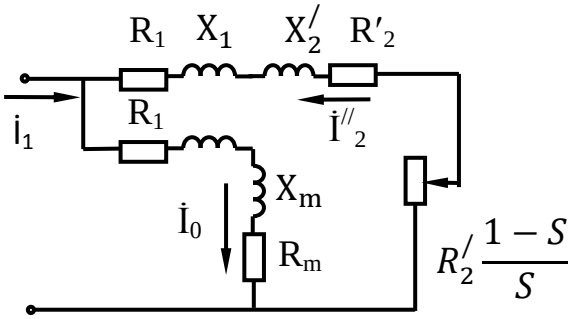
Г - тәріздес орынбасу сұлбасынан:

$$I_2'' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + R_2'/S\right)^2 + \left(X_1 + X_2'\right)^2}} \quad . \qquad (7.13)$$

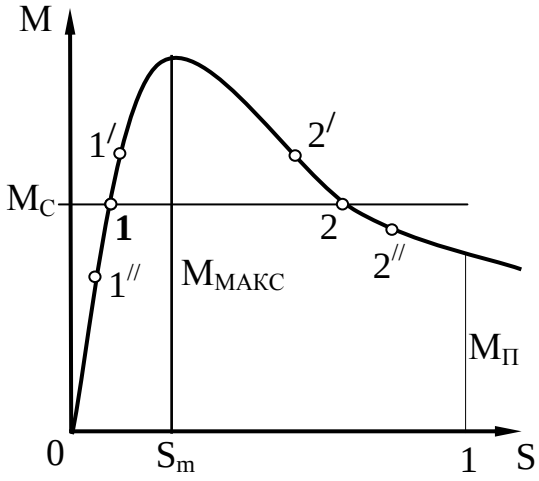
I_2'' (7.13) қойып келесі өрнекті аламыз:

$$M = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \frac{U_1^2 \frac{R_2'}{S}}{\left[\left(R_1 + R_2'/S\right)^2 + \left(X_1 + X_2'\right)^2\right]} \qquad (7.14)$$

Сипаттама 7.2 көрсетілгендей түрде болады:



7.2 сурет- Г-тәріздес қысқартылған орынбасу сұлбасы



7.3 сурет – Электромагнитті моменттің сырғанауға тәуелділігі

7.2.2 Максимал электромагниттік момент.

U=const және $f_2=const$ болған кездегі және максимум мен минимумдегі тұрақты параметрлер кезінде *M=f(S* тәуелділігін (7.14) өрнек бойынша зерттейміз.

Максимум M сәйкес келетін $S=S_M$ сырғанауды табу үшін, (7.14) өрнектен S бойынша туынды алып оны нөлге теңестіреміз dM/dS =0.

Қажетті түрлендірулерді орындаған соң келесі өрнекті аламыз:

$$S_m = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}}. \qquad M_{МАКС} = \pm \frac{m_1 p}{4\pi f_1} \frac{U_1^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_K^2}}. \tag{7.15}$$

мұнда S_M – сындық сырғанау;

$M_{МАКС}$ - максимал момент.

Бұл қатынастарда (+) таңба қозғалтқыш, ал (-) генератор жұмыс режиміне сәйкес келеді.

Қалыпты асинхронды машиналар үшін басқаларымен салыстырғанда R_1 аз болады. Сондықтан $R_1=0$ деп есептеп, келесі өрнектерді аламыз:

$$S_м = \pm \frac{R'_2}{X_K^2}, \qquad M_M = \pm \frac{m_1 p}{4\pi f_1} \frac{U_1^2}{X_K^2}. \tag{7.16}$$

Алынған қатынастар M_M шамасы біріншіден, ротордың активті кедергісінің шамасына тәуелсіз, екіншіден кернеудің квадратына пропорционал, үшіншіден индуктивті сейілу кедергісіне үлкен сәйкесдікпен кері пропорционал, төртіншіден қозғалтқышпен салыстырғанда генератор режимінде біраз үлкен болады деп қорытынды жасауға мүмкіндік береді. $U \sim f_1 \Phi$ болатындықтан, M_M машинаның магнит ағынының квадратына пропорционал болады деп қорытынды жасауға болады. Ең болмаса M_M екінші реттік активті кедергіге тәуелсіз болатынын, осы момент байқалатын S_M сырғанаудың шамасы (7.16) өрнек бойынша осы кедергіге пропорционал екенін атап өту маңызды.

Жай асинхронды қозғалтқыштың номинал кернеу кезіндегі M_M максимал моменттің еселігі:

$$k_M = \frac{M_{МАКС}}{M_Н} = (1{,}7 \div 2{,}5), \quad S_\text{М} = 0.06 \div 0.15. \tag{7.17}$$

Жұпталған полюстер саны аз болатын қозғалтқыштарда K_M көбірек болады.

Бастапқы жүргізуші электромагниттік момент $M_ж$ қозғалтқышты алғашқы жүргізу кезіндегі электромагниттік моменттің шамасына сәйкес келеді, яғни $S=1$ болған кезге. Келесі өрнек бойынша:

$$M_{ж} = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} \frac{U_1{}^2 R_2{}'}{\left[\left(R_1 + R_2{}'\right)^2 + \left(X_1 + X_2{}'\right)^2 \right]}. \tag{7.17}$$

Жүргізуші моментте машинаның берілген параметрлері кезінде оған берілген кернеудің квадратына пропорционал болады.

(3.33) теңдеу бойынша, $M_Ж$ жүргізуші момент R_2' өсуімен $S_M=1$ болған кезде $M_П=M_M$ болғанға дейін өседі. Бұл кезде:

$$1 = \pm \frac{R_2'}{X_K^2}, \qquad \text{бұдан } R_2^{/} \cong X_K. \tag{7.18}$$

R_2' арықарай өскен кезде $M_ж$ момент қайтадан азайатын болады.

8 Дәріс №8. Асинхронды машиналардың тұрақты жұмыс істеу шарты. Айналу жылдамдығы

Дәрістің мазмұны: асинхронды қозғалтқыштың айналу жылдамдығын реттеу және жүргізу әдістерін көрсету.

Дәрістің мақсаты:

- айналу жылдамдығын реттеу және жүргізу әдістеріне қойылатын талаптарды көрсету;
- әр біреуінің артықшылықтары мен кемшіліктерін бағалау.

8.1 Асинхронды машиналардың тұрақты жұмыс істеу шарты

1 және 2 нүктелерде моменттердің $M=M_{CT}$ тепе-теңдігі орындалады. Асинхронды машинаның осы екі нүктелердегі жұмысын қарастырамыз.

1 нүктедегі жұмысы.

Айналу жылдамдығы кездейсоқ өскен кезде ($1^{//}$ нүкте) статикалық момент электромагниттік моменттен көп болады $M_{CT}>M$, сондықтан қозғалтқыш тежелетін болады, ол роторды алғашқы 1 нүктеге келуге мәжбүр етеді, инерция бойынша одан өтіп кетеді және $1^{/}$ нүктеде статикалық момент электромагниттік моменттен $M<M_{CT}$ аз болады. Ротор үдей бастайды және қайтадан 1 нүктеде болады. Сонымен, 1 нүктедегі жұмыс тұрақты.

2 нүктедегі жұмыс.

Айналу жылдамдығы кездейсоқ өскен кезде (2 нүкте) электромагниттік момент $M>M_{CT}$ статикалық моменттен көп болады, сондықтан қозғалтқыш үдейді, ол роторды 1 нүктеге келіп, инерциямен одан өтіп кетіп $2^{//}$ нүктеге келуге мәжбүрлейді, мұнда $M>M_C$. Ротор үдей бастайды және n өсуі (S азайуы) моменттер теңесіп $M=M_C$, қайтадан 1 нүктеге келгенге дейін жүреді. Сонымен, 2 нүктедегі жұмыс тұрақсыз болады.

Жалпы жағдайда, қозғалтқыштың $M=f(n)$ сипаттамасының бірнеше қиылысу нүктесі болуы мүмкін.

Қозғалтқыш жұмысының шарттары:

$\frac{dM}{dt} < \frac{dM_C}{dt}$ - тұрақты; $\frac{dM}{dt} > \frac{dM_C}{dt}$ - тұрақсыз.

Қозғалтқыштың қалыпты тұрақты жұмыс істейтін аймағы механикалық сипаттаманың $0<S<S_M$ болған кездегі бөлігі болып саналады.

8.2 Асинхронды қозғалтқыштың асқын жүктемелік қабілеттілігі

Асинхронды қозғалтқыш механикалық сипаттаманың қалыпты тұрақты бөлігінде жұмыс істеген кезде жұмыстық механизмнің немесе машинаның статикалық моментімен M_C анықталатын оның жүктемесін, ақырындап моменттің $M_C=M_M$ шамасына дейін (4 нүкте) көтеруге болады және де тұрақты жұмыс осы нүктеге тақалғанға дейін сақталады. Жүктеме онан арықарай өскен кезде және $M_C>M_M$ болғанда қозғалтқыш тез тежеледі не тоқтайды, не А суреттегі сипаттамалар кезінде азғантай айналу жылдамдығында тұрақты жұмыс режиміне өтеді. Екі жағдайда да, егер қозғалтқыш ажыратылмаған болса, қызуға қатысты қауіпті режим пайда болады.

Онда асинхронды қозғалтқыштың жұмысы $0<M<M_M$ болған кезде болуы мүмкін. Одан басқа, қозғалтқыш жұмыс істеген кезде момент бойынша біраз қоры болуы керек, себебі желінің кернеуі қысқа уақытқа немесе ұзақ уақытқа төмендеуі мүмкін.

$\frac{\text{М}_{\text{МАКС}}}{\text{М}_{\text{Н}}} = \text{к}_{\text{М}}$ қатынасы номинал кернеу кезінде қозғалтқыштың асқын жүктемелік қаблеттілігін анықтайды және максимал моменттің еселігі деп аталады. Мемілекеттік стандартқа сәйкес $K_M=1,7\div2,2$. Төменгі мәні айналу жиілігі $n\leq750$ *айн/мин* болатын қозғалтқыштарға жатады.

8.3 Алғашқы жүргізуші моменттің және жүргізуші токтың еселігі

Мемлекеттік стандартқа (ГОСТ) сәйкес қысқаша тұйықталған роторлы асинхронды қозғалтқыштың алғашқы жүргізуші моменті келесідей болуы керек

$K_П = \frac{M_Ж}{M_Н} = (0.7 \div 1.8)$ кем емес, $K_I = \frac{I_Ж}{I_Н} = (5.5 \div 7.0)$ аз емес.

Аз мәндер үлкен қуатты қозғалтқыштарға тиісті болады.

8.4 Айналу жылдамдығын реттеу

Асинхронды қозғалтқыштың роторының айналу жылдамдығы келесі өрнекпен анықталады:

$$n_2 = \frac{f_1\,60}{p}(1-s). \qquad (8.1)$$

Бұдан, асинхронды қозғалтқыштың айналу жылдамдығын статор тізбегіндегі токтың жиілігін f_1, статор орамасының жұпталған полюстер санын p және сырғанауды s өзгертіп реттеуге болатынын көреміз.

Жиілікті f_1 өзгерту арқылы жылдамдықты реттеу көп таралмаған, себебі токтың жиілігін реттеу үшін жиілік түрлендіргіші қажет болады.

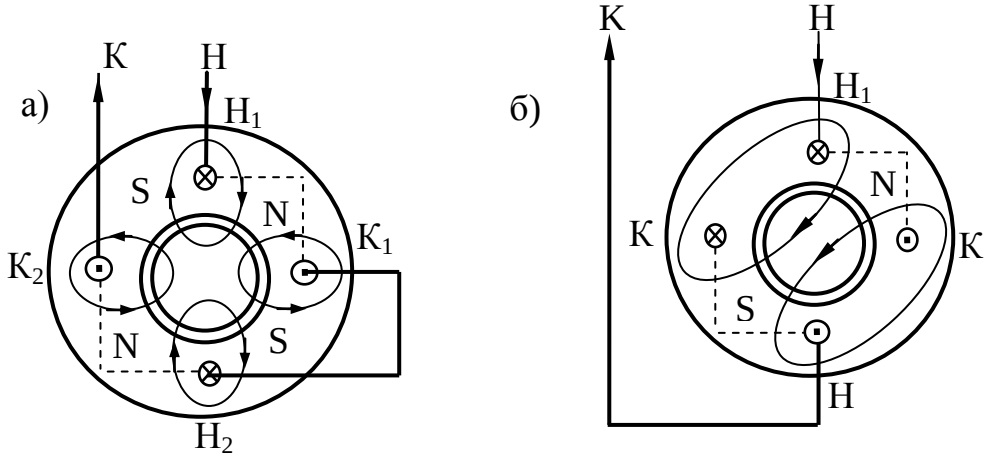
Айналу жылдамдығын реттейтін бұл әдіс тек қана бірнеше асинхронды қозғалтқыштардың жылдамдықтарын бір мезгілде реттеу керек болғанда ғана қолданылады.

Статор орамасының *жұпталған полюстер санын p* өзгерту айналу жылдамдығын сатылап реттеуді қамтамасыз етеді. Ол қысқаша тұйықталған роторлы қозғалтқыштарда тек қана екі әдіс бойынша іске асырылады.

Бірінші әдіс статор ойықтарына электрлік байланыста болмайтын, жұпталған полюстерінің саны әртүрлі болатын екі орама орналастыру арқылы іске асырылады. Мысалы, $p=1$ ($n_1=3000$ айн/мин) болатын орама мен $p=2$ ($n_1=1500$ айн/мин) орама. Желіге әртүрлі орама қосып, қозғалтқыштың айналу жылдамдығын өзгертеді.

Екінші әдіс статорда оның сұлбасы ауыстырып қосу жолымен жұпталған полюстер санын өзгертуге мүмкіндік беретін бір орама орналастыруды алдын ала қарастырған. Осындай ауыстырып қосу мүмкіндігі 8.1 суретте көрсетілген.

$2p=4$; $n=1500$ айн/мин; *$y=\tau$; $\beta=1$*



а) *$2p=1$; $n=1500$айн/мин; $y=$; $\beta=1$;б) $2p=2$; $n=3000$айн/мин; $y=0{,}5\tau$; $\beta=0{,}5$.*

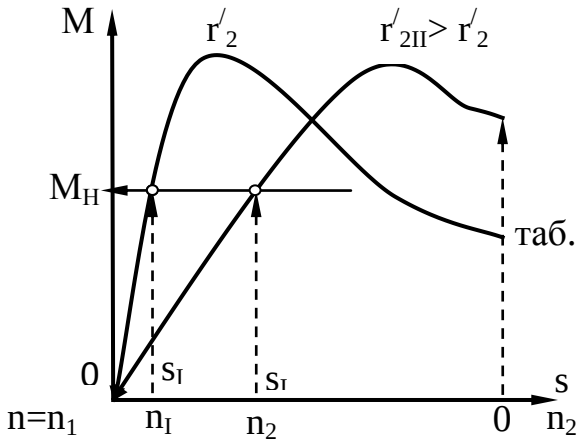
8.1 сурет – Полюстер санын ауыстыру арқылы асинхронды қозғалтқыштың жылдамдығын реттеу

Полюстер саны әртүрлі болатын статордың екі орамасын пайдалану машинаның салмағы мен көлемін өсіреді және кез келген айналу жылдамдығында қозғалтқышты толық пайдалана алмауға әкеледі. Жұпталған полюстер санын өзгертуге мүмкіндік беретін статордың бір орамасын пайдалану машинаны күрделендіреді, себебі бұл жағдайда статор орамасында шықпалар көп болады.

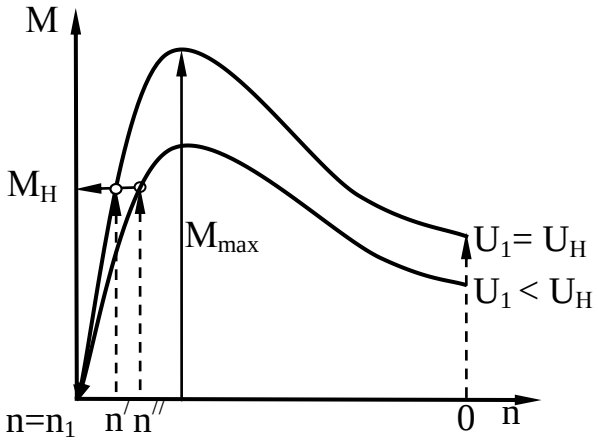
Асинхронды қозғалтқыштың айналу жылдамдығын ротор орамасындағы активті кедергінің көмегімен сырғанауды өзгерту арқылы реттеу фазалық роторлы қозғалтқыштарда ғана іске асырылуы мүмкін.

Бұл қозғалтқыштардың ротор орамасындағы фазалардың соңдарын түйіспелік сақина мен щеткалар арқылы сыртқа шығарады, бұл ротор орамасымен реттеуші реостаты $R_Д$ тізбектеп қосып және оның көмегімен ротор тізбегінің активті кедергісін өзгертуге мүмкіндік береді.

Асинхронды қозғалтқыштың ротор тізбегіндегі активті кедергінің әртүрлі мәні үшін тұрғызылған (8.2 сурет) механикалық сипаттама, берілген жүктемелік моментке M_C сәйкес келетін сырғанаудың ротор тізбегінің активті кедергісі өскен кезде өсетінін көрсетеді. Бұл кезде айналу жылдамдығы азаяды. Бұл реттеу әдісінің екі елеулі кемшілігі болады: біріншіден - ол автоматикада қолданылмайтын фазалық роторлы қозғалтқышта ғана қолданылады, және екіншіден - оның, шамасы сырғанауға пропорционал болатын ротор тізбегіндегі электрлік шығыны $I_2^{/2}\left(r_2^{/} + R_{Д}^{/}\right)$ айтарлықтай көп болады.



8.2 сурет – Тізбектегі активті кедергілердің әртүрлі мәндері кезіндегі механикалық сипаттамалар



8.3 сурет - Әртүрлі кернеулер кезіндегі асинхронды қозғалтқыштың механикалық сипаттамалары

Асинхронды қозғалтқыштардың айналу жылдамдығын кернеуді U_1 өзгерту арқылы реттеу мүмкіндігін U_1 әртүрлі мәндері үшін тұрғызылған $M = f(s)$ графигі растайды. Дегенмен бұл жағдайдағы жылдамдықты реттеу диапазоны өте аз болады.

Сонымен, асинхронды қозғалтқыштың жылдамдығын реттейтін әдістердің бәрінде де кемшіліктер болады.

8.5 Үш фазалы АҚ жүргізу

Алғашқы жүргізгенде *s=1*, ротор қозғалмайды. Бұл режим қысқаша тұйықтау режиміне сәйкес келеді. Асинхронды машиналардың *s=1* кездегі оның бірінші реттік қысқаштарына қатысты кедергілерін қысқаша тұйықтау кедергісі Z_K деп аталады. Т – тәріздес орынбасу сұлбасына сәйкес:

$$Z_K = Z_1 + \frac{Z_2^{/} Z_m}{Z_2^{/} + Z_m}.$$

$Z_m >> Z_2^{/}$ болатындықтан, шамамен

$$Z_K = Z_1 + Z_2^{/} = \left(r_1 + r_2^{/}\right) + j\left(x_1 + x_2^{/}\right) = r_K + jx_k.$$

Әдетте асинхронды машиналарда $Z_K=0,14\div0,20$. Сондықтан номинал кернеу кезіндегі қысқаша тұйықтау тогы $I_{1K}=(5\div7)I_H$.

8.6 Жүргізу әдістеріне қойылатын талаптар

АҚ жүргізуге болатын әдістерді қарастырған кезде келесідей негізгі жағдайларды ескеру қажет:

1) қозғалтқыш жүргізген кезде жеткілікті болатын мөлшердегі үлкен жүргізуші момент дамытуы керек;

2) жүргізуші токтың шамасы қозғалтқыш зақымдалмайтындай және желінің қалыпты жұмыс режимі бұзылмайтындай шамамен шектелуі керек;

3) жүргізу сұлбасы мүмкіндігінше қарапайым болуы керек.

8.7 Қысқаша тұйықталған роторлы асинхронды қозғалтқыштарды жүргізіп жіберу

8.7.1 Тікелей жүргізу.

Тікелей жүргізу, желінің қуаты жеткілікті болғанда және қозғалтқыштардың жүргізуші токтары желідегі кернеуді рұқсат етілмейтін деңгейге дейін төмендейтпейтін болса (10 – 15%) әрқашан қолданылуы мүмкін. Бұл кезде қозғалтқыштың жүргізуші тогы $I_Ж=(4 \div 7)I_Н$.

8.7.2 Төмендетілген кернеумен жүргізу.

Егер желідегі кернеудің төмендеу шарты бойынша қысқаша тұйықталған роторлы қозғалтқышты тікелей жүргізу мүмкін болмаса, қозғалтқышты төмендетілген кернеумен жүргізудің әртүрлі әдісі қолданылады (4.4 сурет). Дегенмен бұл кезде статор орамасының қысқаштарындағы кернеудің квадратына немесе қозғалтқыштың жүргізуші тогының квадратына пропорционал болатын жүргізуші моментте төмендейді.

Сондықтан бұл жүргізу әдістері, қозғалтқышты бос жүріс кезінде немесе толық емес жүктемемен жүргізу мүмкін болса ғана қолданылады.

Төмендетілген кернеумен жүргізу қажеттілігі бәрінен де жоғарғы вольттік үлкен қуатты қозғалтқыштар үшін жиі кездеседі.

8.7.2 Түйіспелік сақиналы қозғалтқыштар.

Түйіспелік сақиналы қозғалтқыштар үшін жоғарыда аталған жүргізу әдістерінің бәріде, сондай-ақ ротор тізбегіне активті кедергі кіргізу арқылы жүргізу әдісіде қолданылады. Бұл әдістің артықшылығы – жүргізуші токтың төмендеуімен бірге жүргізуші момент өседі.

9 Дәріс №9. Синхронды машиналар

Дәрістің мазмұны:

- синхронды машиналардың жұмыс істеу принціпі және құрылысы;
- якорь реакциясы.

Дәрістің мақсаты: якор реакциясының синхронды машиналардың параметрлеріне тигізетін әсерін талдау.

9.1 Синхронды машиналар

Синхронды машиналар – олар коллекторсыз айнымалы ток машиналары. Құрылыстары бойынша олардың асинхронды машиналардан айырмашылығы тек қана ротордың құрылысында, ол айқындалған полюсті немесе айқындалмаған полюсті болуы мүмкін. Қасиеттеріне келетін болсақ, синхронды машиналардың айырмашылығы кез келген жүктеме кезіндегі ротордың айналу жиілігінің синхронды ($n_2 = n_1$= const) болуында, сондай-ақ қуат коэффициентін реттеу мүмкіндігінде, оның мәнін бұл кезде синхронды машинаның жұмысы өте үнемді болатындай етіп қояды.

Синхронды машиналар қайтымды және генератор режимінде де, сондай-ақ қозғалтқыш режимінде де жұмыс істеуі мүмкін. Синхронды генераторлар электр станцияларындағы электротехникалық жабдықтардың негізін құрайды, яғни іс жүзінде электр энергиясының бәріде синхронды генераторлармен өндіріледі. Қазіргі кездегі синхронды машиналардың жеке қуаты милион және одан да көп киловатқа дейін жетеді. Синхронды қозғалтқыштар негізінен үлкен қуатты құрылғылардың жетегі ретінде қолданылады. Мұндай қозғалтқыштар техникалық – экономикалық көрсеткіштері бойынша басқа типтік қозғалтқыштардан басым болады. Үлкен электроэнергетикалық қондырғыларда синхронды машиналар кейде компенсатор ретінде пайдаланылады, яғни барлық қондырғылардың қуат коэффициентін өсіруге мүмкіндік беретін реактивті қуат генераторы ретінде. Бұл бөлімде негізінен үш фазалы синхронды машиналар қарастырылады. Сонымен бірге автоматика қондырғыларында және аспаптық техникада қолданылатын, қуаты өте аз болатын синхронды қозғалтқыштардың кейбір типтері бойынша да мәліметтер келтіріледі.

9.2 Синхронды машиналардың құрылысы

Синхронды машина қозғалмайтын бөлігі – статордан және айналатын бөлігі – ротордан тұрады. Синхронды машинаның статорының асинхронды машинаның статорынан ешқандай айырмашылығы жоқ, яғни корпустан, өзекшеден және орамадан тұрады.

Синхронды машиналардың роторы құрылысы бойынша екі түрге бөлінеді: айқындалған полюсті және айқындалмаған полюсті.

Айнымалы токтың электр энергиясын өндіретін электрлік қондырғыларда синхронды генераторлардың бірінші реттік (жетектік) қозғалтқышы ретінде негізінен қозғалтқыштардың үш түрін пайдаланады: бу турбиналары, гидравликалық қозғалтқыштар немесе іштен жанатын қозғалтқыштар (дизелдер). Аталған қозғалтқыштардың кез келгенін пайдалану синхронды генератордың құрылысына бір беткей әсер етеді.

Егер жетектік қозғалтқыш *гидравликалық турбина* болса, онда синхронды генератор гидрогенератор деп аталады. Гидравикалық турбинаның айналу жылдамдығы әдетте аз болады (60 – 500 айн/мин), сондықтан өндірістік жиліктегі айнымалы ток алу үшін (50 Гц) гидрогенераторларда полюстер саны көп болатын ротор қолданылады.

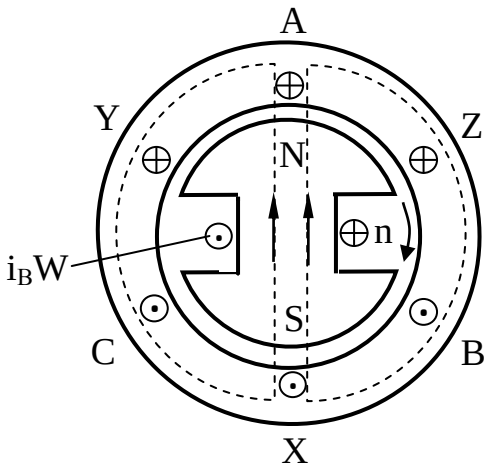
Гидрогенераторлардың роторының құрылысы *айқын полюсті* болады, яғни айқындалған полюсті, бұл кезде әрбір полюсті өзекшеден, полюстік табаннан және полюстік орауыштан тұратын жеке бөлшек түрінде орындайды.

Бу турбинасы үлкен айналу жиілігімен жұмыс істейді, сондықтан турбогенератор деп аталатын, ол айналдыратын генератор тез жүретін синхронды машина болады. Бұл генераторлардың роторларын екі полюсті ($n_1=3000$ айн/мин), немесе төрт полюсті (n_1= 1500 айн/мин) етіп жасайды.

Турбогенератордың жұмыс істеу үрдісінде оның роторына айтарлықтай ортадан тепкіш күштер әсер етеді. Сондықтан механикалық беріктілік шарты бойынша турбогенераторларда *айқындалмаған полюсті* ротор қолданады, оның түрі қоздырушы орама үшін жоғарғы бетіне, оның бойымен ойықтар тілінген ұзартылған болат цилиндр тәріздес болады. Айқындалмаған полюсті ротордың өзекшесін тұтас болат орамы түрінде дайындайды. Айқындалмаған полюсті ротордың қоздырушы орамасы оның бетінің (периметрі бойынша) 2/3 бөлігінде орналасады. Беттің қалған 1/3 бөлігін полюстер алады. Ротор орамасының маңдайша бөлігін ортадан тепкіш күштің қирату әрекетінен қорғау үшін роторды екі жағынан болаттан жасалған құрсаулық сақиналармен қорғайды, олар әдетте беймагниттік болаттан жасалады.

9.3 Синхронды машинаның жұмыс істеу принципі

Синхронды машиналарда статорды якорь деп, ал роторды индуктор деп атайды. Индуктор – ол машинаның магнит ағынын тудыратын бөлігі, ал якорь машинаның онда энергияны түрлендіретін бөлігі.



9.1 сурет – Синхронды машинаның әсер ету принципі

Егер қоздырушы орамаға тұрақты кернеу беріп және оны айналдырса, онда қоздырушы ағын статордың үш фазалы орамасын қиып, онда ЭҚК индукциялайды, оның бағыты оң қол ережесімен анықталады.

ЭҚК жиілігі:

$$f = pn\frac{\text{айн}}{\text{сек}} \text{ немесе } f = \frac{pn}{60}\frac{\text{айн}}{\text{мин}}. \quad (9.1)$$

Жүктеме кезінде статор орамасы ротор өрісінікіндей жылдамдықпен айналатын магнит өрісін тудырады, осы себептен оларды синхронды машиналар деп атайды.

9.4 Якорь орамасының магнит өрісімен параметрлері. Якорь реакциясы

Синхронды машиналардың жұмысын түсіну үшін якорь реакциясы деген ұғымды білу маңызды.

Бос жүріс кезінде синхронды машинада тек қана қоздырушы өріс болады. Жүктеме кезінде якорь тогы өзінің магнит өрісін тудырады, ол *якорь реакциясының өрісі* деп аталады. Синхронды машинаның якорь реакциясы қалыптасқан жұмыс режимінде де, сондай-ақ өтпелі жұмыс режимдерінде де оның сипаттамалары мен жұмыс тәртібіне айтарлықтай әсерін тигізеді. Бұл синхронды машинаның якорь өрісі, якорь орамасында өте үлкен ЭҚК индукциялауынан болады.

Блонделдің әдісі немесе екі реакция теориясы.

Айқындалған полюсті машинаның индуктрі бейсимметриялы болады, себебі бойлық өстегі *d* ауа саңылауы көлденеңнен остегі ауа саңылауынан үлкен болады *($\delta_d < \delta_q$)*. Сондықтан шамалары бойынша бірдей болатын якорьдегі *М.Қ.К.* бойлық оспен әсер еткен кезде, көлденен ось бойынша әсер еткен кездегімен салыстырғанда үлкен магнит ағынын тудырады. Индуктордың құрылысы бейсимметриялы болатындықтан якорь реакциясының бойлық және көлденен остер бойынша тигізетін әсерлерін

жеке қарастыру қажеттігі пайда болады. Бұлай қарастыру тәсілін алғаш рет 1895 жылы француз электр технигі А. Блондел ұсынды және ол *әдіс немесе екі реакция теориясы* деп аталады.

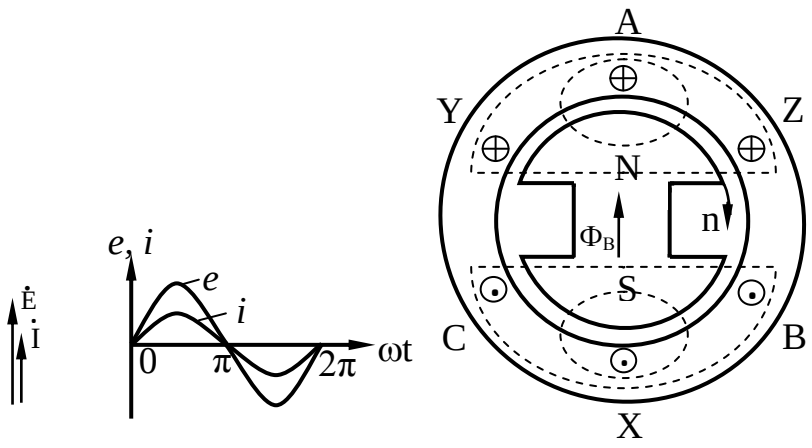
Екі реакция әдісі беттестіру принципіне негізделген, бұл кезде бойлық және көлденең остер бойынша әсер ететін магнит ағындары бір-біріне әсерін тигізбейді деп болжанады. Егер қанығуды ескермесе, онда бұл әдіс машинадағы үрдістерді жеткілікті сәйкестікпен көрсетеді.

9.4.1 Бойлық және көлденең якорь реакциясы**.**

Суретте орамасы үш фазалы екі полюсті синхронды машина көрсетілген, оның әрбір фазасы толық қадамды *(A — X, B — Y, C — Z)* бір орам түрінде бейнеленген. *N, S* әріптерімен қоздырушы өрістің полярлығы көрсетілген, ал бұл өрістің магниттік сызықтары көрсетілмеген.

1) $\psi = 0$ – жүктеме таза активті.

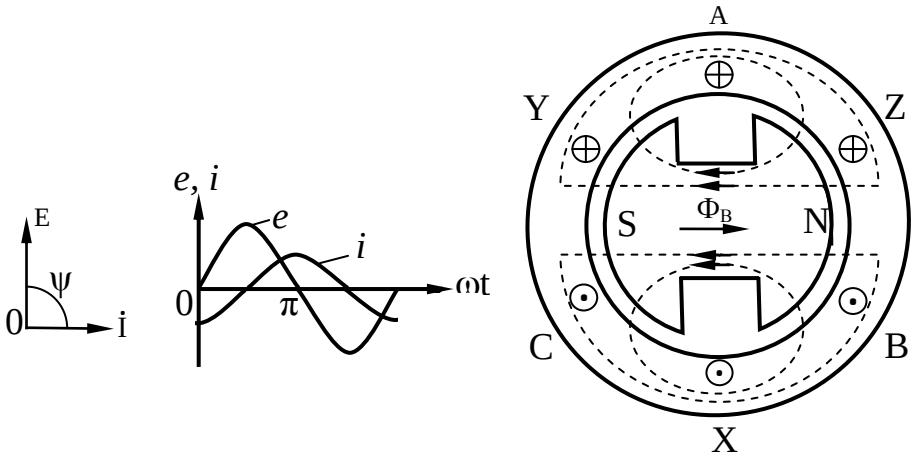
Суретте якорь ормасында қоздырушы өріс индукциялайтын *ЭҚК Ė* бағыты және якорь тогының *İ* бағыты көрсетілген. ЭҚК бағыты оң қол ережесі бойынша анықталады және ол 9.2 суретте крестермен және нүктелермен көрсетілген. Токтардың i_a, i_b, i_c бағыттары жүктеменің сипатына тәуелді болады және бұл жағдайда *ЭҚК* бағытымен тура келеді.



9.2 сурет - Көлденің якорь реакциясы

Токтардың мұндай бағыттары кезіндегі полюстердегі және якорьдегі якорь реакциясы өрісінің магниттік сызықтары 9.1 суретте көрсетілгендей полюстер осіне *d* көлденең бағытталған. Демек, якорь реакциясының ағыны Φ_a көлденен остің бойымен әсер етеді. Якорь реакциясы өрісінің мұндай сипаты $\psi = 0$ кезде айналып тұрған ротордың кез келген қалпында сақталады, себебі ротор мен якорь реакциясының өрісі синхронды айналады. Демек, $\psi = 0$ болғанда синхронды машинаның якорь реакциясы таза көлденең болады.

2) $\psi = 90^0$ - жүктеме таза индуктивті

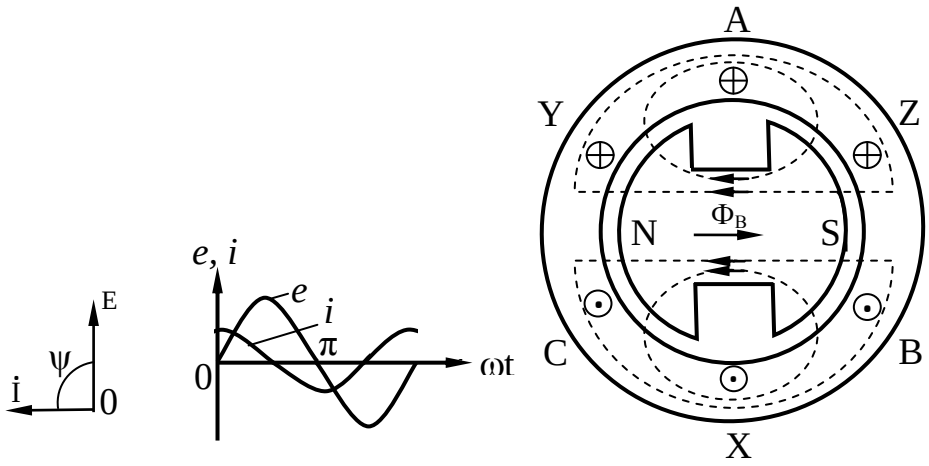


9.3 сурет- Бойлық магниттеу якорь реакциясы

Ротор 9.1 суретте көрсетілген қалыпта тұрған кезде А фазасындағы ток нөлге тең, ал *ЭҚК* максимал болады. Ротор 90^0 бұрылған кезде А фазасындағы ток максимал, ал ондағы *ЭҚК* нөлге тең болады. Бұл ток пен *ЭҚК* лездік мәндерінің графигінен көрінеді. 9.2 суретте көрсетілгендей бұл кезде якорь реакциясы бойлық магнитсіздендіргіш болады.

3) $\psi = -90^{\circ}$ - жүктеме таза сыймдылықты.

Бұл жағдайда А фазасындағы токтың максимумы 9.1 суреттегі

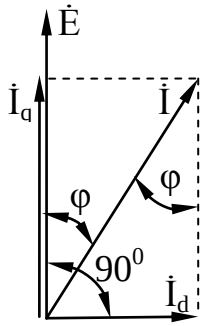


9.4 сурет - Көлденең магниттеуші якорь реакциясы

жағдаймен салыстырғанда ширек период бұрын болады және бұл уақытта ротор айналу бағытына қарсы 90^0 бұрылған қалыпта тұрады (9.4 сурет). Суретте токтар мен *ЭҚК* бағыттары ток пен *ЭҚК* лездік мәндерінің графиктеріне сәйкес көрсетілген. Таза сыймдылықты жүктеме кезінде якорь реакциясы бойлық магниттеуші болады.

4)$0 \neq \psi \neq 90^0$ – жүктеме аралас

Жалпы жағдайда $\psi \neq 0$ және $\psi \neq 90^{\circ}$ болғанда токты *İ Блондел тәсілі немесе екі реакция теориясы* бойынша екі құраушыға I_d және I_q жіктеуге болады (9.5 сурет).



9.5 сурет – Якорь тогының бөлінуі

$$I_d = I\sin\varphi;\ I_q = I\cos\varphi\ . \qquad (9.2)$$

Ток *İ ЭҚК Ė* ден қалған кезде ψ бұрышы оң деп саналады.

9.4.2 Бойлық және көлденеңінен әсер ететін якорь реакциясының магнит өрістері мен ЭҚК.

Якорь реакциясының магнит қозғаушы күштері бойлық $F_{ad} = F_a\sin\psi$ және көлденен $F_{aq} = F_a\cos\psi$ остерінің бойымен синхронды машинаның магнит өткізгіштігінде якорь реакциясының Φ_d және Φ_q магнит ағындарын тудырады.

Якорь реакциясының магнит ағындары статор орамасымен ілігісіп бұл орамада якорь реакциясының *ЭҚК* тудырады: бойлық ось бойынша $\dot{E}_d=-j\dot{I}_d x_{ad}$ және көлденен өс бойынша $\dot{E}_q=-j\dot{I}_q x_{aq}$.

Мұнда x_{ad} және x_{aq} – айқындалған полюсті машинаның бойлық осі бойынша және көлденен осі бойынша якорь реакциясының индуктивті кедергілері.

Мұнан басқа якорь тогы сейілу *МҚК* және сейілу ағынын тудырады, ол тек қана якорь орамасымен ілігіседі. Сейілу ағынын бойлық және көлденен остер бойынша бірдей деп есептеуге болады, демек олар тудыратын *ЭҚК* $\dot{E}_\sigma=-j\dot{I}x_\sigma$ ауа саңылауының шамасына тәуелсіз болады. Мұнда x_σ - статор фазасындағы ораманың сейілу индуктивті кедергісі.

$x_d = x_{ad}+x_\sigma$, $x_{aq}= x_{aq} +x_\sigma$ - айқындалған полюсті машинаның бойлық осі бойынша және көлденен осі бойынша синхронды индуктивті кедергілері.

Айқындалмаған полюсті машинада ауа саңылауы статордың жонып өңделген периметрінің бойында бір қалыпты болады, сондықтан магниттік кедергілер бойлық және көлденен остер бойынша тең болады:

$$x_{ad} = x_{aq};\ x_d = x_q. \qquad (9.3)$$

Әдетте x_{ad} және x_d мәндерін пайдаланады.

10 Дәріс №10. Синхронды генератордың кернеулерінің теңдеулері. Векторлық диаграммалар. Сипаттамалар

Дәрістің мазмұны:
- синхронды генератордың кернеулерінің теңдеулері;
- векторлық диаграммалар, жүктеме бұрышының θ ұғымы.

Дәрістің мақсаты: синхронды генераторлардың жұмысын талдау.

10.1 Синхронды генератордың кернеулерінің теңдеулері

Бос жүріс режимінде генератордың шықпаларындағы кернеу, қоздырушы ағын тудырған *ЭҚК* тең болады. Жүктеме кезінде якорь реакциясының МҚК пайда болады, олар өздерінің магнит ағынын және осыған сәйкес ЭҚК тудырады.

Синхронды генератордың шықпасындағы кернеу:

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \sum \dot{E} - R_a\dot{I}_1 = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - R_a\dot{I}_1 \\ \dot{U}_1 &= E - jX_{ad}\dot{I}_d - jX_{aq}\dot{I}_q - jX_{\sigma a}\dot{I}_1 - R_a\dot{I}_1\end{aligned}\right\}. \qquad (10.1)$$

Қортынды магнит ағыны индукциялайтын ЭҚК:

$$\begin{aligned}\dot{\Phi}_\delta &= \dot{\Phi} + \dot{\Phi}_{ad} + \dot{\Phi}_{aq}; \\ \dot{E}_\delta &= \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq}.\end{aligned} \qquad (10.2)$$

(10.1), (10.2) өрнектер айқындалған полюсті *синхронды генератордың кернеулерінің теңдеулерін* көрсетеді.

Айқындалмаған полюсті синхронды генераторларда $X_{ad=}\ X_{aq}$, сондықтан айқындалмаған полюсті синхронды генератордың кернеулерінің теңдеуі келесідей түрде болады:

$$\dot{U}_1 = \sum \dot{E} - R_a\dot{I}_1 = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - R_a\dot{I}_1 \qquad (10.3)$$

немесе, егер $R_a \cong 0$ деп санаса, онда:

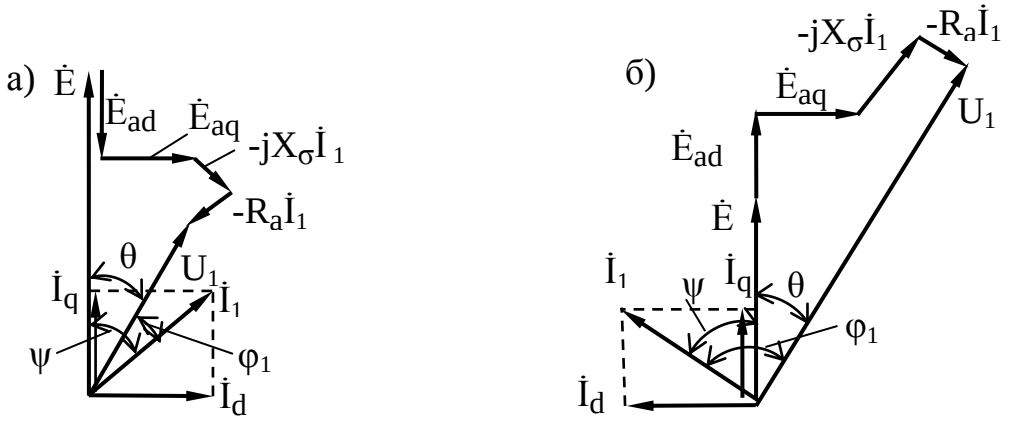
$$\dot{U}_1 \cong \sum \dot{E} = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{\sigma a}. \qquad (10.4)$$

10.2 Синхронды генератордың векторлық диаграммалары

ЭҚК теңдеуін (10.1) пайдаланып, активті-индуктивті жүктememен жұмыс істейтін (*İ* ток *ЭҚК Ė* фаза бойынша қалады) айқындалған полюсті синхронды генератордың векторлық диаграммасын тұрғызамыз.

Белгілі шамалар: генератордың бос жүріс режиміндегі *ЭҚК Ė;* жүктеме тогы *İ* және оның *ЭҚК Ė* қатысты ығысу бұрышы ψ ; якорь реакциясының бойлық X_{ad} және көлденен X_{aq} индуктивті кедергілері; статордың фазалық орамасының активті кедергісі R_a.

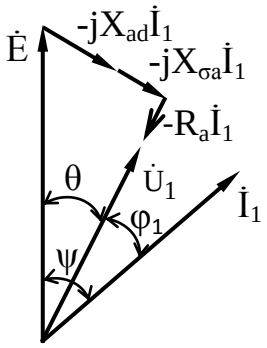
Генератордың жүктемесі симметриялы болған кезде диаграмманы тек қана бір фаза үшін тұрғызады.



а —активті-индуктивті жүктеме кезінде;
б — активті – сыйымдылықты жүктеме кезінде.
10.1 сурет – Айқындалған полюсті генератордың векторлық диаграмалары

Векторлық диаграмманы тұрғызудың ретін қарастырайық (10.1, а сурет). Ерікті бағытта *ЭҚК Ė* векторын сызамыз және оған *ψ* бұрышпен *İ* токтың векторын тұрғызамыз. Соңғысын құрамдарға жіктейміз: реактивті $I_d=İ\sin\psi$ және активті $I_q=İ\cos\psi$. Онан соң, *Ė* векторының соңына $E_d=-jI_dx_{ad}$ және $E_q=-jI_qx_{aq}$, $Ė_\sigma=-İx_\sigma$, $-İR_a$ *ЭҚК* векторларын сызамыз. $-İR_a$ векторының соңын *O* нүктесімен қосып, мәні *ЭҚК* векторларының геометриялық қосындысына тең болатын $\dot{U}_1$ кернеудің векторын аламыз.

Осы жолмен айқындалған полюсті генератордың активті-сыйымдылықты жүктеме кезіндегі векторлық диаграммасын және айқындалмаған полюсті генератордың векторлық диаграммасын тұрғызады.



10.2 сурет – Айқын емес полюсті генератордың векторлық диаграммасы

Ескеретін жағдай, тұрғызылған векторлық диаграммалар магнит тізбегінің қанығуын ескермейді, сондықтан ол құбылыстың сапалық жағын ғана көрсетеді. Дегенмен, бұл диаграммалар келесідей қортынды жасауға мүмкіндік береді: жүктелген генератордың кернеуінің өзгеруіне әсер ететін негізгі себеп, E_{ad} *ЭҚК* тудыратын, якорь магнит ағынының бойлық құрамы болады; генератор активті-индуктивті жүктемемен жұмыс істеген кезде, яғни *Ė* электр қозғаушы күшінен фаза бойынша қалатын *İ* токпен, статор орамасының шықпасындағы кернеу *U* жүктеме өскен кезде азаяды, ол якорь реакциясының магнитсіздендіру әрекетімен түсіндіріледі. Генератор активті-сыйымдылықты

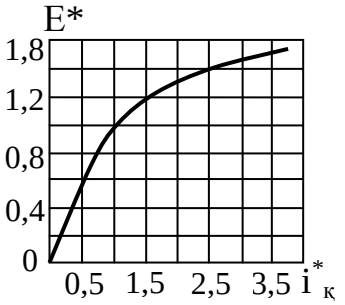
жүктемемен жұмыс істеген кезде (фаза бойынша $\dot{E}$ ЭҚК озатын $\dot{I}$ токпен) кернеу U жүктеме өскен кезде өседі, ол якорь реакциясының магниттеу әректімен түсіндіріледі.

Жүктеме бұрышы θ туралы ұғым.

Кернеу $\dot{U}_1$ мен $\dot{E}$ *ЭҚК* векторларының арасындағы бұрышты, жүктеме бұрышы деп атайды. Шыныменде, 5.4 суреттегі диаграммада көрсетілгендей $\cos\varphi$ өскен кезде токтың көлденен құрамы өседі, демек якорь реакциясының көлденен құрамы мен θ бұрышы өседі. Генератор режимінде ЭҚК $\dot{E}$ векторлары кернеудің $\dot{U}_1$ векторынан озады және оң болып саналады.

10.3 Синхронды генератордың сипаттамалары

Синхронды генератордың қасиеттері бос жүріс, қысқаша тұйықтау, шықпалық және реттемелік сипаттамалармен анықталады.



10.3 сурет – Синхронды генератордың бос жүріс режим тәжірбиесі

10.3.1 Синхронды генератордың бос жүріс сипаттамасы.

Синхронды генератордың бос жүріс сипаттамасы n=const болған кездегі, генератордың шықпалық кернеуінің бос бос жүріс тогына тәуелділігін $U_1 = E_0 = f(i_к)$ көрсетеді. Егер әртүрлі синхронды генераторлардың бос жүріс сипаттамаларын салыстырмалы бірлікте көрсетсе $E^* = f(i_к^*)$, онда ол сипаттамалардың бір-бірінен айырмашылығы аз болады және әдеттегі бос жүріс сипаттамасына өте ұқсас болады (10.3 сурет), оны синхронды машинаны есептеген кезде пайдаланады.

Мұнда $E^* = E_0 / U_{1НОМ}$ – статор орамасы фазасындағы салыстырмалы ЭҚК; $i_к^* = i_{к0} / i_{В\backslash к0НОМ}$ – салыстырмалы қоздырушы ток; $i_{к0НОМ}$ – бос жүріс ЭҚК $E_0 = U_{1НОМ}$ сәйкес келетін бос жүріс режіміндегі қоздырушы ток.

10.3.2 Қысқаша тұйықтау сипаттамасы.

Бұл $\dot{U}_1 = 0$ болған кездегі $\dot{I} = f(i_к)$ тәуелділігі.

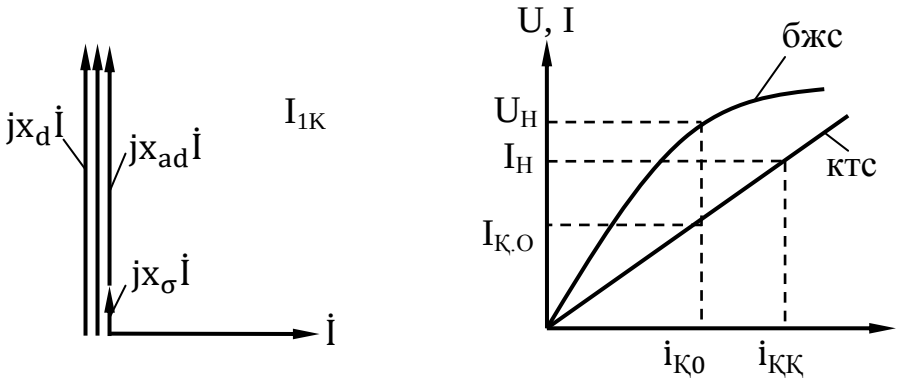
Қысқаша тұйықтау кернеуі $0 = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{\sigma a}$.

Егер, якорьдің активті кедергісін $R_a = 0$ деп есептесек, онда ток таза индуктивті болады, ал якорь реакциясы бойлық – магнитсіздендіруші болады.

$$\dot{E}_\delta = \dot{E} + \dot{E}_{ad}, \quad 0 = \dot{E}_\delta + \dot{E}_{\sigma a}; \quad \dot{E}_\delta = X_{\sigma a}\dot{I}. \qquad (10.5)$$

Индуктивті сейілу кедергісі $X_{\sigma a}$ өте аз болады, сондықтан бұл жағдайда статор орамасындағы ЭҚК мәні, генератордың жұмыстық

режиміндегімен салыстырғанда бірнеше есе аз болады. Онда қортынды магнит ағыныда аз болады және машина қанықпаған болады.



10.4 сурет - Синхронды генератордың қысқа тұйықталу тәжірбиесі сыртқы *(а)* және реттеу сипаттамалары *(б)*

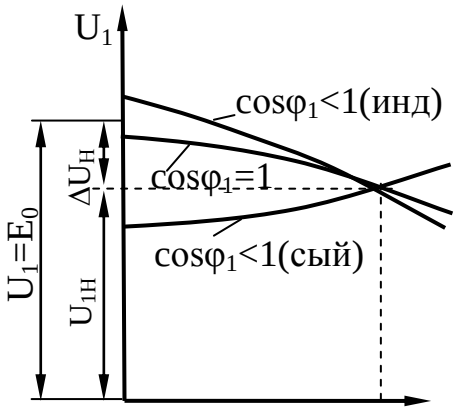
Қысқаша тұйықтау қатынасы синхронды машинаның ең маңызды параметрлерінің бірі болады. ҚТҚ – бұл бос жүріс кезіндегі номинал кернеуге сәйкес келетін қоздырушы токтың $i_{Қ0H}$, қысқаша тұйықтау тәжірибесі кезіндегі статордың номинал тогына сәйкес келетін қоздырушы токқа $i_{ҚҚH}$ қатынасы (5.6 сурет).

$$\text{ҚТҚ}=\frac{i_{Қ0}}{i_{ҚҚ}} \qquad \text{немесе} \qquad \text{ҚТҚ}=\frac{I_{Қ0}}{I_H}. \qquad (10.6)$$

Өйткені $I_{k0}=\frac{U_H}{X_d}$, онда $\text{ҚТҚ}=\frac{U_H}{x_d I_H}=\frac{1}{x_{d*}}$.

ҚТҚ синхронды машинаның тәжірбие жүзінде маңызы жоғары: ҚТҚ аз машиналардың тұрақтылығы нашар болады, жүктеме өзгерген сайын кернеуі тербеліп тұрады.

Турбогенератор үшін ҚТҚ = 0.44 – 0.7; гидрогенераторлар үшін ҚТҚ = 1.0 – 1.4.



10.5 сурет – Синхронды генераторлардың шықпалық сипаттамалары

10.3.3 Шықпалық сипаттама.

Статор орамасының шықпаларындағы кернеудің жүктеме тогына тәуелділігін көрсетеді: $U_1=f(I)$ бұл кезде $i_B=const;\ cos\varphi_1=const;\ n=const.$ 10.5 суретте синхронды генератор жүктемесінің сипаты бойынша әртүрлі мәндеріне сәйкес келетін шықпалық сипаттамалары көрсетілген.

Активті жүктеме кезінде ($cos\varphi_1=1$) жүктеме тогының I азаюы кернеудің U_1 өсуі сәйкес келеді, ол статор орамасына

түсетін кернеудің азаюымен және якорь реакциясы әрекетінің бойлық осі бойынша әлсіреуімен түсіндіріледі.

Индуктивті жүктеме кезінде ($cos\varphi_1<1$; инд.) жүктеме азайған кезде U_1 өсуі тым қарқынды болады, себебі токтың I азаюымен якорь реакциясының бойлық құрамының магнитсіздендіру әрекеті әлсірейді. Дегенмен генератордың жүктемесі сыйымдылықты болған жағдайда ($cos\varphi_1<1$; сыйм.) токтың I азаюы кернеудің U_1 азаюымен бірге жүреді, ол якорь реакциясының бойлық құрамының магниттеуші әрекетінің әлсіреуімен түсіндіріледі.

$i_B=const$ және $n=const$ болған кезде номинал жүктеменің азаюынан генератордың кернеуінің өзгеруін, *кернеудің номинал өзгеруі (өсуі)* деп аталады (%):

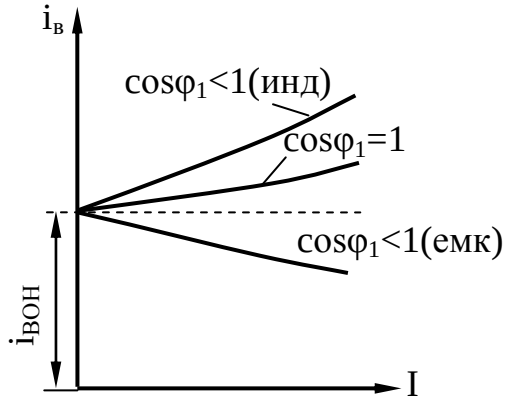
$$\Delta U_{ном} = \frac{E_0 - U_{1ном}}{U_{1ном}} \cdot 100. \qquad (10.7)$$

Генератор сыйымдылықты жүктememен жұмыс істеген кезде жүктеменің азаюы кернеуді азайтады, сондықтан $\Delta U_{НОМ}$ теріс болады.

Синхронды генераторды пайдалану үрдісінде жүктеме өзгерген кезде тез әрекет ететін автоматты реттегіштердің көмегімен U_1 өзгеріссіз ұстап тұрады. Дегенмен орама оқшауландырғышы зақымдалмас үшін $\Delta U_{НОМ}$ кернеудің өзгеруі 50% аспауы керек.

10.3.4 Реттемелік сипаттама.

Ол жүктеме өзгерген кезде генератордың қысқаштарындағы кернеу өзгермей номинал болып қалу үшін қоздырушы токты қалай өзгерту керек екенін көрсетеді: $i_К=f(I)$ при $U_1=U_{1НОМ}=const;\ cos\varphi_1=const;\ n=n_{НОМ}=const.$



10.5 сурет – Синхронды генераторлардың реттелу сипттамалары

10.5 суретте синхронды генератордың реттегіш сипаттамасы көрсетілген. Активті жүктеме кезінде $(cos\varphi_1=1)$ жүктеме тогының I өсуі кернеудің U_1 азаюымен ере жүреді, сондықтан жүктеме тогы I өскен кезде бұл кернеуді өзгеріссіз ұстап тұру үшін қоздырушы токты өсіруге тура келеді. Индуктивті сипаттағы жүктеме ($cos\varphi$ <l; инд) кернеуді U_1 тез төмендетеді, сондықтан $U_1=U_{1НОМ}$ ұстап тұру үшін қоздырушы токты i_B үлкен аралықта өсіруге тура келеді. Сыйымдылықты сипаттағы жүктеме ($cos\varphi$ <1; сыйым.) кезінде жүктеменің өсуі U_1 кернеудің өсуімен қатар жүреді, сондықтан $U_1=U_{1НОМ}$ ұстап тұру үшін қоздырушы токты азайту керек болады.

11 Дәріс №11 Синхронды машиналардың параллель жұмысы

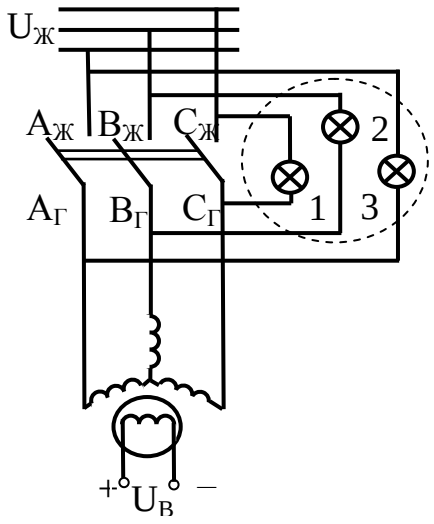
Дәрістің мазмұны:
- генераторларды параллель жұмысқа қосу;
- синхрондау әдісі;
- бұрыштық сипаттамалар.

Дәрістің мақсаты: синхронды машиналардың параллель жұмысының ерекшеліктері туралы ұғым.

11 Синхронды машиналардың параллель жұмысы

11.1 Генераторларды параллель жұмысқа қосу

Электр станцияларында бірігіп жұмыс істеу үшін параллель қосылатын бірнеше синхронды генераторларды орналастырады. Қуаты осы генераторлардың қуаттарының қосындысындай болатын бір генератордың орнына бірнеше синхронды генераторлардың болуы, трансформаторлардың параллель жұмысы туралы баяндалған кезде аталған артықшылықтармен бірдей артықшылық береді.



11.1 сурет – Шамдық синхроноскоп

Синхронды генераторды желімен параллель жұмысқа қосқан кезде келесідей шарттарды орындау керек: генератордың ЭҚК E_O оны желіге қосқан кезде желінің кернеуіне тең және фаза бойынша қарама-қарсы бағытта болуы керек ($\dot{E}_0 = -\dot{U}_Ж$); генератордың ЭҚК жиілігі $f_Г$ желідегі айнымалы кернеудің жиілігіне $f_ж$ тең болуы керек; генератордың шықпаларындағы фазалардың орналасу реті желінің қысқаштарындағыдай болуы керек. Генераторды барлық аталған шарттарды қанағаттандыратын жағдайға келтіру *синхрондау* деп аталады. Синхрондау шарттарының кез келген біреуін орындамау статор орамасында үлкен теңгеруші токтардың пайда болуына әкеледі, олардың шамадан тыс мәндері апатты жағдайдың орын алуына себеп болуы мүмкін.

Генераторды параллель жұмыс істеп тұрған генераторлармен бірге желіге қосу сәйкес синхрондау әдісімен немесе өздігінен синхрондалу әдісімен іске асырылуы мүмкін.

11.2 Сәйкес синхрондау әдісі

Бұл әдістің мәні мынада, генераторды желіге қоспас бұрын оны жоғарыда аталған барлық шарттарды қанағаттандыратын қалыпқа келтіреді.

Бұл шарттардың орындалу сәтін, яғни синхрондалу кезеңін *синхроноскоп* деп аталатын аспаппен анықтайды. Құрылысы бойынша синхроноскопты тілдік және шамдық деп бөледі.

Генераторларды шамдық синхроноскопты пайдаланып синхрондау үрдісін қарастырамыз, ол екі тәсілмен қосылатын үш *1,2,3* шамнан тұрады: «өшуге» және «айналатын отпен». 11.1 суретте «өшуге» арналған тәсіл көрсетілген, бұл кезде синхрондалу кезеңіне барлық шамдардың бір мезгілде өшуі сәйкес келеді. Генератордың $\omega_Г$ және желінің $\omega_С$ жиіліктерінің тепе-теңдігін сәйкес орындау іс жүзінде мүмкін болмайды. Шамдардағы $\dot{E}_Г - \dot{U}_Ж$ кернеу $\omega_Г$-$\omega_Ж$ жиілікпен толықсиды. $\dot{E}_Г$ және $\dot{U}_Ж$ векторлары фаза бойынша сәйкес келген кезде шамдардың жарығы жоғары болады (шамдардағы кернеу желідегі кернеуден екі есе көп), ал қарама қарсы фазада болған кезде өшеді. Генератордың жылдамдығын реттеп жиіліктерді максимал жақындатуға болады. Генератордың ЭҚК қоздырушы токпен реттеледі. Шамдар өшкен кезде шаппа қосқышты тұйықтау керек, бұл кезде генератор желіге қосылады.

11.3 Өздігінен синхрондалу әдісі

Қоздырылмаған генератордың роторын бірінші реттік қозғалтқыштың көмегімен синхронды жылдамдықтан 2—5 %, айырмашылықта болатын жиілікпен айналдырады, сонан соң генераторды желіге қосады. Генераторды желіге қосқан кезде ротор орамасында асқын кернеу болмас үшін, оны кейбір активті кедергі арқылы тұйықтайды. Генераторды желіге қосқан кезде оның ЭҚК нөлге тең болатындықтан (генератор қоздырылмаған) желідегі кернеудің әсерінен статор орамасында генератордың номинал тогынан үлкен болатын ток байқалады. Статор орамасын желіге қосқан соң артынша қоздырушы ораманы тұрақты ток көзіне қосады және бұл кезде синхронды генератор оның роторына әсер ететін электромагниттік моменттің әсерінен синхрондылыққа жеткізіледі, яғни ротордың айналу жиілігі синхронды болады.

11.4 Синхронды машиналардың қуатының бұрыштық сипаттамалары. Активті қуаттың бұрыштық сипаттамасын қорытып шығару

Жоғарыда анықталғандай синхронды машинаның қуаты P ЭҚК E мен машинаның U кернеуінің векторларының арасындағы жүктеме бұрышына θ тәуелді болады. E=const мен U=const болған кездегі $P=f(\theta$ тәуелділігі синхронды машинаның активті қуатының бұрыштық сипаттамасы деп аталады. $R_a=0$ деп қабылдап, қуаттың бұрыштық сипаттамасы үшін математикалық өрнекті қорытып шығарамыз. Айқындалған полюсті машинаның векторлық диаграммасынан аламыз:

$$E = x_d I_d + U\cos\theta;\ \ x_q I_q = U\sin\theta, \qquad (11.1)$$

мұнан

$$I_d = \frac{E - U\cos\theta}{x_d};\ \ I_q = \frac{U\sin\theta}{x_q}. \qquad (11.2)$$

10.5а сурет бойынша $\varphi = \psi - \theta$ болатынын ескеріп, генератордың қуаты үшін:

$$P = mUI\cos\varphi = mUIcos(\psi - \theta) = mU(I\cos\psi\cos\theta) + I\sin\psi\sin\theta) = mU\left(I_q\cos\theta + I_d\sin\theta\right).$$

Мұнда I_d мен I_q (3.1) өрнек бойынша ауыстырып, аламыз:

$$P = \frac{mU^2}{x_q}\sin\theta\cos\theta + \frac{mEU}{x_d}\sin\theta - \frac{mU^2}{x_d}\sin\theta\cos\theta. \qquad (11.3)$$

11.4 Синхронды машинаның қуаттарының бұрыштық сипаттамалары. Активті қуаттың бұрыштық жылдамдықтарының формулаларын қорытындылау

Жоғарыда айтылып кеткендей синхронды машинаның қуаты P жүктеме бұрышынан θ тәуелді. E=const және U=const кезіндегі $P=f(\theta)$ тәуелділіктері синхронды машинаның бұрыштық сипаттамалары деп аталады. Айқын полюсті машинаның векторлық диаграммасынан аламыз:

$$E = x_d I_d + U\cos\theta;\ \ x_q I_q = U\sin\theta \qquad (11.4)$$

содан:

$$I_d = \frac{E - U\cos\theta}{x_d};\ \ I_q = \frac{U\sin\theta}{x_q} \qquad (11.5)$$

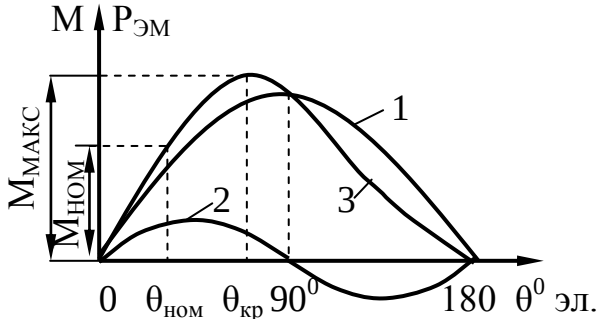
10.5а суреттегі, $\varphi = \psi - \theta$, генератор қуаты келесідей болады:

$P = mUI\cos\varphi = mUIcos(\psi - \theta) = mU(I\cos\psi\cos\theta) + I\sin\psi\sin\theta = mU\left(I_q\cos\theta + I_d\sin\theta\right)$:

$$P = \frac{mU^2}{x_q}\sin\theta\cos\theta + \frac{mEU}{x_d}\sin\theta - \frac{mU^2}{x_d}\sin\theta\cos\theta; \qquad (11.6)$$

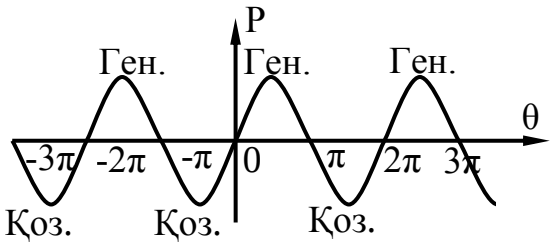
$$P = \frac{mEU}{x_d}\sin\theta + \frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\theta. \qquad (11.7)$$

$M=P/\Omega=pP/\omega$ қуатқа P пропорционал және сондықтан $M= f(E,U,\theta,X_d,X_q)$ тәуелділігінің түрі осыған ұқсас болады.



11.2–Бұрыштық сипаттамалар

11.5 Айқындалмаған полюсті машина. Статикалық орнықтылық жөнінде түсінік



11.3 сурет – Айқын емес полюсті машинаның активті қуатының бұрыштық сипаттамалары

Ары қарай машина қуаты шексіз желімен параллель жұмыс істейді деп ұйғарамыз және сондықтан U = const, f = const және генератордың қоздырушы тогы өзгермейді. Қарапайымдылық үшін сондай-ақ, X_d =const және X_q = const деп жорамалдаймыз.

Айқындалмаған полюсті машинада X_d =X_q және өрнектің негізінде:

$$P = \frac{mEU}{x_d}. \qquad (11.7)$$

Жарты толқын P>0 жұмыстың генератор режиміне және P<0 жарты толқын қозғалтқыш режиміне сәйкес келеді.

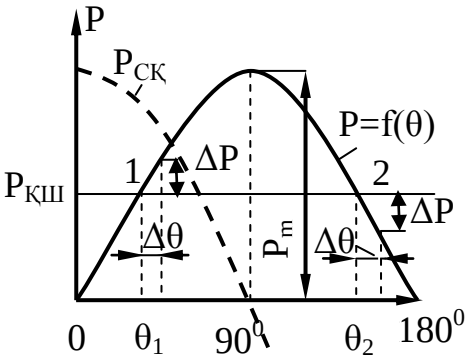
$-\pi \le \theta \le 0$ диапазоны қозғалтқыш, ал $0 \le \theta \le \pi$ диапазоны генератор режиміне сәйкес келеді. Синусоидалы қисықтың жарты периоды симметриялы болатындықтан, синхронды машинаның қозғалтқыш және генератор режимдеріндегі қасиеттері ұқсас болады. Айқындалмаған полюсті машина үшін:

$$P_m = \frac{mEU}{x_d}. \qquad (11.8)$$

(11.8) теңдікте көрсетілгендей *ЭҚК* E немесе машинаның қоздырушы тогы, кернеуі U қаншама үлкен болса және X_d қаншама аз болса P_m соншама үлкен болады. Осы себептен X_d азайту мақсатымен синхронды машиналардың ауа саңылауы асинхронды машиналардікімен салыстырғанда үлкен етіп жасалады.

Генератордың қалыпты жұмыс режимінде бірінші реттік қозғалтқыш беретін механикалық қуат $P_{ҚШ}$, генератор желіге беретін электрлік P қуатқа тең болады, яғни $P_{ҚШ} = P$.

$P_{ҚШ}$ қуат θ бұрышына тәуелсіз болады және сол себептен 11.4 суретте горизонталь түзу сызықпен бейнеленген, ол *1* және *2* нүктелерде электрлік қуаттың $P = f(\theta)$ сипаттамасымен қиылысады. Бұл нүктелерде $P_{ҚШ}=P_{СҚ}$, демек олардың екеуіде жұмыстың қалыпты орнықты режиміне сәйкес келуі керек болатын. Бірақ орнықты жұмыс тек қана *1* нүктеде болады



11.4 сурет - Айқын емес полюсті генератордың активті қуатының бұрыштық сипаттамалары

Шынында, егер 11.4 суреттегі *1* нүктеде жұмыс істеп тұрған кезде аздаған кездейсоқ өтпелі ауытқу нәтижесінде θ бұрышы $\Delta\theta$ өседі, онда генератордың электрлік қуаты бірінші реттік қозғалтқыштың қуатынан ΔР асып кетеді. Осының салдарынан білікке артық тежеуші электромагниттік момент әсер етеді:

$$\Delta M = \frac{\Delta P}{\Omega} = \frac{p\Delta P}{\omega}. \qquad (11.9)$$

Генератордың роторы тежелетін болады. θ бұрышы азаяды, және *1* нүктеде орнықты қалыптасқан жұмыс режимі қалпына келтіріледі. Егер *1* нүктеде жұмыс істеп тұрған кезде θ бұрышы кездейсоқ ауытқу нәтижесінде азайса, онда бұл ауытқудың әрекеті тоқтаған кезде генератор тағыда *1* нүктедегі жұмыс режиміне қайтып келеді.

Егерде 11.4 суреттегі *2* нүктеде жұмыс істеген кезде θ бұрышы кездейсоқ ауытқу нәтижесінде $\Delta\theta$ өссе, онда генератордың қуаты турбинаның қуатынан ΔР азаяды, ротор үдейді, θ бұрышы тағыда өсе береді. Нәтижесінде генератор синхрондылықтан шығады немесе қолайлы жағдайда 11.4 суреттегі қисықтың келесі жарты толқынында ротордың жұп полюстік бөлікке «сырғуынан» кейін қалыпты жұмыс режиміне өтеді. Егерде *2* нүктеде жұмыс істеген кезде θ азайса, онда қуаттар балансының бұзылу салдарынан бұл бұрыш *1* нүктеде бұл баланыс қалпына келтірілгенге дейін азая береді.

Сонымен, айқындалмаған полюсті генератордың жұмысы $0<\theta<90°$ аралығында орнықты және $90° < \theta < 180°$ аралығында орнықсыз болады.

Осы жолмен айқындалмаған полюсті синхронды қозғалтқыштыңда

$0 > \theta > -90°$ аралығында орнықты жұмыс істейтінін анықтауға болады.

Егер жұмыс режимінде аздаған ауытқу болған кезде (U, $P_{ПД}$, i_B және т.б. аздап ауытқуы) жұмыс режимінің өзгеруіде аз болатын болса және

бұл ауытқудың әрекеті тоқтаған кезде бұрынғы жұмыс режимі қалпына келетін болса, нақты қондырғының жұмыс режимі статикалық орнықты деп аталады. Жоғарыда айтылғандардан шығатыны синхронды машинаның жұмыс режимі, егер:

$$\frac{\Delta P}{\Delta\theta} > 0 \text{ статикалық орнықты және } \frac{\Delta P}{\Delta\theta} < 0 \text{ орнықсыз} \qquad (11.10)$$

болады.

11.6 Статикалық асқын жүктелу

Синхронды машинаның қуаты P=0 болғанда, $\theta = 0$ тең болады. P өскен кезде θ - де өседі және $\theta = \theta_{KP}$ болған кезде қуат масимал мәнге жетеді $P=P_m$. Біліктегі механикалық қуат ары қарай өскен кезде машина синхрондылықтан шығады және оның роторы статордың магнит өрісіне қатысты (якорь реакциясының өрісі) қандайда бір S сырғанаумен асинхронды айналатын болады. Қозғалтқышта ротордың жылдамдығы синхрондыдан аз болады (S>0) және генераторда синхрондыдан көп болады (S<0). Мұндай асинхронды режим қалыптан тыс және рұқсат етілмейтін режим болады, себебі ол машина үшін қауіпті және синхронды машинамен жалғанған желінің, машиналар мен механизмдердің қалыпты жұмысын бұзады. Сондықтан синхронды машиналарды пайдаланған кезде олардың орнықты синхронды жұмысының жеткілікті дәрежеде қамтамасыз етілуінің қамын ойлау керек.

Синхронды машиналар жұмыс істеген кезде қысқа мерзімдегі асқын жүктемеге ұшырауы мүмкін. Мұнан басқа, кернеудің азаю салдарынан, мысалы, желінің қысқаша тұйықталуы кезінде машина тудыра алатын қуат P_m төмендейді. Сондықтан машинаның қуат қоры жеткілікті болуы керек, яғни P_m мәні жеткілікті мөлшерде үлкен болуы керек.

Синхронды машинаның статикалық асқын жүктелуі $U=U_H$ және $i_Қ = i_{ҚН}$ болған кезде P_m номинал қуатқа P_H қатынасымен сипатталады:

$$K_П = \frac{P_M}{P_H}. \qquad (11.11)$$

Синхронды машинаның статикалық асқын жүктелуі $K_П \geq 1{,}65 - 1{,}7$ кем болмауы керек.

12 Дәріс №12. Қоздырылмаған айқындалған полюсті машина. Синхронды қозғалтқыштар және компенсаторлар

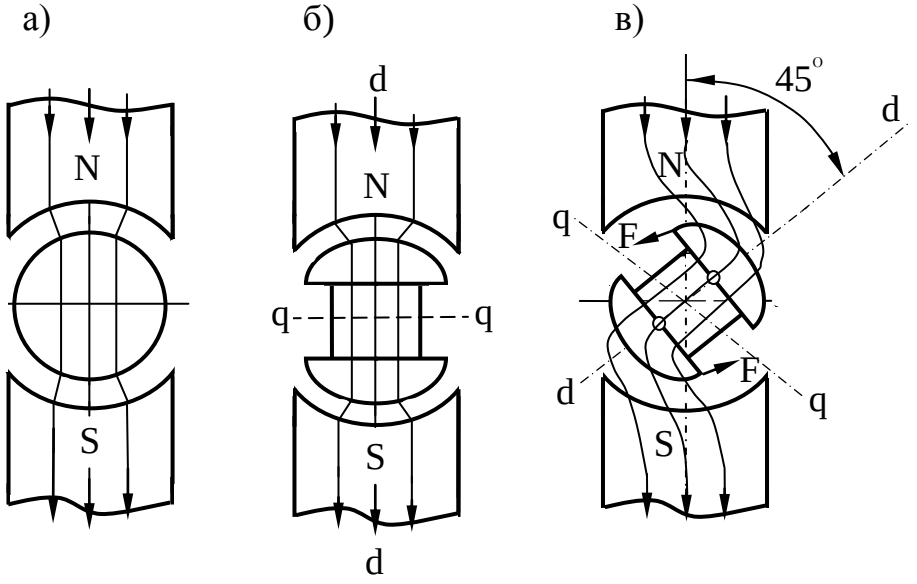
Дәрістің мазмұны:
- қоздырылмаған айқындалған полюсті машина;
- *U*-тәріздес сипаттамалар;
- синхронды қозғалтқыштар және компенсаторлар.

Дәрістің мақсаты: синхронды машиналардың әртүрлі жұмыс режимдері туралы түсінік беру.

12.1 Қоздырылмаған айқындалған полюсті машина

Егер i_B=0 болса, онда E=0 болады, себебі кәдімгі машиналарда қалдық магнит ағынынан пайда болатын ЭҚК елеусіз аз болады. Бұл жағдайда (11.6) өрнектің негізінде:

$$P = \frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\theta \ . \qquad (12.1)$$



12.1 сурет - Қоздырылмаған синхронды машинаның магнит өрісінің суреттері

P=(θ) тәуелділігі, теңдік бойынша жиілігі екі еселенген синусоида болады. (12.1) теңдік пен 11.2 суреттен, айқындалған полюсті машина синхронды жұмыс режимінде және қоздырылмаған кезде де қуат тудыра алатын жағдайда болатынын байқаймыз.

Қарастырып отырған жағдайда машинада тек қана якорь реакциясының ағыны бар. Цилиндр тәріздес ротор кезінде (12.1, *а* сурет), X_d=X_q болғанда айналатын якорь реакциясының өрісіне қатысты ротордың қалай тұруы бәрібір болады, сондықтан машина электромагниттік момент

пен қуат тудырмайды. Айқындалған полюсті машинада ротор айналатын якорь реакциясының өрісіне қатысты, бұл кезде магнит ағынына тудыратын кедергісі және магнит өрісінің энергиясы минимал болатын қалыпта тұруға ұмтылады. Егер бұл кезде білікке берілетін момент M_{CT}=0 болса, онда $\theta = 0$ болады (12.1, б сурет) және роторға әсер ететін электромагниттік моментте нөлге тең болады. Бұл кезде (12.1) теңдік бойынша қуатта $P=0$ тең болады. Егер білік сыртқы моментпен жүктелген болса, онда ротор өріске қатысты ығысады, $\theta \neq 0$ және машинада электромагниттік момент пен активті қуат пайда болады (12.1, в сурет). Ротордың өзі магниттелмегендіктен ротордың өріске қатысты $180°$ бұрылуы режимді өзгертпейді.

Қоздырылмаған айқындалған полюсті машинада электромагниттік момент ауа саңылауы бір қалыпты болмаған $X_d \neq X_q$ кезде тек қана якорь реакциясы өрісі әрекетінің салдарынан пайда болады және сондықтан реактивті деп аталады.

Реактивті жұмыс режимі, мысалы, айқындалған полюсті машина желімен параллель жұмыс істеп тұрған кезде қандай-да бір себептерден қоздырылуын жоғалтқан жағдайда (қоздырғыш бұзылғанда, өрісті өшіретін автомат жалған іске қосылғанда және т.б.) және бұл кезде аз жүктелген болса пайда болады. Соңғы жағдай маңызды себебі, бұл режимде генератор тудыра алатын қуат көп емес. Машина бұл режимде магнит өрісін тудыру үшін үлкен реактивті ток тұтынады. Сонымен қатар қоздырушы орамасы жоқ және реактивті деп аталатын қуаты аз синхронды қозғалтқыштарда жасалуда.

12.1.1 Синхронды машиналардың тұрақты қуат және айнымалы қоздыру кезіндегі жұмысы. Синхронды машиналардың *V*-тәріздес сипаттамалары.

Бұл $P = const$, $U = const$, $f = const$. болған кездегі $I = f(i_в)$ тәуелділігі.

Талдауды жеңілдету үшін бұл тәуелділікті айқындалмаған полюсті машина үшін қарастырамыз. Егер активті кедергіні ескермесек теңдеудің түрі төмендегідей болады:

$$\dot{U} \cong \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{\sigma a} = \dot{E} - j\dot{I}X_d \quad \text{немесе} \quad \dot{E} = \dot{U} + j\dot{I}X_d. \qquad (12.2)$$

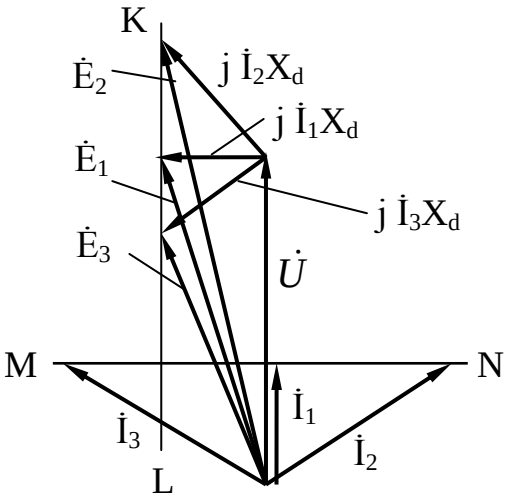
$P = const$ шартынан векторлық диаграмма тұрғызудың келесідей екі принципі пайда болады:

1) $P = mUI\cos\varphi$, демек, $I\cos\varphi = const$;

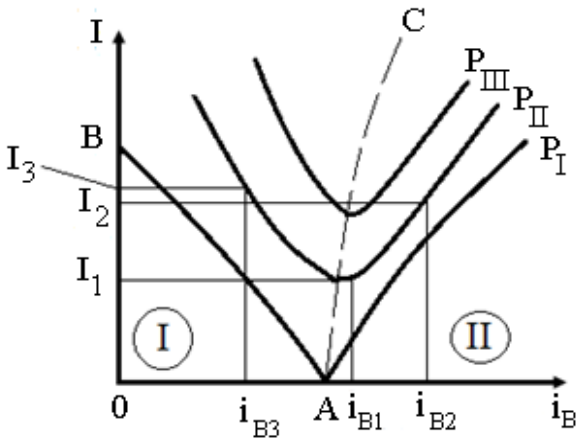
2) $P = \frac{mU\text{E}}{X_d}\sin\Theta$, демек, $E\sin\Theta = const$.

Мұнан шығатыны, ЭҚК векторның соңы қоздырушы ток кез келген мәнге өзгерген кезде *KL* тузуінің бойымен жылжиды, ал якорь тогы векторының соңы – *MN* түзуінің бойымен.

Алдымен диаграмманы якорь тогы таза активті болған жағдай үшін тұрғызамыз I_1. $j\dot{I}_1\ X_d$ векторы $i_{қ1}$ тогы тудыратын $\dot{E}_1$ векторына перпендикуляр болады. Ары қарай қоздырушы токты $i_{қ2}$ дейін өсіреміз. Оған векторның соңы *KL* сызығының бойымен жылжитын $\dot{E}_2$ ЭҚК сәйкес келеді. (12.2) теңдеу бойынша $j\dot{I}_2\ X_d$ векторын және оған перпендикуляр болатын I_2 тогының векторын, оның соңы *MN* түзуінің бойымен сырғитындай етіп тұрғызамыз. Осыған ұқсас жолмен $i_{в3} < i_{в1}$ ток үшін диаграмма тұрғызамыз. Алынған барлық мәндерді 12.2 суреттегі сызбаға көшіреміз. Сызбада $P_{III} > P_{II} > P_I$, және $P_I = 0$.



12.2 сурет – Айқын емес полюсті машинаның векторлық диаграммасы



12.3 сурет – U – тәріздес сипаттамалар

12.2 Синхронды қозғалтқыштар мен компенсаторлар

12.2.1 Синхронды қозғалтқыштар.

Синхронды қозғалтқыштардың, асинхронды қозғалтқыштармен салыстырғанда артықшылықтары үлкен, себебі тұрақты токпен қоздырылатындықтан олар жұмыс істеген кезде $cos\varphi=1$ болуы мүмкін және бұл кезде ол желіден реактивті қуат тұтынбайды, ал асқын қоздырылып жұмыс істеген кезде тіпті реактивті қуатты желіге береді. Нәтижесінде желінің қуат коэффициенті жақсарады және кернеудің түсуі мен оның шығыны азаяды, сондай-ақ электр станцияларында жұмыс істейтін генераторлардың қуат коэффициенті өседі. Синхронды қозғалтқыштың максимал моменті *U* пропорционал болса, ал асинхронды қзғалтқышта U^2 пропорционал болады. Сондықтан кернеу төмендеген кезде синхронды қозғалтқыштың асқын жүктемелік қабілеттілігінің үлкен бөлігі сақталады.

Басқа жақтан, синхронды қозғалтқыштардың құрылысы қысқаша тұйықталған роторлы асинхронды қозғалтқыштардан күрделі болады

және одан басқа, синхронды қозғалтқыштарда қоздырғыш немесе қоздырушы ораманы тұрақты токпен қоректендіру үшін, арналған басқа бір құрылғылар болу керек. Осының салдарынан синхронды қозғалтқыштар көптеген жағдайда қысқаша тұйықталған роторлы асинхронды қозғалтқыштан қымбат болады. Синхронды қозғалтқыштарды жүргізуде және айналу жылдамдығын реттеуде күрделірек болады.

Сонда да, синхронды қозғалтқыштардың артықшылығы соншалықты жоғары, себебі оларды P_H > 200 - 300 *кВт* кезде жиі жүргізу мен тоқтатуды және айналу жылдамдығын реттеуді қажет етпейтін барлық жерде (қозғалтқыш-генераторлар, үлкен қуатты насостар, желдеткіштер, компрессорлар, диірмендер, ұнтақтағыштарда және т.б.) пайдалану тиімді болады.

Синхронды қозғалтқыштарды қолдану үзіліссіз кеңуде және оларды P_p = 50 000 *кВт* дейінгі қуатқа жасайды.

12.2.2 Синхронды қозғалтқышты жүргізу тәсілдері.

Синхронды қозғалтқыштарды кеңінен пайдалануға кедергілердің бірі, асинхронды қозғалтқыштармен салыстырғанда олардың қымбаттылығынан басқа, оларды жүргізудің күрделілігі болады. Осыған байланысты келесідей жүргізу тәсілдері пайдаланылады:

1) оның роторын синхрондыға жақындатып айналдыруға қабілеті бар қосымша қозғалтқышпен жүргізу;

2) асинхронды жүргізу. Ол үшін ротордың полюстік ұштарындағы жабық ойықтарға арнайы жүргізуші қысқаша тұйықталған орама орналастырады.

Қоздырушы орама сөндіруші кедергіге тұйықталады. Содан кейін синхронды қозғалтқышты үш фазалы желіге қосады және айналу синхрондыға жақындаған кезде резистор қоздырушы орамадан ажыратылады да, оған тұрақты ЭҚК көзінен кернеу беріледі. Ротор автоматты түрде синхрондыға жеткізіледі.

Қуаты үлкен синхронды қозғалтқыштарды асинхронды жүргізу жүргізуші токты азайту үшін асинхронды қозғалтқыштағыдай, төмендетілген кернеу кезінде іске асырлады.

Үш фазалы синхронды қозғалтқыштарды реверстеу асихрондыдағыдай статор орамасындағы кез келген екі фазаны ауыстыру жолымен іске асырылады.

12.2.3 Синхронды компенсаторлар.

Синхронды компенсаторлар желінің қуат коэффициентін компенсациялау және тұтынушылық жүктемелер шоғырланған аймақтақтарда желінің кернеуінің қалыпты деңгейдегі мәнін сақтап тұру үшін арналады. Синхронды компенсатордың, ол желіге реактивті қуат беретін кездегі асқын қоздырылған жұмыс режимі қалыпты болады.

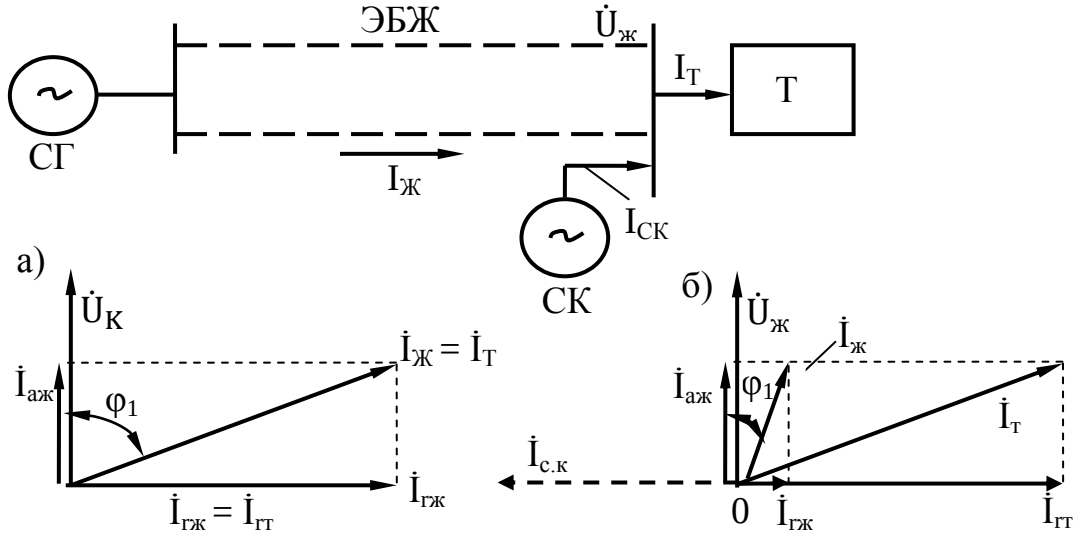
Осыған байланысты компенсаторларды реактивті қуат генераторлары депте атайды. Дегенмен тұтынушылық жүктеме азайған уақытта (мысалы, түнде) синхронды компенсаторлардың асқын қоздырылмаған режимде жұмыс істеу қажеттілігі жиі болып тұрады, бұл кезде олар желіден индуктивті ток және реактивті қуат тұтынады, себебі бұл жағдайларда желінің кернеуі өсуге ұмтылады сондықтан оны қалыпты деңгейде сақтап қалу үшін желіні индуктивті токтармен жүктеуге тура келеді.

Компенсаторлар $S_Н$ = 100 000 *кВа* дейінгі қуатқа жасалады және құрылысы айқындалған полюсті болады, әдетте *2p* = 6 немесе *8* тең. Бұл, сутегімен салқындатылатын етіп жасалған алғашқы машиналар.

Асинхронды жүргізуді іске асыру үшін барлық синхронды компенсаторлардың полюстік ұштары жүргізуші орамалармен жабдықталады немесе олардың полюстері шомбалды етіп жасалады. Бұл кезде тікелей, ал қажет болған жағдайда реакторлық жүргізу тәсілі пайдаланылады. Кейбір жағдайда қуатты компенсаторлар олармен бір білікте бекітілген жүргізуші фазалық асинхронды қозғалтқыштың көмегіменде жүргізіледі. Желімен синхрондау үшін бұл кезде әдеттегідей өздігінен синхрондалу тәсілі қолданылады.

Синхронды компенсаторлар активті қуатты үдетпейтіндіктен, олар үшін статикалық орнықты жұмыс туралы сұрақтың қажеті болмайды. Сондықтан оларды генераторлар мен қозғалтқыштарға қарағанда кіші ауа саңылауымен жасайды және осыған сәйкес оларда X_d және X_q мәндері үлкен болады. Саңылауды кішірейту қоздырушы ораманы жеңілдетуге және машинаны арзандатуға мүмкіндік береді.

Кейбір жағдайларда су аз болған мезгілде компенсаторлар режимінде жұмыс істеу үшін су электр станцияларының генераторларында пайдаланады.



а) – синхронды компенсаторсыз; б) - синхронды компенсатормен.

12.4 сурет – Векторлық диаграммалар

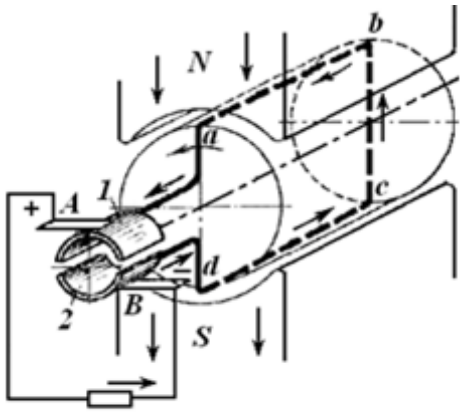
13 Дәріс №13. Тұрақты ток машиналары

Дәрістің мазмұны

- тұрақты ток машинасының жұмыс істеу принципі және құрылысы;
- теңдеулері және якорь реакциясы;
- тұрақты ток машиналарының қоздырылу тәсілдері бойынша жіктелуі;
- тұрақты ток генераторы.

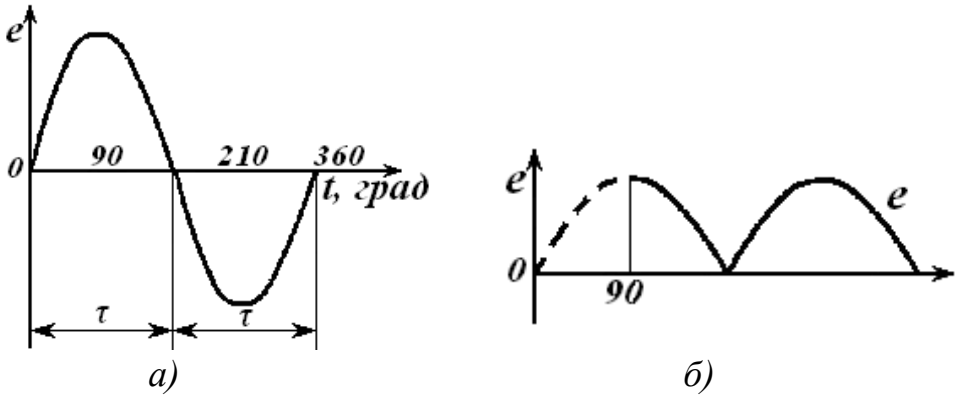
Дәрістің мақсаты: якорь реакциясының машинаның жұмысына тигізетін әсерін көрсету.

13 Тұрақты ток машинасының жұмыс істеу принципі



13.1 сурет - Тұрақты ток машинасының жұмыс жасау реті

Қарапайым генератор ретінде екі тұрақты магнит *N* және *S* арасындағы магнит өрісінде айналатын, рама тәріздес бір орамнан тұратын өткізгіш жұмыс істей алады (13.1 сурет). *abcd* орамның соңдары коллектордың бір - бірінен және өздері орналасқан біліктен оқшауландырылған екі мыс табақтарына жалғанады. Табақтарда қозғалмайтын *A* және *B* щеткалар орналасқан, оларға қандайда бір электр энергиясының қабылдағыштарынан тұратын сыртқы тізбек қосылған. Орам тұрақты жиілікпен айналған кезде *ab* және *cd* өткізгіштер магнит сызықтарын қиып өтеді, бұл кезде өткізгіштерде *ЭҚК* индукцияланады. Өткізгіштерде индукцияланатын *ЭҚК* бағыттары магнит өрісі кеңістікте бір қалыпты таралған кезде оң қол ережесімен анықталады. *ab* өткізгіште орам бір рет айналған кезде өзінің бағытын 2 рет өзгертетін, уақыт бойынша айнымалы болатын ЭҚК пайда болады.



а) *б)*

13.2 сурет – Орамадағы индукцияланатын ЭҚК (*а*) және сыртқы участкідегі (*б*)

Генератор бір қалыпты жұмыс істеу үшін щеткаларды, бір табақтан екіншісіне өткен кезде орамда пайда болатын ЭҚК нөлге тең болатындай етіп орналастыру керек. Щеткалардың әрқайсысы тек қана берілген полярлықтағы полюстердің астында болатын коллектордың табағымен және тек осыған сәйкес келетін өткізгішпен ғана жанасатын болады. Сондықтан щетка *А* әрқашан оң потенциалды, ал щетка *В* тек қана теріс потенциалды болады. Сонымен, *abcd* орам бойынша бұрынғыдай айнымалы ток жүреді; бұл кезде тізбектің сыртқы бөлігінде ток тек қана бір бағытта өтеді, атап айтқанда оң щеткадан *А* теріс щеткаға *В* қарай, яғни орамда пайда болған айнымалы *ЭҚК* тізбектің сыртқы бөлігінде толықситын ЭҚК түзету жүреді (13.2, *б* сурет). Толықсуды азайту үшін коллекторлық табақтардың санын өсіру керек. Осылайша, тұрақты ток генераторларында коллектор, якорь орамасында индукцияланатын айнымалы *ЭҚК* щеткаларда тұрақтыға түзететін түзеткіштің міндетін атқарады.

13.1 Тұрақты ток машинасының құрылысы және оның құрамының негізгі элементтері

Тұрақты ток машинасы айналмайтын бөлігі статордан (индуктор) және айналатын бөлігі якорьден тұрады, онда механикалық энергияны электр энергиясына түрлендіру (генератор) немесе керісінше электр энергиясын механикалыққа (қозғалтқыш) түрлендіру үрдісі жүреді. Қозғалмайтын және айналатын бөліктердің арасында саңылау болады. Қозғалмайтын бөліктен, негізгі магнит ағынын тудыруға арналған басты полюстерден, щеткалардың коллекторда ұшқын шығармай жұмыс істеуін қамтамасыз ететін (коммутацияны жақсарту) қосымша полюстерден құралады. Станинаға болттармен мойынтірек қалқандарын, басты және қосымша полюстерді бекітеді.

Негізгі (басты) полюсте қалыңдығы *0,5 – 1* мм болатын электртехникалық болат жапырақшалардан, шпилькалармен тартылып жиналған өзекше болады. Өзекшеге қоздырушы ораманың екі орауышы орналасқан. Компенсацияланған тұрақты ток машинасында компенсациялаушы ораманы орналастыру үшін полюстік ұштарға ойықтар жасалған. Полюстер станинаға болаттармен немесе шпилькалармен бекітіледі.

Тұрақты ток машинасының якорі орамасы бар якорь өзекшесінен, коллектордан, желдеткіштен және шариктік мойынтіректері немесе роликтік мойынтіректері бар біліктен құралады.

Машинаның якорінің өзекшесі қалыңдығы 0,5 мм болатын электртехникалық болат жапрақшалардың пакетінен құрастырылады. Якорь орамасын коллектор табақтарына жалғайды.

Якорь орамасындағы ЭҚК және электромагниттік моменттің теңдеулері:

$$E_{Я} = c_E n \Phi, \qquad (13.1)$$

мұнда $c_E = pN/(60a)$ - тек қана берілген электр машинасының орамалық мәліметтеріне тәуелді болатын тұрақты коэффициент:

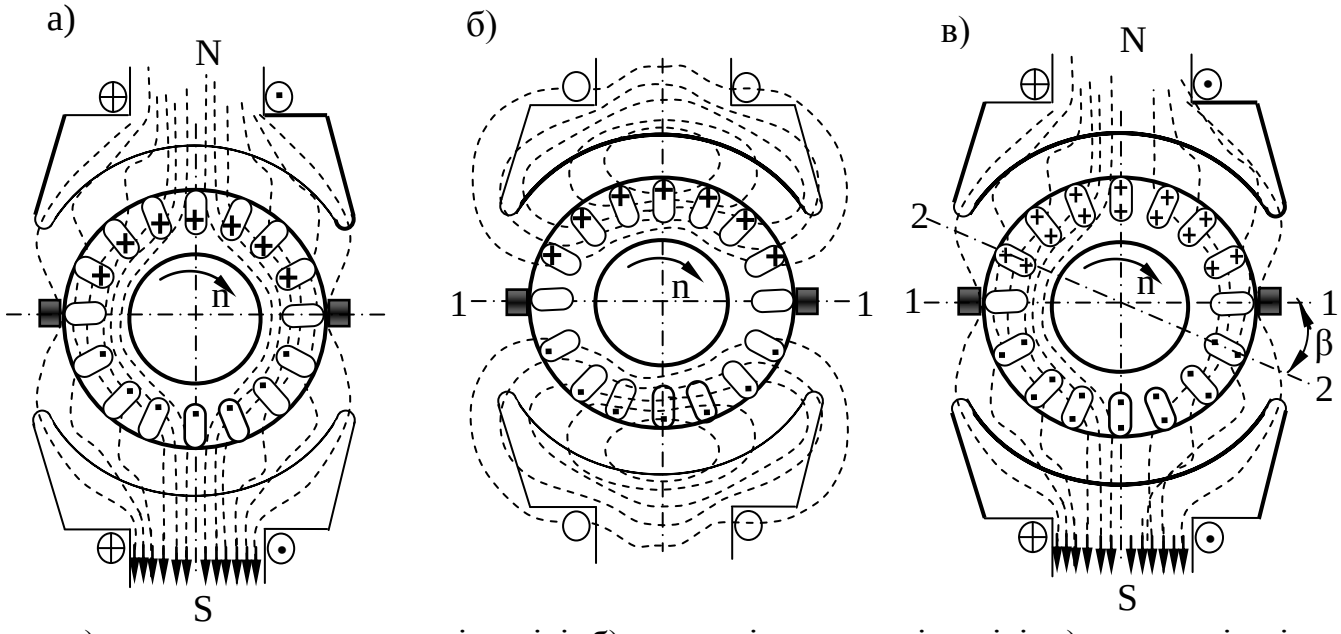
$$M = C_M I_Я \Phi, \qquad (13.2)$$

мұнда $C_M = pN/(2\pi a)$ - берілген машина үшін тұрақты шама.

13.2 Тұрақты ток машинасының якорь реакциясы

13.2.1 Якорь реакциясы туралы түсінік.

Машина бос жүріс режимінде жұмыс істеген кезде машинада қоздырушы ораманың МҚК тудыратын тек қана негізгі магнит ағыны *Ф* болады. Электр машинасын жүктеген кезде, негізгі магнит ағынынан басқа, якорь тізбегіндегі ораманың магнит өрісі болады. Якорь МҚК негізгі полюстердегі МҚК тигізетін әсерін якорь реакциясы деп атайды. Бұл құбылысты зерттеген кезде біз беттестіру тәсілін пайдаланамыз, ол үшін полюстердің негізгі өрісінің және якорь өрісінің таралуын жеке-жеке тұрғызамыз, сонан соң оларды беттестіріп машинаның қорытынды магнит өрісін аламыз. 13.3, *а* суретте көрсетілген екі полюсті машинада негізгі магнит ағынының таралуы бос жүріс кезінде негізгі полюстердің өстік сызықтарына *dd* қатысты және кеңістікте өзгермейтін геометриялық бейтарапқа қатысты симметриялы болады. Якорь сағат тілі бойынша айналған кезде оның орамасында *ЭҚК* пайда болады, бағыты 13.3, *а* суретте крестермен және нүктелермен көрсетілгендей болады, бірақ якорь орамасында ток жоқ, себебі тізбек ажыратулы.



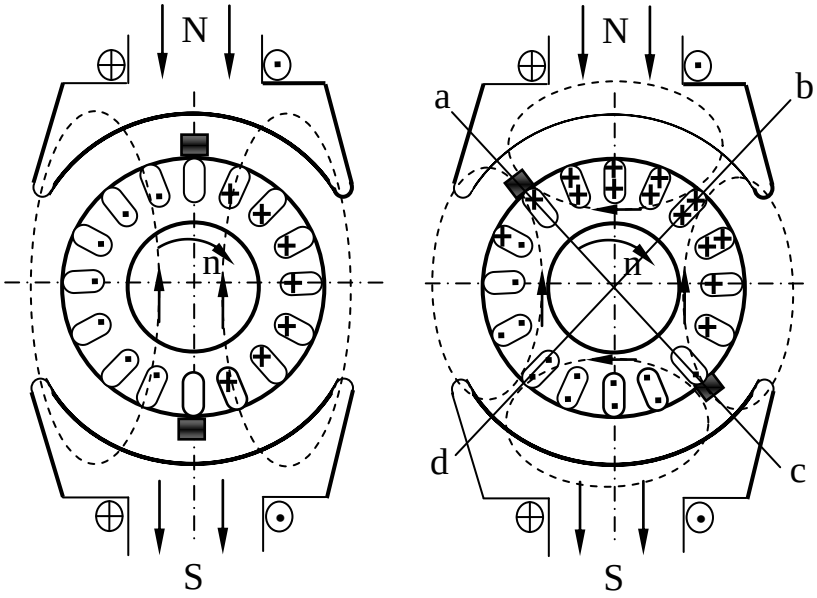
а) индуктордың магниттік өрісі; б) якорьдің магниттік өрісі; в) нәтижелі өріс.

13.3 сурет– Тұрақты ток генераторының магниттік өрістері

қоздырылмаған, ал якорь қозғалмайды: $I_B=0$ және $n=0$. Щеткаларды геометриялық бейтарап сызығының бойымен орналастырамыз және оларға басқа бір тұрақты ток көзінен, ораманың тармақтарындағы токтардың бағыты *ЭҚК* бағытымен сәйкес келетіндей ток береміз. Бұл жағдайда якорь өрісінің магнит сызықтары (олардың бағытын якорь орамасы өткізгіштіктеріндегі токтардың бағытын негізгі етіп бұранда заңы бойынша анықтаймыз) якорьдің сол жағынан шығып және оң жағынан кіреді.

13.2.2 Якорьдің көлденең және бойлық магнит қозғаушы күштері

Егер щеткалар геометриялық бейтарап сызықта *qq* (13.4, *а* сурет) тұрса, онда якорь өрісі 90° бұрышпен бағытталады, яғни негізгі полюстердің остік сызығына *dd* көлденең. Якорьдің мұндай өрісін көлденең деп атайды және ол якорьдің көлденең МҚК $F_{Яd}$ анықталады. Щетка бейтараптан $\pm 90°$ бұрышқа ығысқан кезде якорь өрісінің осі полюстер осінің *dd* бойымен абсцисса осінен жоғары немесе төмен орналасады (13.4*б* сурет).



а) индуктордың магниттік өрісі; б) якорьдің магниттік өрісі.
13.4 сурет– Тұрақты тоқ генераторының магниттік өрісі

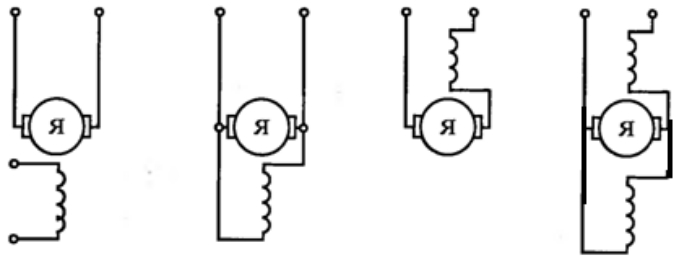
Якорьдің мұндай өрісін бойлық деп атайды және ол якорьдің бойлық МҚК $F_{Яq}$ анықталады. Жалпы жағдайда щеткалар бейтараптан β бұрышқа немесе якорь шеңберінің бойымен осыған сәйкес b_C доғаға ығысуы мүмкін (13.4, *б* сурет). Бұл жағдайда якорьді беттестірілген екі электромагнит ретінде қарастыруға болады, олардың біреуі ораманың бөлігінен жасалған және екі еселенген бұрышпен 2π тұрады, якорьдің бойлық МҚК $F_{Яd}=2Ab_C$ тудырады, ал басқасы, доға бойымен ораманың қалған бөлігімен жасалған $\tau-2b_C$, якорьдің көлденең МҚК $F_{Яq}=A(\tau-2b_C)$ тудырады. Машинаны жүктеген кезде қорытынды магнит қозғаушы күші пайда болады, ол полюс остері бойынша симетриялы болмайды. Магнит өрісінің бұзылу себебі, якорьдің көлденең өрісінің магнит сызықтарының бағыты және полюстің өтіп бара жатқан

шетканың астындағы полюстердің өрістері сәйкес келеді, осыдан полюстің өтіп бара жатқан шетканың астындағы қорытынды магнит өрісі күшейеді, ал келе жатқан шетінде бұл өрістер қарсы бағытталады, сондықтан қорытынды өріс азайады. Магнит өрісінің таралуының бұзылу салдарынан физикалық бейтарап айналу бағыты бойынша β бұрышқа ығысатын болады, оның шамасы машинаның жүктемесіне тәуелді болады. Физикалық бейтарап деп, центр арқылы және якорь шеңберіндегі магнит индукциясының нөлге тең болатын нүктесі арқылы өтетін түзуді, яғни қорытынды магнит өрісінің осіне перпендикуляр болатын түзуді айтады. Щеткалардың қанағаттанарлық жұмысын алу үшін (ұшқынсыз) қосымша полюстері жоқ машиналарда щеткаларды геометриялық бейтараптан сол бағытта α бұрышқа ығыстыруға тура келеді, ол бұрыш β бұрышынан үлкендеу болады.

13.3 Тұрақты ток генераторлары. Тұрақты ток генераторлары жөнінде жалпы мағлұмат

Тұрақты ток генераторларын қолданатын аймақ өте кең. Олар синхронды машиналардың қоздырғышы ретінде жұмыс істейді, автомашиналарда, ұшақтарда, доғамен пісірген кезде, поездарда жарық беру үшін, кемелерде және басқаларда қолданылады.

Генераторларды магнит өрісін тудыру тәсіліне байланысты тәуелсіз қоздырылатын генераторлар электромагнитпен қоздырылатын, тұрақты магнитпен қоздырылатын (магнитэлектрлік) және өздігінен қоздырылатын, оларда ток қоздырушы орама үшін, генератордың якорінен беріледі. Тәуелсіз қоздырылатын генераторда оның қоздырушы орамасы тәуелсіз тұрақты ток көзінен қоректенеді. Магнитэлектрлік қоздыру қуаты өте аз болатын машиналарда ғана қолданылады. Өздігінен қоздырылған кезде қоздырушы ораманы якорь орамасымен жалғаудың үш түрлі жолы болуы мүмкін: параллель (шунттік), тізбектеп (сериестік) және аралас (компаундік). Осыған сәйкес генераторларды параллель, тізбектеп және аралас қоздырылатын деп бөледі. Аралас қоздырылатын генераторда екі қоздырушы орама болады: біреуін параллель жалғайды, ал екіншісін тізбектеп жалғайды.



13.5 сурет – Жалғану түрлері

7.3.1 Тұрақты ток генераторларының сипаттамалары.

Негізгі сипаттамалар:

1) жүктемелік $U=f(I_К)$ бұл кезде $I_Я=const$. Дербес жағдайда, $I_Я=0$ болғанда, жүктемелік сипаттама генераторды бағалау және басқа сипаттамаларды тұрғызу үшін мәні маңызды болатын бос жүріс сипаттамасына ауысады;

2) шықпалық $U=f(I_Я)$ бұл кезде $R_В=const$;

3) реттемелік $I_В=f(I)$ бұл кезде $U=const$. Дербес жағдайда, $U=0$ болғанда, реттемелік сипаттама қысқаша тұйықтауға өтеді $I_К=f(I_К)$.

Тұрақты ток генераторының ЭҚК теңдеуі.

Генератор якорьнің қысқаштарындағы кернеу ЭҚК E_a активті кедергіге түсетін $IR_Я$ кернеудің шамасына аз болады:

$$U = E_a - IR_Я . \qquad (13.3)$$

14 Дәріс №14. Тұрақты ток генераторлары

Дәрістің мазмұны:

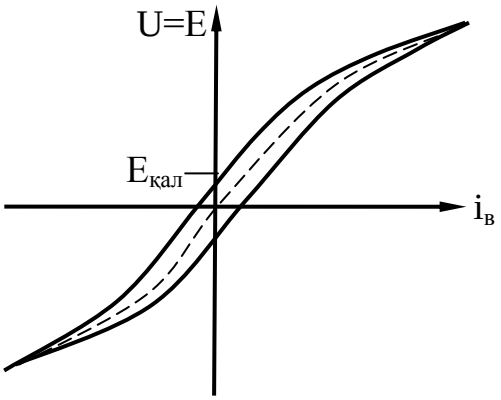
- тұрақты ток генераторы;
- сипаттамалар.

Дәрістің мақсаты: тұрақты ток генераторларының қоздыру тәсілдеріне байланысты артықшылықтары және кемшіліктері.

14.1 Тәуелсіз қоздырылатын генераторлар

Тәуелсіз қоздырылатын генераторлар көп жерлерде пайдаланылады: төменгі (4 – 24 В) және жоғарғы кернеудің (600 В жоғары) генераторларында, кернеуді үлкен аралықта реттеу қажет болатын қуаты үлкен машиналарда (кемелердің рульдік электр жетектерінде, тұрақты токтың ескектік электрлік қондырғыларында басты генераторлар және қоздырғыштар ретінде және басқа құрылғыларда).

14.1.1 Бос жүріс сипаттамасы.



14.1 сурет –Тәуелсіз қоздырылатын генератордың бос жүріс сипаттамасы

$U=f(I_В)$ бұл кезде $I_Я=0$ және $n=const$.

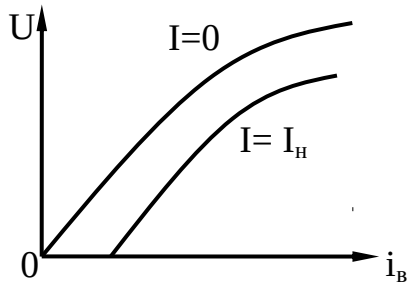
Бос жүріс сипаттамасы $U=f(Ф)=f(I_В)$ басқа масштабта, полюстер мен ярмодағы болаттың қасиеттерін анықтайтын машинаның магниттелу сипаттамасын көрсетеді (гистерезис тұзағын). 2 (гистерезистің төмен түсетін тұзағы) және 3 (гистерезистің көтерілетін тұзағы) қисық сызықтарының арасы арқылы ортаңғы

сызықты 4 жүргізіп есептік бос жүріс сипаттамасын аламыз.

14.1.2 Жүктемелік сипаттама**.**

$U=f(I_В)$ бұл кезде $I_Я \neq 0$ және $n=const$.

Жүктеме кезінде генератордың кернеуі якорь тізбегінде кернеудің түсу салдарынан $I_Я R_Я$ және якорь реакциясының магнитсіздендіру әсерінен төмендейді. Сондықтан жүктемелік сипаттама бос жүріс сипаттамасынан төменде орналасады және неғұрлым төмен болса, жүктеме тогы $I_Я$ солғұрлым үлкен болады (14.2 сурет).

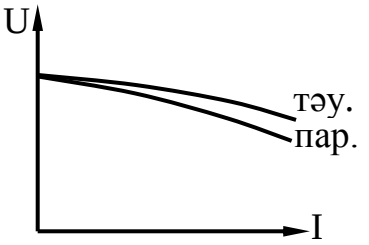


14.2 сурет –Генератодың жүктемелік сипаттамасы

14.1.3 Шықпалық сипаттама

$U=f(I_a)$ бұл кезде $i_в=const$ и $n=const$.

Жүктеме кезінде кернеудің төмендеуі екі себеп бойынша болады: якорь тізбегіндегі кедергіде кернеудің түсуінің $I_Я R_Я$ салдарынан және якорь реакциясының магнитсіздендіру әрекетінен. Кернеудің салыстырмалы өзгеруі бос жүріс кезіндегі кернеудің және номинал жүктеме кезіндегі кернеудің айырымының номинал кернеуге қатынасымен анықталады:



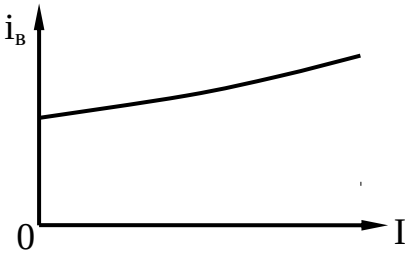
14.3 сурет –Тәуелсіз және параллель қоздырылатын генераторлардың шықпалық сипаттамалары

$$\Delta U=(U_0-U_{НОМ})U_{НОМ}= =\Delta U_{НОМ}/U_{НОМ}\ .$$

14.1.4 Реттемелік сипаттама.

$i_в = f(I_a)$ бұл кезде U=const и n=const.

Реттемелік сипаттама жүктеме тогы өскен кезде генератордың кернеуі өзгермес үшін, қоздырушы токты қалай өсіру қажеттігін көрсетеді.

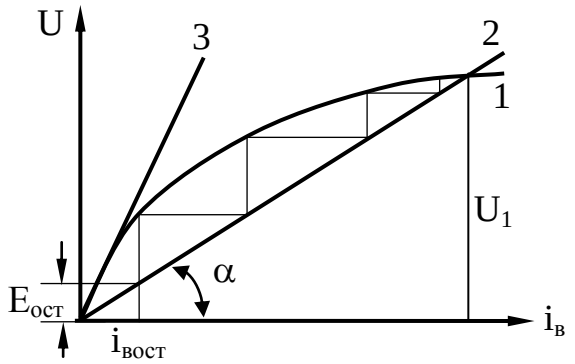


14.4 сурет –Тәуелсіз қоздырылатын генератордың реттемелік сипаттамасы

14.2 Параллель қоздырылатын генератор

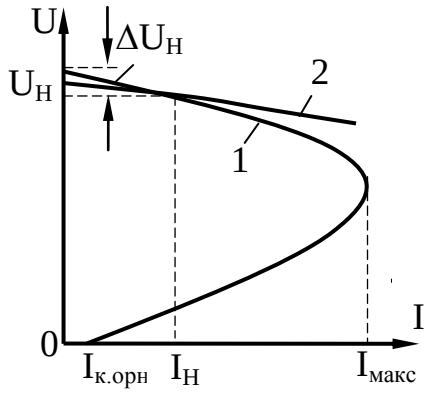
14.2.1 Өздігінен қоздырылу шарттары.

Генератор өздігінен қоздырылу үшін, онда аздаған магниттеуші қалдық ағын болуы қажет $Ф_{ҚАЛ}$ (номиналдың 2-3%). Генератордың якорі айналған кезде оның орамасында магнит ағынымен $Ф_{ҚАЛ}$ қалдық ЭҚК пайда болады $E_{ҚАЛ}=(2\text{-}3\%)E_{ҚАЛ}$, ол қоздырушы орамада аздаған ток тудырады $i_к = \frac{E_{кал}}{R_к}$. Бұл ток магниттеуші және қалдық ағындар келісімді бағытта болған кезде полюстердің магнит ағынын күшейтеді және осыған сәйкес якорь орамасында индукцияланатын ЭҚК өсіреді. ЭҚК өсуі өзімен бірге қоздырушы токты өсіреді, ал олай болса басты полюстердегі магнит ағыныда өседі.



14.5 сурет –Параллель қоздырылатын генераторды өздік қоздыру

Әдетте өздігінен қоздырылу үрдісі бос жүріс кезінде және $R_Қ=const$ болғанда пайда болады. Онда $U_Қ=f(I_Қ)$ тәуелділігі бос жүріс қисығымен (14.5 суретте 1 қисық сызық) бейнеленеді, ал $I_ҚR_Қ=f(I_Қ)$ тәуелділігі 2 түзуімен анықталады, қисық 1 және ЭҚК түзуі 2 қиылысқан A_1 нүктеде өздігінен қоздырылу үрдісі тоқталады. $tgα=U/I_Қ=R_Қ$, мұнда $R_Қ$ – қоздырушы орама мен реттеуші реостаттың кедергілері. Егер біз кедергіні $R_Қ$ өсіретін болсақ, яғни $α$ бұрышын, онда A_1 нүктесі бос жүріс сипаттамасының бойымен 0 қарай жылжиды. Егер $R_Қ$ –ді түзу 2 бос жүріс сипаттамасының бастапқы бөлігіне (5 түзуі) жанама болатындай дәрежеде өсірсек, онда бұл жағдайда генератор қоздырылмайды. Генератордың өздігінен қоздырылуы тоқталатын кездегі қоздыру тізбегінің кедергісін $R_{Қ.КР}$ сындық кедергі деп, ал осы кедергіге сәйкес келетін $α$ бұрышын сындық бұрыш деп атайды. Демек, параллель қоздырылатын генератордың өздігінен қоздырылуы келесідей шарттарды сақтаған кезде болуы мүмкін:



14.6 сурет –Тәуелсіз қоздырылатын 1 және параллель қоздырылатын 2 генератордың шықпалық сипаттамасы

а) машинаның магнит жүйесінде қалдық магнитизм болуы керек;

б) қоздырушы орама тудыратын магнит ағыны, қалдық магнетизм ағынымен бағыты бойынша сәйкес келуі керек;

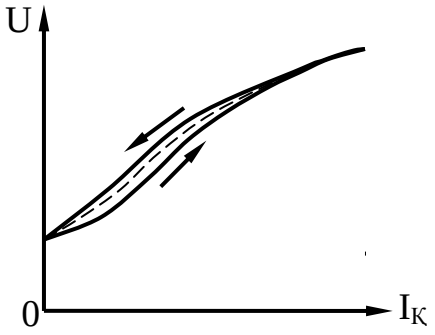
в) қоздырушы тізбектің кедергісі белгілі жылдамдықпен айналып тұрған кезде сындық кедергіден аз болуы керек $R_Қ<R_{Қ.КР}$.

14.2.2 Бос жүріс сипаттамасы мен жүктемелік сипаттама.

Параллель қоздырылатын генератор тек бір бағытта ғана өздігінен қоздырылатындықтан, $I=0$ және $n=const$ болған кездегі бос жүріс сипаттамасы да $U_0=f(I_Қ)$ тек қана бір бағытта түсірілуі мүмкін (14.6 сурет). Якорьдегі қоздырғыш токтан $I_қ$ түсетін кернеуді ескермеуге болатындықтан, бос жүріс сипаттамалары және жүктемелік сипаттама іс жүзінде тәуелсіз қоздырылатын генератордың оларға ұқсас сипаттамаларымен дәл келеді.

14.2.3 Шықпалық сипаттама $U=f(I)$ бұл кезде $R_В=const$ и $n=const$.

Егер тәуелсіз қоздырылатын генераторда қоздырушы ток өзгермейтін болса, онда параллель қоздырылатын генераторда ол жүктеменің өзгеруімен бірге өзгереді. Жүктеме өскен кезде генератордың қысқаштарындағы кернеу якорь реакциясының әсерінен және якорь тізбегіндегі кернеудің түсуінен азаяды. Кернеудің төмендеуі қоздырушы токты $I_Қ=U/R_К$ азайтады. Өз кезегінде, $I_К$ азаюы негізгі магнит ағынын әлсіретеді, демек, генератордың қысқаштарындағы ЭҚК мен кернеу де азаяды, сондықтан бұл сипаттама тәуелсіз қоздырылатын генератордың сипаттамасынан төменде болады.



14.7 сурет – Параллель қоздырылатын генератордың бос жүріс сипаттамасы

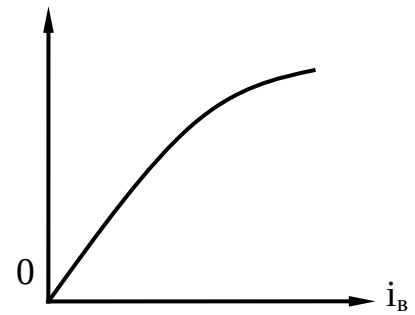
14.2.4 Реттемелік сипаттама $I_Қ=f(I)$ бұл кезде $U=const$ және $n= const$.

Параллель қоздырылатын генератордың реттемелік сипаттамасының түрі, тәуелсіз қоздырылатын генратордікіндей болады.

14.3 Тізбектеп қоздырылатын генератор

Тізбектеп қоздырылатын генератордың ерекше айырмашылығы ол, қоздырушы токтың $I_Қ=I_Я$ якорь тогына тең болуында (14.8 сурет), сондықтан бұл генератордың қасиеті шықпалық сипаттамамен ғана анықталады $U=f(I)$ бұл кезде $n=const$.

Тізбектеп қоздырылатын генератор іс жүзінде пайдаланылмайды, себебі кернеуі тұрақты болмайтындықтан көптеген



14.8 сурет –Тізбектей қоздырылатын генератордың шықпалық сипаттамасы

тұтынушылардың талабын қамтамасыз ете алмайды.

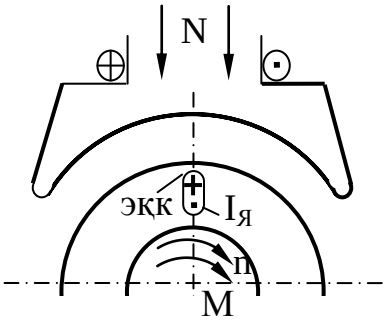
14.4 Аралас қоздырылатын генератор

Аралас қоздырылатын генераторда параллель қоздырылатын және тізбектеп қоздырылатын орамалар да болатындықтан, ол өзіне екі типтегі генераторлардың да қасиеттерін біріктіреді. Қоздырушы ағынды негізінен параллель орама тудырады. Сипаттамалардың түрі негізінен олардың қоздырушы орамаларының орамдар санының қатынасына және оларды жалғау тәсіліне байланысты болады.

14.5 Тұрақты ток қозғалтқышы

14.5.1 Тұрақты ток қозғалтқышы туралы жалпы мағлұмат және жұмыс істеу принципі.

Тұрақты ток қозғалтқыштары айналу жиілігін кең аралықта бір қалыпты реттеуді қажет ететін жерлерде өндірісте, көлікте, крандарда және басқаларда кеңінен таралған. Бір электр машинасының өзі генератор режимінде де, сондай-ақ қозғалтқыш режимінде де жұмыс істей алады. Электр машинасының бұл қасиетін қайтымдылық деп атайды.



14.9 сурет –Тұрақты тоқ қозғалтқышының әсер ету принципі

Қозғалтқышқа желіден тұрақты кернеу берілді деп ұйғарайық $U_ж=const$. 14.9 суретте берілген полюстердің полярлығында және якорь тогының *I* бағытында (якорь орамасы тек қана бір өткізгішпен көрсетілген) қозғалтқыштың білігінде сағат тілінің айналу бағытына қарсы айналатын электромагнит моменті *M* пайда болады. Осы моменттің әсерінен қозғалтқыш тұрақты жиілікпен *n* моменттің әсер етуші бағыты бойынша айналады. Оң қол ережесін пайдаланып, якорь өткізгішінде (орамада) якорь тогымен салыстырғанда қарсы бағытта болатын *ЭҚК* $e_Я$ пайда болатынын анықтаймыз, сондықтан оны якорьдің қарсы *ЭҚК* деп атайды. Қозғалтқыш үшін *ЭҚК* теңдеуін құруға болады:

$$U=E+IR,$$

Бұл теңдеуден:

$$I_a = \frac{U-E}{C_E n \Phi}. \qquad (14.1)$$

Жылдамдықтық сипаттама:

$$n = \frac{U - R_a I_a}{c_e \Phi_\delta}.$$

15 Дәріс №15. Тұрақты ток қозғалтқышы

Дәрістің мазмұны: тұрақты ток қозғалтқыштарының жүргізулік және реттемелік сипаттамалары.

Дәрістің мақсаты: тұрақты ток машинасының артықшылықтары мен кемшіліктерін көрсету.

15.1 Тұрақты ток қозғалтқыштарының жіктелуі және сипаттамалары

Генераторлар сияқты қоздырушы орамаларды және якорь орамаларын қосу тәсілдеріне байланысты тұрақты ток қозғалтқыштарының келесідей түрлері болады: 1) параллель қоздырылатын; 2) тізбектеп қоздырылатын; 3) аралас қоздырылатын (сұлбалары суреттерде көрсетілген).

Жүргізулік сипаттамалар.

Якорь тогы:

Қозғалтқышты жүргізудің алғашқы уақытында оның якорі қозғалмайды, якорь орамасындағы қарсы *ЭҚК* нөлге тең және қозғалтқыштың якоріндегі ток $I_Я = U_C / R_Я$. Якорь тізбегінің кедергісі көп емес, сондықтан жүргізуші ток номиналдан 20 және одан да көп есеге өседі.

Жүргізулік сипаттамаларға қойылатын талаптар:

а) жүргізуші ток $I_{жүр}$ мемлекеттік стандартпен шектелген аралықта болуы керек және $I_{жүр}/I_{ном}$ қатынаспен сипатталады; б) $M_{жүр}/M_{ном}$ сипатталатын жүргізуші момент $M_{жүр}$ жеткілікті мөлшерде үлкен болуы керек; в) жүргізу бір қалыпты болу керек; г) жүргізу уақыты $t_{жүр}$ аз ғана; д) жүргізуші аппарат күрделі емес.

Жүргізудің үш түрі болуы мүмкін: 1) тікелей жүргізу; 2) жүргізуші реостаттың көмегімен жүргізу; 3) якорь тізбегіндегі кернеу төмендетілген кезде жүргізу.

1) тікелей жүргізу тек қана қуаты бірнеше жүздеген ватқа дейінгі қозғалтқыштар үшін қолданылады, оларда $R_а$ салыстырмалы түрде үлкен және сондықтан жүргізген кезде $I_а$ (4-6) $I_{ном}$, ал жүргізу үрдісі 1-2 секундттан көпке созылмайды.

2) жүргізуші реостаттың көмегімен жүргізу, бұл кезде жүргізуші ток:

$$I_{жур} = \frac{U}{R_a + R_{жур}}, \qquad (15.1)$$

мұнда $R_{жүр}$ – жүргізуші реостаттың кедергісі немесе жүргізуші кедергі.

$R_{жүр}$ шамасы, жүргізудің алғашқы уақытында $I_{жүр}$ =(1,4-1,7) $I_{ном}$, болатындай етіп алынады, ал кішкентай машиналарда (2,0-2,5) $I_Н$ дейін.

Жүргізген уақытта $i_{қоз}$ және $Ф_δ$ максимал және тұрақты болуы қажет, себебі қоздырушы ағын аз болған кезде айналу жиілігі шексіздікке ұмтылады (қозғалтқыш істен шығып кетеді). Осы себептен де параллель орамалар тізбегінің үзілуіне жол бермеу керек.

3) төмендетілген кернеу кезінде жүргізу

Жүргізуші токты шектеуге қол жеткізуге, жүргізген кезде якорь тізбегінің кернеуі реттелетін бөлек бір қорек көзінен қоректендірген жағдайда да болады (жеке тұрақты ток генераторы, реттелетін түзеткіш). Бұл кезде қоздырушы ораманы жүргізгендегі қоздырушы ток толық болу үшін, толық кернеу беретін басқа бір қорек көзінен қоректендіру керек. Бұл жүргізу әдісін бәрінен де қуаты үлкен қозғалқыштар үшін, жиі қолданады және де айналу жылдамдығын реттеумен сәйкестендіреді.

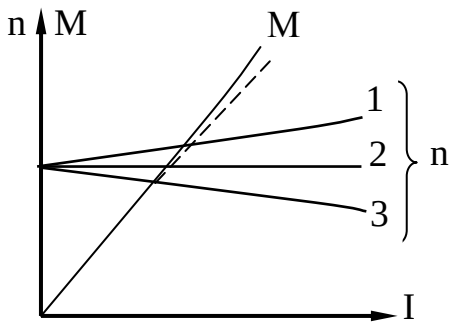
15.2 Параллель қоздырылатын қозғалтқыштар

15.2.1. Табиғи жылдамдықтық және механикалық сипаттамалар

Оның түрі $n=f(I_Я)$; $M=f(I_Я)$ болады, бұл кезде $U=U_{НОМ}=const$ и $I_К=const$.

Жылдамдықтық сипаттама.

Қозғалтқыштың айналу жиілігіне елеусіз екі себеп әсер етеді: 1) якорьде кернеудің түсуі $I_Я R_Я$ және 2) якорь реакциясы. Жүктеме тогы өскен кезде $I_Я$ кернеудің түсуі көбейеді, ал айналу жиілігі азаяды. Осымен қатар якорь реакциясы қозғалтқышты магнитсіздендіреді, яғни басты полюстердің магнит ағынын төмендетуге әкеледі, демек оның айналу жиілігін өсіруге ұмтылады. Суретте (15.1 сурет) сипаттама 1 – екінші себеп басым болған кезде; сипаттама 3 – бірінші себеп басым болған кезде; сипаттама 2 – екі себеп бір-бірін компенсациялаған кезде.



15.1 сурет –Параллель қоздыру кезіндегі шынайы механикалық және жылдамдықты сипаттамалар

Моменттің якорь тогына тәуелділігі.

Егер де қоздырушы ағын тұрақты болып қалатын болса, онда $M=f(I_Я)$ сипаттамасы түзу сызық болар еді. Нақты жағдайда ағын $Ф$ мен ток $I_Я$ өскен кезде көлденең якорь реакциясының магнитсіздендіру әсерінің нәтижесінде аздап азаяды, сондықтан $M=f(I_Я)$ сипаттамасы түзу сызықтан токтың осіне қарай аздап ауытқиды.

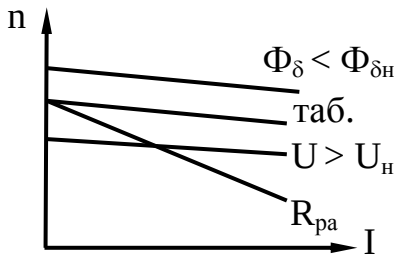
15.2.2 Реттемелік сипаттамалар.

Тұрақты ток қозғалтқыштарының негізгі артықшылықтарының бірі айналу жиілігін үлкен аралықта бір қалыпты реттей алатын мүмкіндігі болады. Жалпы жағдайда қозғалтқыштың якорь тізбегіне реттеуші $R_{рет}$ реостат қосылуы мүмкін. Онда тұрақты ток қозғалтқышының айналу жиілігін келесідей тәсілдермен реттеуге болады:

1) желінің кернеуін өзгерту U арқылы. $U>U_н$ болған кезде қозғалтқышқа жұмыс істеуге рұқсат берілмейді, сондықтан жылдамдықты номиналдан төмен қарай реттеуге мүмкіндік береді;

2) якорь тізбегіне тізбектеп реостат немесе реттелетін кедергі $R_{ра}$ қосу жолымен реттеу.

Бұл тәсіл жылдамдықты номиналдан төмен қарай реттеуге мүмкіндік береді, бірақ ол $R_{ра}$ кедергіде болатын айтарлықтай шығындармен және ПӘК төмендеуімен байланысты. Сондықтан бұл тәсіл негізінен қуаттары үлкен емес қозғалтқыштар үшін, қолданылады, ал қуаты көбірек қозғалтқыштар үшін, сирек қолданылады және тек қысқа мерзімге ғана (жүргізу – баптау режимі және т.б.);



15.2 сурет – Параллель қоздыру кезіндегі реттемелік сипаттамалар

3) қоздырушы ағынды өзгерту арқылы, демек қоздырушы токты $I_{қоз}$ өзгертумен. Магнит ағынының $Ф_δ$ азаюымен жылдамдық өседі. Қозғалтқыштар номиналды режим кезінде $Ф_δ$ ең үлкен мәнінде жұмыс істеу үшін есептеледі, яғни жылдамдықтың n ең аз мәнінде. Содықтан іс жүзінде магнит ағынын $Ф_δ$ тек қана азайтуға болады. Реттемелік сипаттамалар 15.2 суретте көрсетілген.

15.3 Тізбектеп қоздырылатын қозғалтқыш

Қозғалтқыштың жұмыстық сипаттамалары:

Олар n; M және $η=f(I_Я)$ тәуелділігі, бұл кезде $U=U_{НОМ}=const$.

Тізбектеп қоздырылатын қозғалтқыштың ерекше артықшылығы ол, якорь тогы бір мезгілде қоздырушы ток болады ($I_Я=I_К=I$), сондықтан магнит ағыны $Ф$ машинаның әртүрлі жүктемесі кезінде, айтарлықтай өзгереді.

Жылдамдықтық сипаттама.

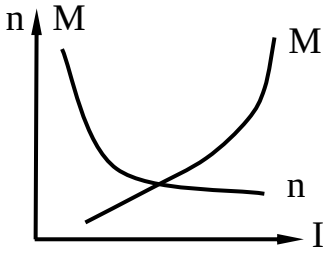
Ағынды $Ф=кI$ түрде көрсетеміз, мұнда $к$ – ағын мен токтың арасындағы пропорционалдық коэффициент, онда:

$$n = \frac{U-IR_a}{C_E Ф} = \frac{U-IR_a}{C_E kI} = \frac{U}{C_E kI} - \frac{IR_a}{C_E kI} = \frac{U}{C_E kI} - \frac{R_a}{C_E k}. \qquad (15.2)$$

R_a кедергі аз болатындықтан:

$$n = \frac{U}{C_E k I} . \qquad (15.3)$$

15.3 суретте көрсетілген қозғалтқыштың жылдамдықтық сипаттамасы жұмсақ және гиперболалық сипатта болады. Аз токтар кезінде қозғалтқыш айналу жиілігін ары қарай үдете түседі, ол машинананы істен шығаруы мүмкін. Сондықтан тізбектеп қоздырылатын қозғалтқышты жүктемесіз жүргізуге де, бос жүріспен жұмыс істеуге де мүмкін болмайтын жағдай жасау керек. Бұл қозғалтқыштар зауыт көрсеткен ең үлкен айналу жиілігінен *20%* жоғары жылдамдыққа да төзуі керек, бірақ номиналдың *50%* аспауы керек.



15.3 сурет – Тізбектей қоздырылатын қозғалтқыштың жұмыс сипаттамалары

Моменттің якорь тогына тәуелділігі.

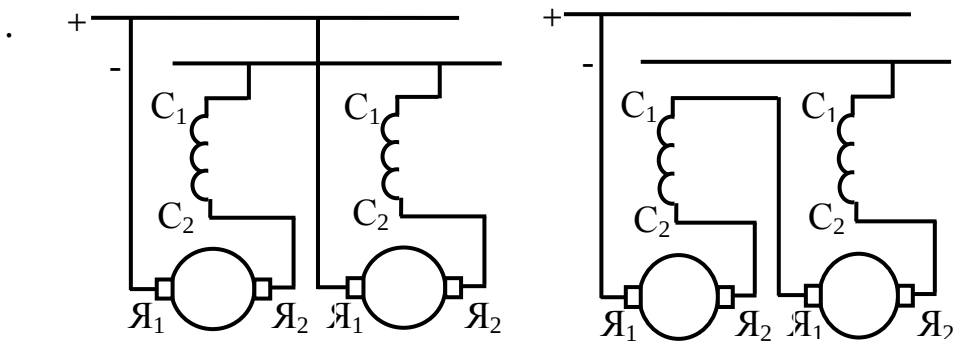
$\Phi = k_\Phi I_Я$, ал $M = c_M I_Я \Phi$, болатындықтан $M = c_M' I_Я^2$.

Тізбектеп қоздырылатын қозғалтқыштың $U = U_{НОМ} = const$ болған кездегі $M = f(I_Я)$ сипаттамасы болат нашар қанықкан кезде парабола тәрізді болады. Токтың $I_Я$ өсуімен қозғалтқыш қанығады, яғни $\Phi = const$, якорь тогына $I_Я$ тәуелсіз болады және моменттің сипаттамасы түзуге жақындап түзетіледі. Бұл жағдайларда параллель қоздырылатын қозғалтқыштардағыдай, момент токқа пропорционал өзгереді: $M = c_M I_Я \Phi$. Тізбектеп қоздырылатын қозғалтқыштың моменті токтың квадратына пропорционал өсіруінің, үлкен жүргізуші момент қажет болған жағдайда және қозғалтқыштың үлкен асқын жүктемелік қабылеттілігі қажет болатын жерлерде мәні өте зор болады. Пайдалы қуат $P_2 = M_2 \omega = M_2 2\pi n/60$ жүктеме өскен кезде айналдырушы моментпен салыстырғанда айналу жиілігінің төмендеу салдарынан баяу өседі. Сонымен бірге қозғалтқыштың тогына пропорционал болатын, жеткізілген қуатта $P_1 = UI$, айналдырушы моменттен баяу өседі.

15.3.1 Қозғалтқыштың реттемелік сипаттамалары.

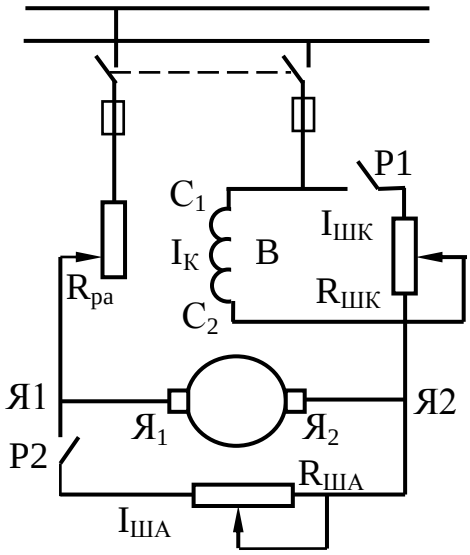
Тізбектеп қоздырылатын қозғалтқыштардың айналу жиілігі де, параллель қоздырылатын қозғалтқыштарда қолданылатын тәсілдермен реттеледі.

Кернеуді өзгерту арқылы айналу жиілігін реттеу. Бұл тәсілмен номинал мәннен аз болатын айналу жиілігін реттеуге болады. Қарастырылатын тәсіл бірнеше қозғалтқыштар орналастырылған және аз жиілікпен айналатын, бір-бірімен тізбектеп қосылатын тартушы қондырғыларда пайдаланылады, ал үлкен жиілікте олар параллель қосылады және олармен бір мезгілде реттемелік реостат $R_{рет}$ қосуды да пайдаланады.

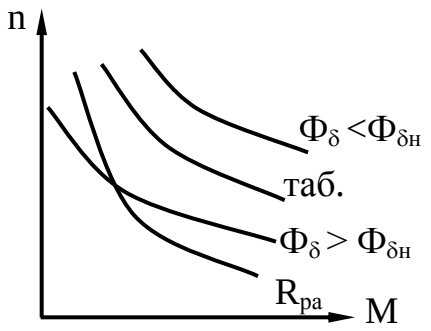


а) параллельді; б) тізбектей.

15.4 сурет – Қозғалтқыштарды қосу



15.5 сурет – Тізбекті қозғалтқыштардың айналу жылдамдығын реттеу



15.6 сурет – Тізбекті қозғалтқыштардың реттеу сипаттамалары

Қоздырушы магнит ағынын өзгерту арқылы айналу жиілігін реттеу.

Қоздырушы ораманы шунттаған кезде қоздырушы ток азаяды, ал айналу жиілігі өседі. Якорьдің айналу жиілігін осыған ұқсас жолмен өсіруге болады, ол үшін егер қоздырушы ораманы секциялап жасаса, яғни қоздырушы ораманың кейбір орамдарын бұрып және бұл ораманың магнит қозғаушы күшін өзгертсе (15.6 сурет). Якорь орамасын шунттаған кезде якорь тогы да өседі. Якорь тізбегіндегі реттегіш реостаттың кедергісін өзгерту де қозғалтқыштың айналу жиілігін реттеуге мүмкіндік береді (U_K – қозғалтқыштың кернеуін).

15.4 Аралас қоздырылатын қозғалтқыш

Аралас қоздырылатын қозғалтқышта екі орама болады: параллель және тізбектеп қосылатын, олар келісімді немесе қарсы қосылуы мүмкін.

Орамалардың *МҚК* шамалары әртүрлі болуы мүмкін, бірақ әдетте орамалардың біреуіндегі *МҚК* көп болады, оны негізгі деп атайды.

Аралас қоздырылатын қозғалтқыштардың жұмыстық сипаттамалары параллель немесе тізбектеп қоздырылатын қозғалтқыштардың сипаттамаларына жақындайды, қайсысына жақын болуы ол қай ораманың негізгі болуына байланысты болады. Бұл қозғалтқыштың тізбектеп қоздырылатын қозғалтқышқа қарағанда біршама артықшылықтары бар. Ол бос жүріспен жұмыс істей алады, себебі параллель ораманың ағыны $Ф_1$ бос жүріс кезіндегі айналу жиілігін шектейді және «істен шығу» болу қауіпін жояды. Параллель қоздырылатын орама тізбегіндегі реостатпен айналу жиілігін реттейді. Аралас қоздырылатын қозғалтқышты, айтарлықтай жүргізуші момент, жүргізген кезде тез үдету және жүктеме өзгерген кезде айналу жиілігін рұқсат етілетін салыстырмалы үлкен аралықта өгерту қажет болған кезде пайдаланады. Осыған байланысты аралас қоздырылатын қозғалтқыштарды компрессорлардың, станоктардың, прокаттық стандардың, көтергіштердің, электрлік сүйрегіштердің және басқалардың тұрақты ток жетегі үшін пайдаланады.

Әдебиеттер тізімі

1 Алиев И.И. Электрические машины: Учебно-справочное пособие.-М.: ИП РадиоСофт, 2011.

2 Мальц Э.Л. Электротехника и электрические машины.-СПб.: Корона Век, 2010.

3 Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Высшая школа, Логос, 2000. – 607 с.

4 Абрамов И.А., Иванов смоленский А. В. Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. - М.: Высшая школа, 2001.- 388 с.

5 Алиев И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованиию.- М., 2007.

6 Кацман С.С. Сборник задач по электрическим машинам.-М.: Академия, 2008.

7 Проектирование электрических машин /Под общей редакцией И.П. Копылова. - М.: Высшая школа, 2002.

8 Мальц Э.Л. Электротехника и электрические машины.-СПб.: Корона Век, 2010.

9 Вольдек А.И. Электрические машины. Электрические машины переменного тока.-СПб.: Питер, 2008.-352 с.

10 Набиев Ф.М. Электрические машины.-М., 2009.

11 Вольдек А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы.- СПб.: Питер, 2007.- 320 с.

12 Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. - М.: Высшая школа, 2006.

13 Беспалов В.Я. Электрические машины.- М.: Академия, 2010.

14 Иванов-Смоленский А.В. Электричсекие машины. Т.1.-М., 2006.

15 Сылкин М.И. Электрические м ашины.-А., 2005.

2015 ж. жиынтықтың жоспары, реті 255

Равшина Манаповна Шидерова
Какимжан Оралович Гали
Алтын Нурмолдаевна Бестерекова

ЭЛЕКТР МАШИНАЛАРЫ

5В071800 – Электр энергетикасы мамандығының студенттеріне
арналған дәрістер жинағы

Редактор Ж.Н. Изтелеуова
Стандарттау бойынша маман Н.Қ. Молдабекова

Басуға _____ қол қойылды
Таралымы 150 дана.
Объем 5.0 есептік баспа табақ

Пішіні 60х84 1/16
Баспаханалық қағаз №1
Тапсырыс_.Бағасы 2500 теңге

«Алматы энергетика және байланыс университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамының
көшірмелі – көбейткіш бюросы
050013, Алматы, Байтұрсынұлы көшесі, 126