Қазақстан Республикасының Білім және ғылым министрлігі

«Алматы энергетика және байланыс университеті»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Р.М. Шидерова
К.О. Ғали
Н.К. Алмуратова

ЭЛЕКТР МАШИНАЛАРЫ.
СИНХРОНДЫ МАШИНАЛАР ЖӘНЕ ТҰРАҚТЫ ТОК МАШИНАЛАРЫ

Оқу құралы

АЭжБУ
2016

ӘОЖ 621.313 (075.8)
КБЖ 31.16 я 73
С 13

Пікір берушілер:
техника ғылымының кандидаты, К.И. Сәтпаев атындағы ҚазҰЗТУ, «ЭжТКА» кафедрасының меңгерушісі, доцент
Е. Хидолда,
К.И. Сәтпаев атындағы ҚазҰТУ, «ЭжТКА» кафедрасының доценті
Т.М. Мунсузбай,
техника ғылымының докторы, АЭжБУ, «ӨҚЭА» кафедрасының профессоры
Сагитов П.И.
Алматы энергетика және байланыс университетінің Ғылыми кеңесі басуға ұсынды (26.01. 2016 ж. №5 хаттама). АЭжБУ 2016 ж. ведомостік әдебиеттер басылымдарын шығарудың тақырыптық жоспары бойынша басылады, реті 20.

Шидерова Р.М., Гали Х.О., Алмуратова Н.К.
Ш Электр машиналары. Синхронды машиналар және тұрақты ток машиналары Оқу құралы (жоғарғы оқу орындарының «Электр энергетикасы» мамандығының студенттеріне арналған) Шидерова Р.М., Ғали К.О., Алмуратова Н.К. – Алматы: АЭжБУ, 2016. – 93 бет.: суреттер 80, әдебиеттер тізімі – 8 атау.

ISBN 978 - 601 - 7436 - 95 - 7

Ұсынылған оқу құралында қазіргі уақыттағы автоматты электр жетегі жүйелерінде элементтер ретінде кең қолданылатын микромашиналардың негізгі түрлері, яғни атқарушы қозғалтқыштар, тахогенераторлар, айналмалы трансформаторлар және синхронды байланыстан тұратын машиналар, сонымен қатар олардың құрылысы мен тәжірибеде қолданылуы қарастырылған.

Оқу құралы «Электр энергетика» мамандығы бойынша оқитын студенттерге арналған.

ӘОЖ 621.313 (075.8)
КБЖ 31.16. я 73

ISBN 978 - 601 - 7436 - 95 - 7

© АЭжБУ, 2016
© Шидерова Р.М.,
Гали Х.О.,
Алмуратова Н.К., 2016

Аннотация

Синхронные машины — это бесколлекторные машины переменного тока. По своему устройству они отличаются от асинхронных машин лишь конструкцией ротора, который может быть явнополюсным или неявнополюсным. Что же касается свойств, то синхронные машины отличаются синхронной частотой вращения ротора ($n_2 = n_1$= const) при любой нагрузке, а также возможностью регулирования коэффициента мощности, устанавливая такое его значение, при котором работа синхронной машины становится наиболее экономичной. Синхронные машины обратимы и могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Синхронные генераторы составляют основу электротехнического оборудования электростанций, т.е. практически вся электроэнергия вырабатывается синхронными генераторами. Единичная мощность современных синхронных генераторов достигает миллиона киловатт и более. Синхронные двигатели применяются главным образом для привода устройств большой мощности. Такие двигатели по своим технико-экономическим показателям превосходят двигатели других типов. В крупных электроэнергетических установках синхронные машины иногда используются в качестве компенсаторов — генераторов реактивной мощности, позволяющих повысить коэффициент мощности всей установки. В данном разделе рассмотрены главным образом трехфазные синхронные машины.

Мазмұны

Кіріспе..... 5
1 Синхронды машиналар..... 5
1.1 Синхронды машиналардың түрлері және олардың құрылысы..... 5
1.2 Синхронды машиналардың құрылысы..... 7
1.3 Синхронды машинаның жұмыс істеу принципі…..... 9
1.4 Якорь орамасының магнит өрісі мен параметрлері. Якорь реакциясы..... 10
1.5 Синхронды генератордың кернеулерінің теңдеулері..... 14
1.6 Синхронды генератордың векторлық диаграммалары..... 16
1.7 Синхронды генератордың сипаттамалар..... 18
1.8 Синхронды генератордың ЭҚК тәжірибелік диаграммасы (Потье диаграммасы) 21
1.9 Синхронды машиналардың параллель жұмысы. Жалпы жағда..... 22
1.10 Синхрондау және параллель жұмысқа қосу..... 27
2 Тұрақты ток машиналары..... 40
2.1 Тұрақты ток машинасының жұмыс істеу принципі..... 40
2.2 Тұрақты ток машинасының құрылысы және оның құрамының негізгі элементтері..... 42
2.3 Тұрақты токтың машинасыларының якорь орамалары. Негізгі ұғымдар..... 42
2.4 Тұрақты токтың машинасының электр қозғаушы күші және электр магнит моменті..... 46
2.5 Тұрақты ток машинасының якорь реакциясы..... 48
2.6 Тұрақты ток машинасының коммутациясы..... 50
2.7 Тұрақты ток генераторлары. Тұрақты ток генераторлары жөнінде жалпы мағлұмат..... 59
2.8 Тұрақты ток қозғалтқышы..... 64
2.9 Тізбектеп қоздырылатын қозғалтқыш..... 67
2.10 Аралас қоздырылатын қозғалтқыш..... 69
Әдебиеттер тізімі..... 70

Кіріспе

Синхронды машиналар – ол коллекторсыз айнымалы ток машиналары. Құрылысы бойынша олардың асинхронды машинадан айырмашылығы тек қана ротордың құрылысында, ол айқындалған полюсті немесе айқындалмаған полюсті болуы мүмкін. Қасиетіне тоқталатын болсақ, онда синхронды машиналар кез келген жүктеме кезінде ротордың синхронды жиілікпен айналуымен (n_2 = n_1= const), сондай-ақ қуат коэффициентін реттеу мүмкіндігімен ерекшелінеді, бұл кезде оның мәні синхронды машинаның жұмысы өте үнемді болатындай болуы керек. Синхронды машиналар қайтымды және олар генератор режимінде де, сондай-ақ қозғалтқыш режимінде де жұмыс істеуі мүмкін. Синхронды генераторлар электр станцияларындағы құрылғылардың негізін құрайды, яғни барлық электр энергиясы синхронды генераторлармен өндіріледі. Қазіргі кездегі синхронды генераторлардың дара қуаты миллион килловатқа жетеді және одан да көбірек. Синхронды қозғалтқыштар негізінен қуаты үлкен құрылғылардың жетегі үшін қолданылады. Мұндай қозғалтқыштар техникалық, үнемділік көрсеткіштері бойынша басқа типтегі қозғалтқыштардан басым түседі. Ірі электроэнергетикалық қондырғыларда синхронды машиналар кейбірде компенсатор ретінде қолданылады – барлық қондырғылардың қуат коэффициентін өсіруге мүмкіндік беретін реактивті қуат генераторлары.

Бұл бөлімде негізінен үш фазалы синхронды машиналар қарастырылған.

1 Синхронды машиналар

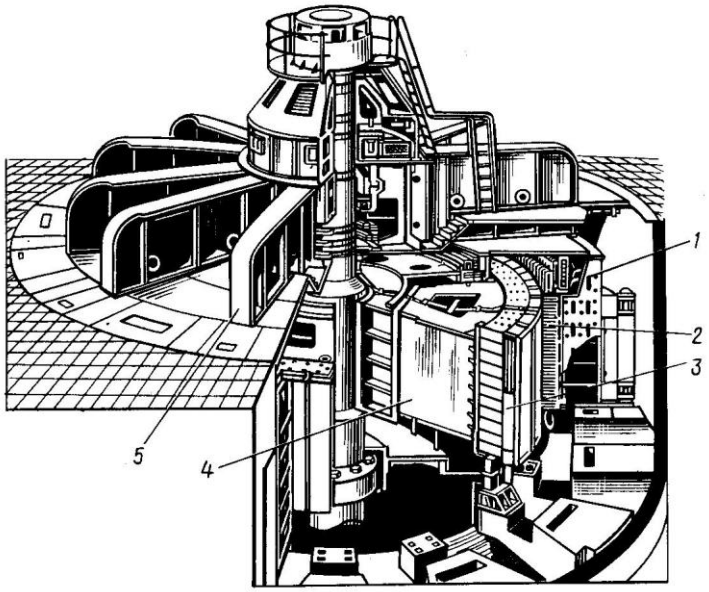
1.1 Синхронды машиналардың түрлері және олардың құрылысы

Синхронды генераторды айналдыратын бірінші реттік қозғалтқыштың түріне байланысты, синхронды машиналарды *турбогенераторлар* (механикалық энергия көзі – бу турбинасы), *гидрогенераторлар* (механикалық энергия көзі – гидравликалық турбина) және *дизельгенераторлар* (механикалық энергия көзі – іштен жанатын қозғалтқыш - дизель) деп бөлінеді. Жылу электр станцияларында (ЖЭС) және атом электр станцияларында (АЭС) турбогенераторлар орнатады, ал гидростанцияларда (ГЭС) – гидрогенераторлар қолданылады.

Гидрогенераторлар.

Егер қозғалтқыш жетек гидравликалық турбина болса, онда синхронды генератор гидрогенератор деп аталады. Әдетте гидравликалық турбинаның айналу жиілігі көп болмайды (60 – 500 айн/мин), сондықтан өндірістік

жиіліктегі (50 Гц) айнымалы ток алу үшін гидрогенераторларда полюстер саны көп болатын ротор қолданылады.

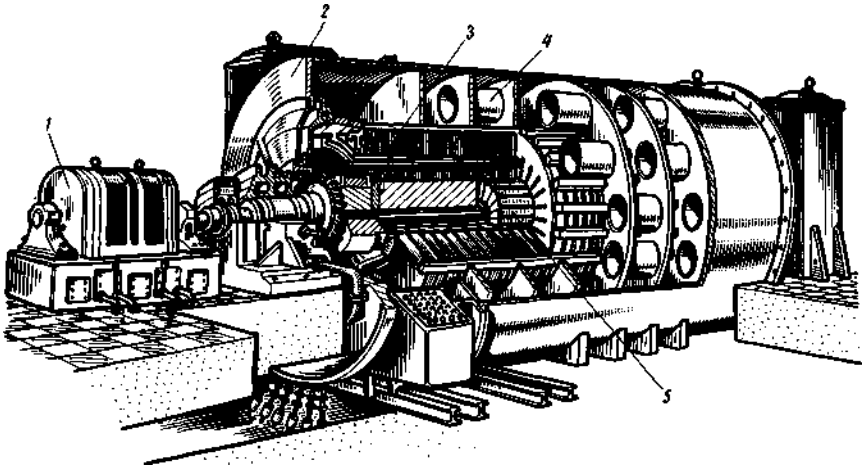


1 - статордың корпусы; 2 - статордың өзекшесі; 3 - ротордың полюсі;
4 -ротор; 5 - жоғарғы крестовина.
1.1 сурет – Гидрогенератор

Гидрогенераторлардың роторларының құрылысы *айқын полюсті* болады. Әдетте гидрогенераторлардың білігін тік орналасқан қалыпта жасап шығарады.

Турбогенератор.

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



1 - қоздырғыш; 2 - корпус; 3 - статор өзекшесі;
4 - сутегімен суытатын секция; 5 – ротор.
1.2 сурет – Турбогенератор

Турбогенератордың жұмыс істеу үрдісінде оның роторына айтарлықтай ортадан тепкіш күштер әсер етеді. Сондықтан механикалық беріктілік шарты бойынша турбогенераторларда *айқындалмаған полюсті* ротор қолданылады.

Турбогенераторлар мен дизел – генераторлардың біліктерін көлденең орналастырып шығарады.

Дизель – генераторлар 600 – 1500 айн/мин айналу жиілігіне есептеледі және роторы айқындалған полюсті етіп жасалады. Дизель – генераторлар негізінен электр энергиясының резервтік көзі ретінде, олардың жұмысы электрмен жабдықтаудағы апаттық шығындардың болуына мүмкіндік бермейтін объектілерде пайдаланылады (банктер, әскери объектілер және т.б.).

Синхронды машиналардың үлкен тобын *синхронды қозғалтқыштар* құрайды, олар әдетте бірнеше мыңдаған киловатт қуатқа дейін жасалады және айналу жиілігін реттеуді қажет етпейтін қуатты желдеткіштердің, диірмендердің, насостардың және басқа құрылғылардың жетегі үшін арналады.

1.2 Синхронды машиналардың құрылысы

Синхронды генераторлар мен синхронды қозғалтқыштар құрылысы жағынан бірдей болатындықтан, олардың құрылысы бірге қарастырылады.

Синхронды машина (генератор және қозғалтқыш) үш фазалы орамасы бар статордан және тұрақты токтың қоздырушы орамасынан құралады.

Синхронды машинаның статоры.

Синхронды машиналардың статорларының асинхронды қозғалтқыштың статорынан түптеп келгенде ешқандай айырмашылығы болмайды, яғни корпустан, өзекшеден және орамадан құралады.

Синхронды машиналардың құрылымдық орындалуы машинаның атқаратын міндетіне және габаритіне байланысты әртүрлі болуы мүмкін. Қуаты үлкен болатын көп полюсті машиналарда статор өзекшесінің диаметрі 900 мм асқан кезде өзекшенің пластиналарын жеке сегменттерден жасайды, оларды құрастырған кезде статор өзекшесінің цилиндрі құралады. Ірі габаритті машина статорларының корпустарын жалғағыштық етіп жасайды, ол бұл машиналарды тасымалдағанда және монтаждағанда ыңғайлы болу үшін қажет.

Синхронды машинаның статор орамасы.

Синхронды машинаның статор орамасы үш фазалы жүйенің ЭҚК индукциялау үшін (үш фазалы синхронды генератор) немесе тұрақты айналушы магнит өрісін тудыру үшін (үш фазалы синхронды қозғалтқыш) арналған. Ол үш фазалы асинхронды қозғалтқыштың статор орамасына ұқсас болады.

Дегенмен синхронды генератордың статор орамасы тек қана «жұлдызша» сұлбасы бойынша жалғанады. Синхронды генератордың орамасы «үшбұрыш» сұлбасы бойынша келесідей оймен іс жүзінде

қолданылмайды. «Үшбұрышша» жалғаған кезде статор орамасында желілік кернеу болады, ал «жұлдызша» жалғаған кезде – фазалық кернеу, ол желіліктен $\sqrt{3}$ есеге аз болады. Демек, «жұлдызша» сұлбасы бойынша жалғанған орама үшін оқшауламасының қалыңдығы аз болатын өткізгіш пайдаланылуы мүмкін, ол қуаты бірдей болатын машиналардың габаритінде білінеді.

Бұдан басқа, егер синхронды генератордың статор орамасын «үшбұрыш» сұлбасы бойынша жалғаса, онда магнит өрісінде сәл ғана симметриясыздық жағдай болғанда, статор орамасында индукцияланатын ЭҚК – де үшке еселік гармоникалық құрауштар пайда болады және өзіне - өзі тұйықталған орама бойынша тіпті генератордың бос жүрісі кезінде де, қосымша шығынға және генератордың қуатын төмендетуге әкелетін теңгеруші ток жүретін болады. Статор орамасын «жұлдызша» сұлбасы бойынша жалғаған кезде бос жүріс режимінде теңгеруші ток болмайды, себебі фазалардың орамалары ажыратулы.

Синхронды генератордың үш фазалы орамасын «жұлдызша» сұлбасы бойынша жалғаған жағдайда одан бір мезгілде мәндері бойынша екі түрлі болатын кернеу алуға болады: желілік және фазалық ($U_{ж}^{Y} = \sqrt{3}U_{ф}^{Y}$). Синхронды генератордың үш фазалы орамасын «үшбұрышша» сұлбасы бойынша жалғаған жағдайда, синхронды генератор электр энергиясының бір мәндегі кернеуінің қорек көзі болады: желілік кернеу фазалық кернеуге тең ($U_{ж}^{\Delta} = U_{ф}^{\Delta}$).

Синхронды машинаның роторы.

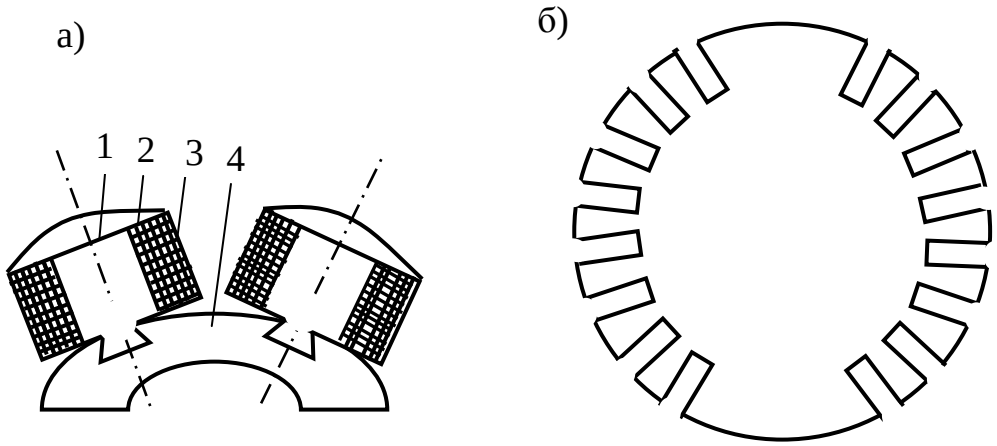
Синхронды машинаның роторы құрылысы бойынша айырмашылықта болатын екі түрде болуы мүмкін: айқын полюсті және айқындалмаған полюсті.

Айқын полюсті роторда айқын көрсетілген полюстер болады, оның әрбір полюсін, өзекшеден 1, полюстік ұштамадан 2 және полюстік орауыштан тұратын жеке тораптар түрінде орындайды.

Полюстердің өзекшелері қалыңдығы 1-2 мм болатын электротехникалық болаттан жасалған қаңылтырлардан жиналады және шпилькалардың көмегімен тартылады. Ротордың барлық полюстері машинаның магниттік жүйесінің мойынтұрығы болатын тоғынға 4 бекітіледі, онда полюстердің ағындары тұйықталады. Гидрогенераторлардың білігін әдетте тік оналастырады.

Айқындалмаған полюсті ротор, қоздырушы орама үшін бетіне жонғыланған ойықтары бар созылған болат тәріздес болады. Айқындалмаған полюсті ротордың өзекшесін тұтас шыныққан болаттан жасайды. 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

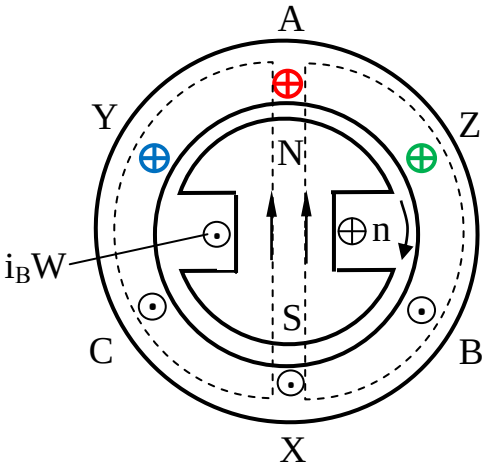
құрсаулық сақиналармен қорғайды, олар әдетте беймагниттік болаттан жасалады.



а – полюстері айқын көрсетілген ротор;
б – полюстері айқын көрсетілмеген ротор.
1.3 сурет - Синхронды машиналардың роторның құрылысы

1.3 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.



1.4 сурет – Синхронды генератордың жұмысы

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:

$$f = pn\frac{айн}{сек} \text{ немесе } f = \frac{pn}{60}\frac{айн}{мин}. \qquad (1.1)$$

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

1.4 Якорь орамасының магнит өрісі мен параметрлері. Якорь реакциясы

1.4.1 Магнит өрісі және якорь орамасының параметрлері. Жалпы ережелер.

Синхронды машинаның якорь орамасын токпен жүктеген кезде ол өзінің меншікті магнит өрісін құрады. Сөйтіп, жүктемесіз режимнен (бос жүріс) айырмашылығы, машинада полюстердің қоздырушы орамасы тудыратын бір магнит өрісі әсер ететін кезден, жүктеме кезінде полюстердің айналушы магнит өрісіне статор орамасының айналушы магнит өрісі қосылады.

Машинаның қорытқы магнит өрісі екі магнит ағындарының полюстердің қоздырушы орамасының және үш фазалы статор орамасының бірлесіп әрекеттесулерінен пайда болады.

Ротор полюстерінің магнит өрісінің тұрақты токтан пайда болуына, ал статор орамасының магнит өрісінің айнымалы токтан пайда болуына қарамастан олардың екеуі де бірдей жылдамдықпен және бір бағытта айналатын тұрақты магнит өрістері сияқты әрекеттесетін болады.

Шынында да, полюстердің магнит өрісі пайда болу табиғаты бойынша тұрақты болсада, ротордың айналу жылдамдығымен айнала отырып, статор орамасында жиілігі $f = pn/60$ айнымалы үш фазалы ЭҚК индукциялайды, ол жүктеме қосылған кезде шамасы бойынша тұрақты, ораманы бойлай, ротор өрісінікіндей жылдамдықпен $n_c = 60f/p$ айналатын магнит өрісінің құрылуына әкелетін үш фазалы айнымалы ток тудырады.

Сонымен, екі магнит өрісі бірдей жылдамдықпен айналып, синхронды генератордың жұмыс режиміне тәуелсіз, бір-бірімен салыстырғанда қозғалыссыз болып қалады. Бір магнит өткізгіштігінде екі магнит өрісінің болуы «якорь реакциясы» деп аталатын олардың сөзсіз өзара әрекеттесуіне және синхронды машинада ортақ қорытқы магнит өрісінің құралуына әкеледі.

Якорь реакциясы ұғымы синхронды машиналардың жұмысын түсіну үшін негізгі ұғым болады.

Тұрақты ток машинасынан айырмашылығы синхронды машинада якорь реакциясының магнит өрісінің шамасына тигізетін әсері өте мңызды. Бұл алдымен, полюстердің ағынын күшейтетін немесе әлсіреттетін синхронды машинада жалпы жағдайда айтарлықтай бойлық якорь реакциясының (яғни полюстің бойымен) пайда болуымен негізделеді. Бұдан басқа, синхронды машинаның көлденең якорь реакциясының өрісі (яғни полюстер арасындағы кеңістіктегі өстің бойымен) якорь орамасында айтарлықтай ЭҚК индукциялайды.

Сондықтан синхронды машинаның якорь реакциясы сипаттамаларға және синхронды машинаның жұмысына қалыптасқан режим кезінде де, сондай-ақ жұмыстың өтпелі үрдісі кезінде де айтарлықтай әсерін тигізеді.

Блондел әдісі немесе екі реакция теориясы.

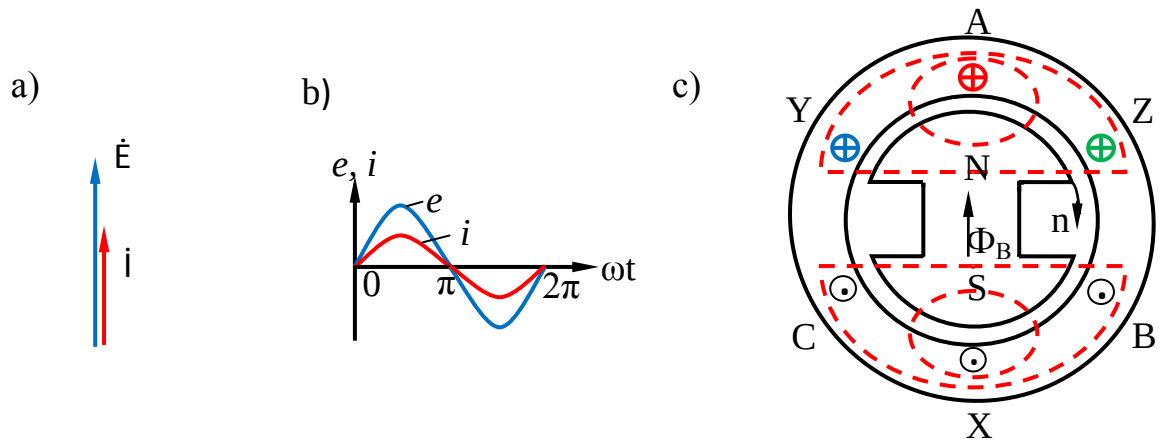
Айқындалған полюсті машинаның индукторы (ротор) магниттік бейсимметриялы болады, себебі полюс аралық кеңістіктің үлкен болуынан көлденең өстің *q* бойымен ағынға әсер ететін магниттік кедергі, яғни полюс аралық кеңістік өсінің бойымен, бойлық өстің *d* бойымен ағынға әсер ететін магниттік кедергіден айтарлықтай көп болады. Сондықтан шамалары бойынша тең болатын якорьдің МҚК бойлық өстің бойымен әсер еткен кезде, оның көлденең өстің бойымен әсер еткен кездегіден магнит ағыны көбірек болады. Бұдан басқа, машинаның айқындалған полюсті роторы да, сондай-ақ айқындалмаған полюсті роторы да электрлік бейсимметриялы болады, себебі олардың қоздырушы орамалары тек қана бойлық өстің *d* бойында орналасқан, яғни *d* өсінің бойымен әсер ететін ағын тудырады, және олар тек қана осы өстің бойымен әсер ететін якорь ағынымен ілігіседі. Синхронды машиналардың индукторларының электрлік бейсимметриясы олардың бейсимметриялы және өтпелі үрдіс режимдері кезіндегі жұмыстарына айтарлықтай әсерін тигізеді.

Индуктор құрылысының бейсимметриялы болуынан якорь реакциясының бойлық және көлденең өстері бойымен тигізетін әсерлерін жеке қарастыру қажеттілігі пайда болады. Бұлай қарастыру тәсілін алғаш рет 1895 жылы француз электр технигі А. Блондел ұсынды және ол *Блондел тәсіл немесе екі реакция теориясы* деп аталады.

Екі реакция тәсілі беттестіру принципіне негізделген, бұл кезде көлденең өстің бойымен әсер ететін магнит ағындары, бойлық өстің бойымен әсер ететін магнит ағындарының шамасына әсер етпейді деп және керісінше деген жорамал жасалады. Магнит тізбегінің учаскелерінде белгілі қанығу болу себебінен бұл жорамал онша дұрыс емес. Дегенмен қанығудың тигізетін әсерін ескеру өте қиын, ал кейбір түзетулер қосымша енгізілуі мүмкін.

1.4.1 Якорь реакцияларының түрлері. Көлденең якорь реакциясы.

Суретте орамасы үш фазалы екі полюсті синхронды машина көрсетілген, оның әрбір фазасы толық қадамды *(А - Х, В - У, С -* Z) бір орам



a) якорьдегі токтар мен ЭҚК векторлық диаграммасы; b) якорьдегі токтар мен ЭҚК лездік мәндерінің векторлық диаграммасы;
c) якорь өрісінің және қоздырушы өрістің көрінісі.
1.5 сурет - Көлденең якорь реакциясы

түрінде бейнеленген. *N, S* әріптерімен қоздырушы өрістің полярлығы көрсетілген, ал бұл өрістің магниттік сызықтары көрсетілмеген.

1) $\psi = 0$ – жүктеме таза активті.

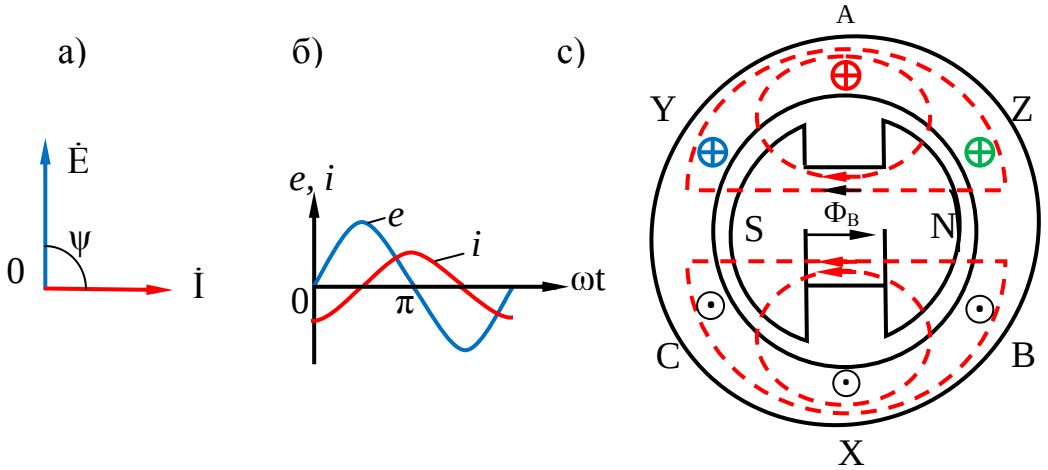
1.5 суретте өткізгіштердегі якорь орамасында қоздырушы өріс индукциялаған ЭҚК $\dot{E}$ бағыты және якорь тогының $\dot{I}$ бағыты бейнеленген. ЭҚК бағыты оң қол ережесімен анықталады, және ол 1.5 суретте крестермен және нүктелермен көрсетілген. i_a, i_b, i_c токтарының бағыттары жүктеменің сипатына тәуелді болады және бұл жағдайда ЭҚК бағытымен тура келеді. Токтардың бұндай бағыттары кезінде полюстердегі және якорьдегі якорь реакциясы өрісінің магниттік сызықтары 1.5 суретте көрсетілгендей, полюстер өсіне *d* көлденең бағытталған. Демек, якорь реакциясының ағыны Φ_a көлденең өстің бойымен әсер етеді. Якорь реакциясы өрісінің мұндай сипаты $\psi = 0$ болған кезде айналып тұрған ротордың кез келген күйінде сақталады, себебі ротор және якорь реакциясының өрісі синхронды айналады.

Демек, $\psi = 0$ тең болған кезде синхронды машинаның якорь реакциясы таза *көлденең* болады.

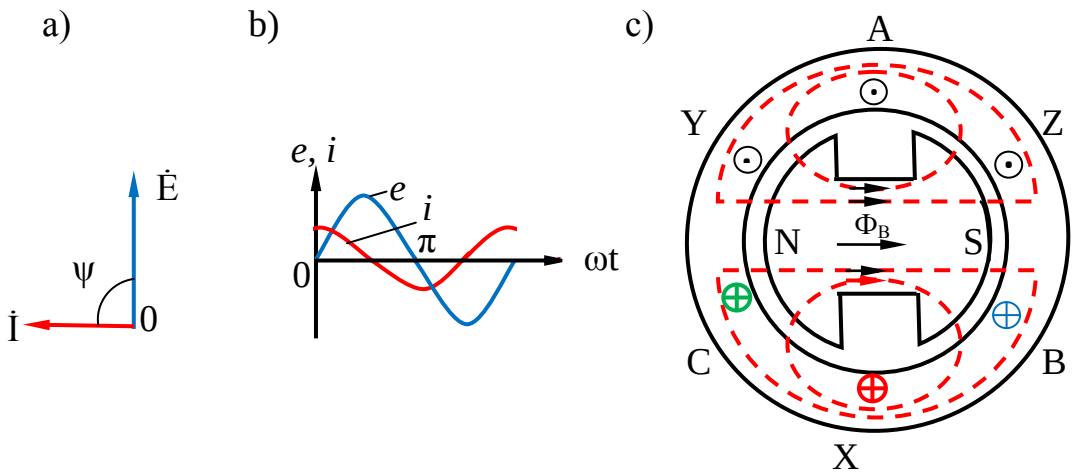
Бойлық якорь реакциясы.

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

Ротор 9.2 суретте көрсетілгендей қалыпта тұрса, онда А фазасындағы ток таза индуктивті жүктеме кезінде нөлге тең, ал ЭҚК максимал болады. Ротор 90° бұрылған кезде (1.6 б сурет) А фазасындағы ток максимал болады, бұл кезде ондағы ЭҚК нөлге тең болады. Бұл ток пен ЭҚК лездік мәндерінің графиктерінен көрініп тұр. 1.6 суретте өткізгіштердегі токтардың бағыттары көрсетілген. 1.6 суретте көрсетілгендей якорь реакциясы бойлық магнитсіздендіруші.



а) якорьдегі токтар мен ЭҚК векторлық диаграммасы;
b) якорьдегі токтар мен ЭҚК лездік мәндерінің диаграммасы;
с) якорь және қоздыру өрістерінің көрінісі.
1.6 сурет – Бойлық магнитсіздендіруші реакция



a) якорьдегі токтар мен ЭҚК векторлық диаграммасы;
b) якорьдегі токтар мен ЭҚК лездік мәндерінің диаграммасы;
c) якорь өрісінің және қоздырушы өрістің көрінісі.
1.7 сурет – Бойлық магниттеуші якорь реакциясы

3) $\psi = -90^{o}$ - жүктеме таза сыйымдылықты.

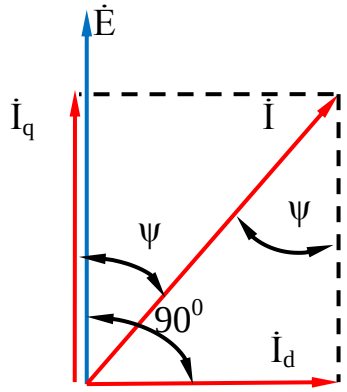
Бұл жағдайда А фазасындағы токтың максимумы 1.5 суреттегі жағдаймен салыстырғанда ширек период бұрын болады және бұл уақытта ротор айналу бағытына қарсы 90^0 бұрылған қалыпта тұрады (1.7 сурет). Суретте токтар мен *ЭҚК* бағыттары ток пен *ЭҚК* лездік мәндерінің графиктеріне сәйкес көрсетілген.

Таза сыймдылықты жүктеме кезінде якорь реакциясы бойлық магниттеуші болады.

Аралас якорь реакциясы.

Жалпы жағдайда $\psi \neq 0$ және $\psi \neq 90^{o}$ болғанда токты *İ Блондел әдісі немесе екі реакция теориясы* бойынша екі құраушыға I_d және I_q жіктеуге болады (1.8 сурет).

4) *$0<\psi<90^0$ - жүктеме аралас.*



1.8 сурет – Якорь тогын жіктеу

$$I_d = I \sin\varphi;\ I_q = I \cos\varphi\ . \qquad (1.2)$$

Ток $\dot{I}$ *ЭҚК* $\dot{E}$ ден қалған кезде ψ бұрышы оң деп саналады.

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

Якорь реакциясының магнит қозғаушы күштері бойлық $F_{ad} = F_a \sin\psi$ және көлденең $F_{aq} = F_a \cos\psi$ өстерінің 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 өс бойынша $\dot{E}_d=-j\dot{I}_d x_{ad}$ және көлденең өс бойынша $\dot{E}_q=-j\dot{I}_q x_{aq}$.

Мұнда x_{ad} және x_{aq} – айқындалған полюсті машинаның бойлық өсі бойынша және көлденең өсі 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 көлденең өстер 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 өсі бойынша және көлденең өсі бойынша синхронды индуктивті кедергілері.

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

$$x_{ad} = x_{aq};\ x_d = x_q. \qquad (1.3)$$

Әдетте x_{ad} және x_d мәндерін пайдаланады.

Синхронды машинаның балама электрлік орынбасу сұлбасының кедергілерінің параметрлері және электрлік тепе-теңдік теңдеуі тәжірибелік жолмен анықталады, бос жүріс және қысқаша тұйықтау сипаттамалары бойынша есептеледі немесе анықтамалық деректер бойынша алынады.

1.5 Синхронды генератордың кернеулерінің теңдеулері

Жүктемемен жұмыс істеп тұрған генератордың шықпалық кернеуі, осы генератордың бос жүріс режиміндегі кернеуінен айырмашылықта болады. Бұл бірқатар себептердің әсер етуімен түсіндіріледі: якорь реакциясымен, сейілу магнит ағынымен, статор орамасындағы активтік кедергідегі кернеудің түсуімен.

Дәлелденгендей, жүктелген синхронды машинаның жұмысы кезінде бірнеше МҚК пайда болады, олар әрекеттесіп қорытқы магнит ағынын тудырады. Дегенмен синхронды генератордың кернеуіне әсер ететін факторларды ескерген кезде, шартты түрде генератордың барлық МҚК

тәуелсіз әрекеттеседі деп жорамал жасайды, яғни МҚК әрбіреуі өзінің магнит ағынын тудырады деп жорамалдайды.

Бірақ мынаны атап өткен жөн, мұндай түсінік құбылыстың физикалық мазмұнына сәйкес келмейді, себебі бір магниттік жүйеде тек қана бір магнит ағыны пайда болады – қорытқы. Бірақ бұл жағдайда магниттік ағындар тәуелсіз болады деген жорамал синхронды машинаның жұмысына барлық факторлардың тигізетін әсерін дұрысырақ түсінуге мүмкіндік береді.

Сонымен, айқындалған полюсті синхронды генератордың жұмысына магнит қозғаушы күштерінің тигізетін әсерінің қандай болатынын анықтаймыз:

1) Қоздырушы ораманың *МҚК* F_K қоздырушы магнит ағынын тудырады Φ, ол статор орамасымен ілінісіп онда генератордың негізгі *ЭҚК* E_0 индукциялайды.

2) Бойлық өсі бойындағы якорь реакциясының *МҚК* F_d магнит ағынын Φ_d тудырады, ол статор орамасында якорь орамасының *ЭҚК* E_d индукциялайды, оның мәні бойлық өстің бойындағы якорь реакциясының индуктивті кедергісіне X_{ad} пропорционал болады.

3) Көлденең өс бойындағы якорь реакциясының *МҚК* F_q магнит ағынын Φ_q тудырады, ол статор орамасында *ЭҚК* E_q индукциялайды, оның мәні көлденең өстің бойындағы якорь реакциясының индуктивті кедергісіне X_{aq} пропорционал болады.

4) Статор орамасының сейілу магнит ағыны Φ_σ статор орамасында сейілу *ЕҚК* индукциялайды, оның мәні статор орамасының фазасындағы сейілу индуктивті кедергісіне X_σ пропорционал болады:

$$\dot{E}_\sigma = -j\dot{I}x_\sigma.$$

5) Статор орамасындағы ток I_1 статор орамасының фазасындағы активті кедергіде R_a түсетін активті кернеу тудырады.

Жоғарыда атап өткен статор орамасында индукцияланатын барлық *ЭҚК* геометриялық қосындысы синхронды генератордың шықпалық кернеуін анықтайды:

$$\dot{U}_1 = \sum \dot{E} - R_a\dot{I} = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - R_a\dot{I};$$

$$\dot{U}_1 = \dot{E} - jX_{ad}\dot{I}_d + jX_{aq}\dot{I}_q + jX_{\sigma a}\dot{I} - R_a\dot{I}. \qquad (1.4)$$

Мұнда $\Sigma\dot{E}$ – барлық *МҚК* (F_K, F_d, F_q) және статордың сейілу ағынының бірлесіп әрекеттесуінен пайда болған машинаның қорытқы магнит өрісі статор орамасында индукциялаған барлық ЭҚК геометриялық қосындысы.

$$\dot{E}_\delta = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a}$$

Статор орамасының фазасындағы активті кедергі R_a орта және үлкен қуатты синхронды машиналарда үлкен емес, сондықтан активті кедергіге түсетін кернеу $\dot{I}R_a$ номинал жүктеме кезінде де өте аз шаманы құрайтындықтан шамамен $\dot{I}R_a \approx 0$ болады деп қабылдауға болады. Онда (1.4) теңдеуді келесідей түрде жазуға болады:

$$\dot{U}_1 \cong \sum \dot{E} = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a}. \qquad (1.5)$$

(1.4) және (1.5) өрнектер *айқын полюсті синхронды генератордың кернеулерінің теңдеулерін* көрсетеді.

Айқындалмаған полюсті синхронды генераторларда якорь реакциясы статордың толық МҚК F сипатталады, оларды өстерге бөлмейді, себебі бұл машиналарда магниттік кедергілер бойлық және көлденең өстер бойында бірдей болады $X_{ad} = X_{aq}$. Сондықтан айқындалмаған полюсті машиналарда статор орамасындағы индуктивті кернеудің түсуіне тең болатын статордың *ЭҚК* E, якорь реакциясының индуктивті кедергісіне пропорционал болады X_{ad}.

Баяндалғандарды ескеріп айқындалмаған полюсті синхронды генератордың кернеулерінің теңдеуін жазамыз:

$$\dot{U}_1 = \sum \dot{E} - R_a \dot{I} = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{\sigma a} - R_a \dot{I}; \qquad (1.6)$$

немесе

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

1.6 Синхронды генератордың векторлық диаграммалары

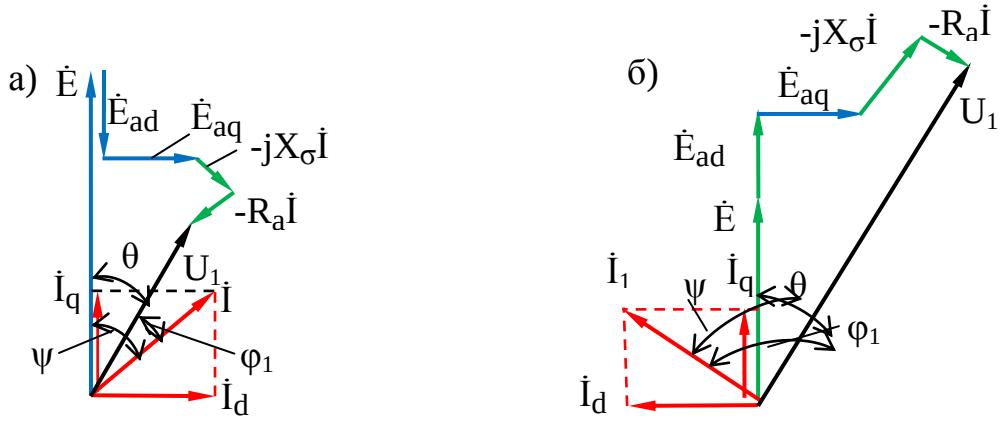
ЭҚК теңдеуін (1.4) пайдаланып, активті-индуктивті жүктемемен жұмыс істейтін ($\dot{I}$ ток *ЭҚК* $\dot{E}$ фаза бойынша қалады) айқындалған полюсті синхронды генератордың векторлық диаграммасын тұрғызамыз.

Белгілі шамалар: генератордың бос жүріс режиміндегі *ЭҚК* $\dot{E}$; жүктеме тогы $\dot{I}$ және оның *ЭҚК* $\dot{E}$ қатысты ығысу бұрышы ψ, якорь реакциясының бойлық X_{ad} және көлденең X_{aq} индуктивті кедергілері; статордың фазалық орамасының активті кедергісі R_a.

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

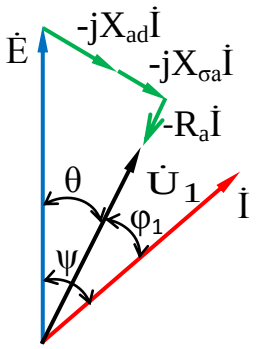
Ерікті бағытта *ЭҚК* $\dot{E}$ векторын сызамыз және оған ψ бұрышпен $\dot{I}$ токтың векторын тұрғызамыз. Соңғысын құрамдарға жіктейміз: реактивті $I_d = \dot{I}\sin\psi$ және активті $I_q = \dot{I}\cos\psi$. Онан соң, $\dot{E}$ векторының соңына $\dot{E}_d = -j\dot{I}_d x_{ad}$ және $\dot{E}_q = -j\dot{I}_q x_{aq}$, $\dot{E}_\sigma = -j\dot{I}x_\sigma$, $-\dot{I}_1 R_a$ *ЭҚК* векторларын сызамыз. $-\dot{I}R_a$

векторының соңын *O* нүктесімен қосып, мәні *ЭҚК* векторларының геометриялық қосындысына тең болатын $\dot{U}_1$ кернеудің векторын аламыз.



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

Векторлық диаграмманы тұрғызудың ретін қарастырайық. Осы жолмен айқындалған полюсті генератордың активті-сыйымдылықты жүктеме кезіндегі векторлық диаграммасын және айқындалмаған полюсті генератордың векторлық диаграммасын тұрғызады.



1.9 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 $\dot{E}$ электр қозғаушы күшінен фаза бойынша қалатын $\dot{I}$ токпен, статор орамасының шықпасындағы кернеу $\dot{U}_1$ 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 $\dot{U}_1$ жүктеме өскен кезде өседі, ол якорь реакциясының магниттеу әрекетімен түсіндіріледі.

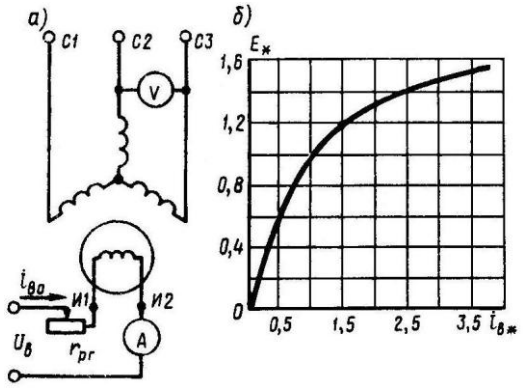
Жүктеме бұрышы θ туралы ұғым.

Кернеу $\dot{U}_1$ мен $\dot{E}$ *ЭҚК* векторларының арасындағы бұрышты, жүктеме бұрышы деп атайды. Шыныменде, 1.9 суреттегі диаграммада

көрсетілгендей $\cos\varphi$ өскен кезде токтың көлденең құрамы өседі, демек якорь реакциясының көлденең құрамы мен θ бұрышы да өседі. Генератор режимінде ЭҚК $\dot{E}$ векторлары кернеудің $\dot{U}_1$ векторынан озады және оң болып саналады.

1.7 Синхронды генератордың сипаттамалары

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



1.10 сурет - синхронды генератордың бос жүріс тәжірибесі

Синхронды генератордың бос жүріс сипаттамасы.

Синхронды генератордың бос жүріс сипаттамасы n=const болған кездегі, генератордың шықпалық кернеуінің бос жүріс тогына тәуелділігін $U_1=E_0=f(i_к)$ көрсетеді. Бос жүріс сипаттамасын түсіру үшін синхронды генераторды қосу сұлбасы 1.10 суретте көрсетілген. Егер әртүрлі синхронды генераторлардың бос жүріс сипаттамаларын салыстырмалы бірлікте көрсетсе $E^*=f(i_B^*)$, онда ол сипаттамалардың бір-бірінен айырмашылығы аз болады және *әдеттегі бос жүріс сипаттамасына* өте ұқсас болады, оны синхронды машинаны есептеген кезде пайдаланады.

1 кесте

E^*	0,58	1,0	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51
i_B^*	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5

Мұнда $E^*=E_0/U_{1НОМ}$ – статор орамасы фазасындағы салыстрмалы ЭҚК;

$i_к^*=i_{к0}/i_{В\backslash к0НОМ}$ – салыстырмалы қоздырушы ток;

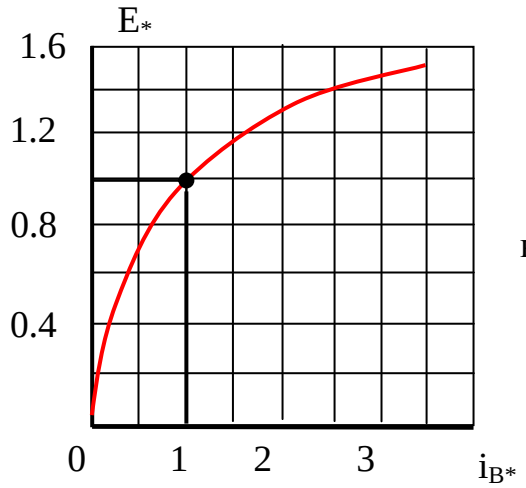
$i_{к0НОМ}$ – бос жүріс ЭҚК $E_0=U_{1НОМ}$ сәйкес келетін бос жүріс режиміндегі қоздырушы ток.

Қысқаша тұйықтау сипаттамасы.

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

Үш фазалы қысқаша тұйықтау сипаттамасын келесідей жолмен алады: статор орамасының шықпаларын қысқаша тұйықтайды (1.11 сурет) және ротор n айналу жиілігімен айналып тұрған кезде қоздырушы токты қысқаша тұйықтау тогы статор орамасының номинал жұмыстық тогынан 25% ($I_{IK}=1{,}25I_{IНОМ}$) ғана асатын мәнге дейін ақырындап көтереді. Статор орамасының активті кедергісі оның индуктивті кедергісімен салыстырғанда көп емес, сондықтан $R_a=0$ деп алып, қысқаша тұйықтау тәжірибесі кезінде

синхронды генератордың жүктемесі (оның өзінің орамалары) таза индуктивті деп санауға болады. Осыдан, қысқаша тұйықтау тәжірибесі кезінде синхронды генератордың якорь реакциясы бойлық-магнитсіздендіруші сипатта болады деп есептейміз.



1.11 сурет – Синхронды генератор бос жүріс сипаттамасы

Онда қысқаша тұйықтау теңдеуі:

$$0 = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{\sigma a}$$

немесе

$$\dot{E} = jX_{ad} I.$$

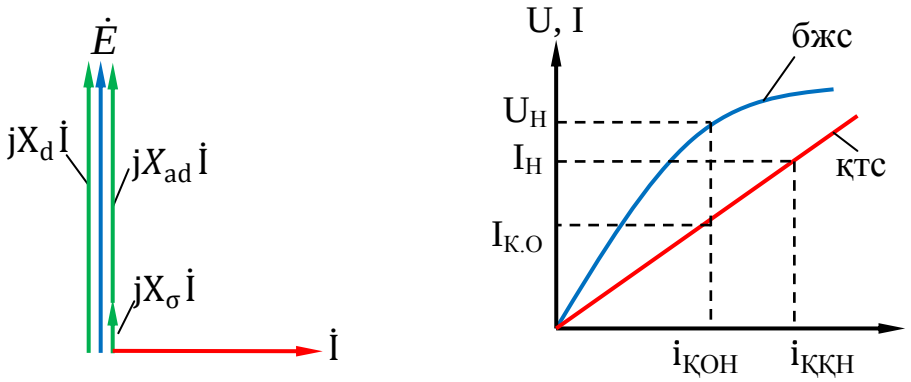
Қорытқы ЭҚК

$$\dot{E}_{\delta} = \dot{E} + \dot{E}_{ad},$$

$$0 = \dot{E}_{\delta} + \dot{E}_{\sigma a}; \quad \dot{E}_{\delta} = X_{\sigma a} \dot{I}. \quad (1.7)$$

Индуктивті сейілу кедергісі $X_{\sigma a}$ өте аз, сондықтан бұл жағдайда статор орамасындағы ЭҚК мәні генератордың жұмыстық режиміндегіден бірнеше рет аз болады. Онда қорытқы магнит ағыны да өте аз болады және машинаның магниттік тізбегі қаныққпайды. Осы себептен қысқаша тұйықтау сипаттамасы түзу сызықты болады (1.12, *б* сурет).

Үш фазалы қалыптасқан қысқаша тұйықтау тәжірибесі кезіндегі генератор үшін тұрғызылған векторлық диаграмма 1.12 суретте көрсетілген.



1.12 сурет – Қысқаша тұйықтау кезіндегі синхронды генератордың векторлық диаграммасы (а); қ.т. сипаттамасы (б)

Қысқаша тұйықтау қатынасы.

Қысқаша тұйықтау қатынасы синхронды машинаның ең маңызды параметрлерінің бірі болады. ҚТҚ – ол бос жүріс кезіндегі номинал кернеуге

сәйкес келетін қоздырушы токтың $i_{Қ0Н}$, қысқаша тұйықтау тәжірибесі кезіндегі статордың номинал тогына сәйкес келетін қоздырушы токқа $i_{ҚҚН}$ қатынасы (1.12, *б* сурет).

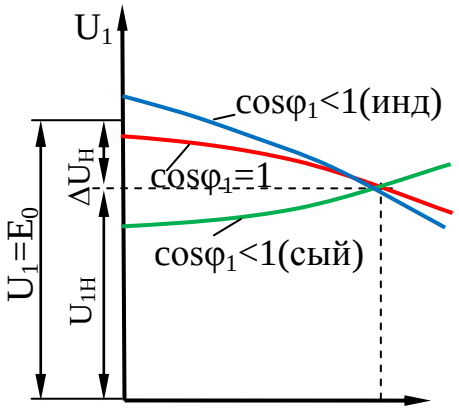
$$\text{ҚТҚ} = \frac{i_{Қ0Н}}{i_{ҚҚН}} \qquad \textit{немесе} \qquad \text{ҚТҚ} = \frac{I_{К0}}{I_Н}. \qquad (1.8)$$

Сондықтан $I_{k0} = \dfrac{U_Н}{X_d}$, онда $\text{ҚТҚ} = \dfrac{U_Н}{x_d I_Н} = \dfrac{1}{x_{d*}}$.

1.12 суретте көрсетілгендей қысқаша тұйықтау қатынасы ауа саңылауына пропорционал болады. Қысқаша тұйықтау қатынасының синхронды машинаның қасиеттерін бағалау кезінде үлкен практикалық маңызы болады: қысқаша тұйықтау қатынасы аз болатын машиналар параллель жұмыс істеген кезде орнықсыз және жүктеме өзгерген кезде кернеудің тербелуі айтарлықтай болады, бірақ мұндай машиналардың габариті кішкентай болады, демек, қысқаша тұйықтау қатынасы үлкен машиналарға қарағанда арзан. Турбогенераторлар үшін ОКЗ=0,44-0,7; гидрогенераторлар үшін ОКЗ =1,0-1,4.

Шығыс сипаттама.

Статор орамасының шықпаларындағы кернеулердің жүктеме тогына тәуелділігін көрсетеді: $U_1=f(I)$ бұл кезде $i_қ=const$; $cos\varphi_1= const$; $n=const$. 1.13 суретте синхронды генератордың сипаты бойынша әртүрлі болатын жүктемесіне сәйкес келетін шықпалық сипаттамалар көрсетілген. Қоздырушы ток, жүтеме тогы $I= I_Н$ болғанда $U_1= U_Н$ болатындай етіп реттелген.



1.13 сурет – Синхронды генераторлардың шықпалық сипаттамалары

Активті жүктеме кезінде ($cos\varphi_1=1$) жүктеме тогының I азаюы кернеудің U_1 өсуімен сәйкес жүреді, ол статор орамасында түсетін кернеудің азаюымен және якорь реакциясының көлденең өстің бойымен магнитсіздендіру әрекетінің әлсіреуімен түсіндіріледі. *Индуктивті жүктеме* кезінде ($cos\varphi_1<1$; инд.), жүктемені түсірген кездегі кернеудің U_1 өсуі өте қарқынды болады, себебі токтың I якорь реакциясының бойлық құраушысының магнитсіздендіру әрекеті нашарлайды. Бірақ генераторда *сыйымдылықты жүктеме* болған жағдайда ($cos\varphi_1<1$) токтың I азаюы кернеудің U_1 азаюымен ілесе жүреді, ол якорь реакциясының бойлық құраушысының магниттеу әрекетінің нашарлауымен түсіндіріледі.

Синхронды генератордың кернеуінің $i_қ=const$ және $n=const$ болған кезде номинал жүктеменің түсуінен өзгеруі *кернеудің номинал өзгеруі (өсуі)* деп аталады %:

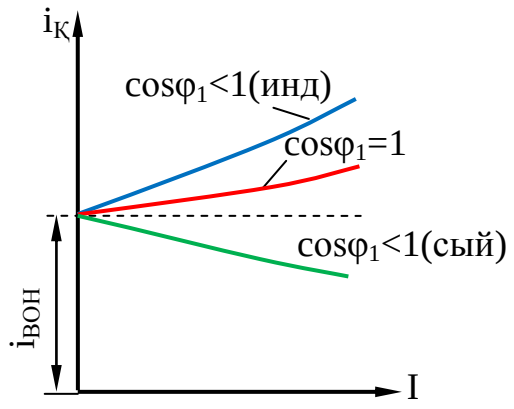
$$\Delta U_{НОМ} = \frac{E_0 - U_{1НОМ}}{U_{1НОМ}} \cdot 100.$$

Генераторда сыйымдылықты жүктеме болған кезде жүктеменің түсуі кернеуді азайтады және сондықтан $\Delta U_{НОМ}$ теріс болады.

Синхронды генераторды пайдалану үрдісінде жүктеме тұрақсыз болған кезде кернеуді U_1 тезәрекетті автоматты реттегіштердің көмегімен өзгертпей ұстайды. Дегенмен ораманың оқшауламасының зақымдалуын болдырмас үшін $\Delta U_{НОМ}$ 50% асырмау керек.

Реттемелік сипаттама.

Ол жүктеме өзгерген кезде генератордың қысқаштарындағы кернеу өзгермей номинал болып қалу үшін қоздырушы токты қалай өзгерту керек екенін көрсетеді: $i_К=f(I)$ бұл кезде $U_1=U_{1НОМ}=const$; $\cos\varphi_1= const$; $n= n_{НОМ} =const$. 1.14 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 $i_к$ 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.



1.14 сурет – Синхронды генераторлардың реттелу сипттамалары

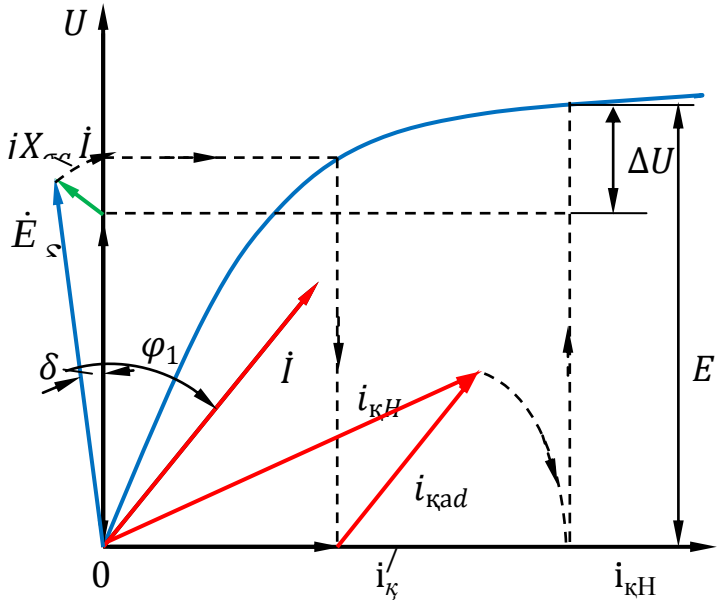
1.8 Синхронды генератордың ЭҚК тәжірибелік диаграммасы (Потье диаграммасы)

Жобалаған кезде қоздырушы токты анықтау қажеттілігі пайда болады, ол тағайындалған жұмыс режимін (U, I, $\cos\varphi$) және сонымен қатар жүктеме номиналдан түсіп кеткен кезде синхронды генератордың кернеуінің өзгеруін қамтамасыз етеді. Оны графиктік жолмен – ЭҚК тәжірибелік диаграммасын (Потье диаграммасы) тұрғызу арқылы анықтауға болады. Потье диаграммасы келесі жолмен тұрғызылады.

Бос жүріс сипаттамасын тұрғызамыз. Сонан соң ординат өсіне $OA=U_{НОМ}$ векторын тұрғызамыз және φ_1 бұрышымен OA векторына токтың I векторын

жүргіземіз. U векторына түсетін кернеудің $j\dot{I}x_\sigma$ векторын қосып жүктелген генератордың ЭҚК $\dot{E}_\delta$, бұл кезде $R_a = 0$ деп аламыз:

$$\dot{E}_\delta = \dot{U}_1 + j\dot{I}x_\sigma. \qquad (1.9)$$



1.15 сурет - Потье диаграммасы

В нүктесін бос жүріс сипаттамасына көшіреміз (С нүкте) және CD ординатасын жүргіземіз. Абсцисса өсінде пайда болған OD кесінді жүктелген генератордың ЭҚК тудыру үшін қажетті қоздырушы токты $i'_к$ анықтайды.

Бойлық якорь реакциясының тигізетін әсерін ескеру үшін, $i'_к$ токқа $\varphi' = \varphi + \gamma$ бұрышпен якорь реакциясының бойлық магнитсіздендіру әрекетіне сәйкес келетін қоздырушы токты $i_{қad}$ қосамыз. Токтардың геометриялық қосындысы $i'_к + i_{қd} = i_{кНОМ}$ берілген жұмыс режимін қамтамасыз ету үшін қажет.

Синхронды генератор номинал жүктемемен жұмыс істеп тұр деп жорамалдайық, сонан соң жүктеме толықтай түсірілді, бірақ бұл кезде айналу жиілігі мен қоздырушы ток өзгеріссіз қалды делік. Жүктемені түсіргеннен соң генератордың кернеуі $\Delta U_{НОМ}$ өсті. Бұл мәнді анықтау үшін келесідей істейміз: Егер $i_{кНОМ}$ токты абсцисса өсіне түсірсек, $i_{кНОМ}$ мәні өзгермеген кезде жүктемені түсіргенде алынатын $U_{НОМ} = E_0$ кернеуді, сондай-ақ кернеудің өзгеруін

$$\Delta U_{НОМ} = \frac{NP - NR}{NR} \cdot 100 = \frac{E_0 - U_{НОМ}}{U_{НОМ}} \cdot 100$$ табуға болады.

1.9 Синхронды машиналардың параллель жұмысы. Жалпы жағдай

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.

Бүкіл жүйедегі бірыңғай жиілік f_1 болған кезде бірнеше синхронды машина ортақ желіге ұзақ уақыт орнықты жұмыс істеу үшін міндетті шарт олардың қатаң түрде синхронды айналуы болады. Оған тек қана синхронды айналуды машиналардың өздерімен автоматты түрде сүйемелдеп және олардың қоздырушы тізбегіне тезәрекеттік реттегіш құрылғылар пайдалану нәтижесінде қол жеткізуге болады.

Төменде мұндай мүмкіндікті қандай шамада және қандай шарттарда синхронды машиналар қамтамасыз ететіні көрсетілетін болады.

Синхронды генератордың қуаты шексіз үлкен болатын желімен параллель жұмыс істеген кездегі негізгі ерекшеліктері.

Саны көп синхронды машиналар ортақ желіге бірігіп жұмыс істеген кезде бір машинаның қуаты қалған барлық машиналардың қосынды қуатымен салыстырғанда әдетте көп болмайды. Үрдісті кейбір дәріптеушілік кезінде, кез-келген қарастырылатын машинаның қуатымен салыстырғанда барлық машиналардың қосынды қуаты, яғни желінің қуаты, шексіз үлкен болады деп санаймыз. Бұл, қарастырылатын машинаның жұмыс режимінің өзгеруі іс жүзінде бүтіндей жүйенің кернеуінің $U_ж$ немесе жиілігінің f_1 өзгеруіне әсер ете алмайтынын білдіреді.

Қуаты шексіз үлкен болатын желіге қосылған қуаты шектеулі синхронды генератордың жұмысын зерттейміз.

Үрдісті және генераторды желіге қосу шарттарын алдағы уақытта қарастырамыз.

Синхронды машина қуаты шексіз үлкен болатын желімен параллель жұмыс істеген кезде оның қысқыштарындағы кернеу $U_ж$ бүкіл желінің режимімен қатаң түрде берілген және қоздырушы токқа, жүктеме тогы мен машинаның өзінің қуатына тәуелсіз болады. Бұл синхронды машинаның қуаты шексіз үлкен болатын желімен параллель жұмысына тән ерекшелігі болады.

Бұған қарамастан, синхронды машинаның мұндай жұмыс режимін зерттеу үшін дербес желіге жұмыс істейтін синхронды генератор үшін жоғарыда анықталған электромагниттік байланыстар пайдаланылуы мүмкін.

Қарапайымдылық үшін, параллель жұмысқа қосылатын машина айқындалмаған полюсті және якорь кедергісі $R_a = 0$ тең болады деп ұйғарайық. Онда машинаның якорь тогы қарапайым тәуелділікпен анықталады:

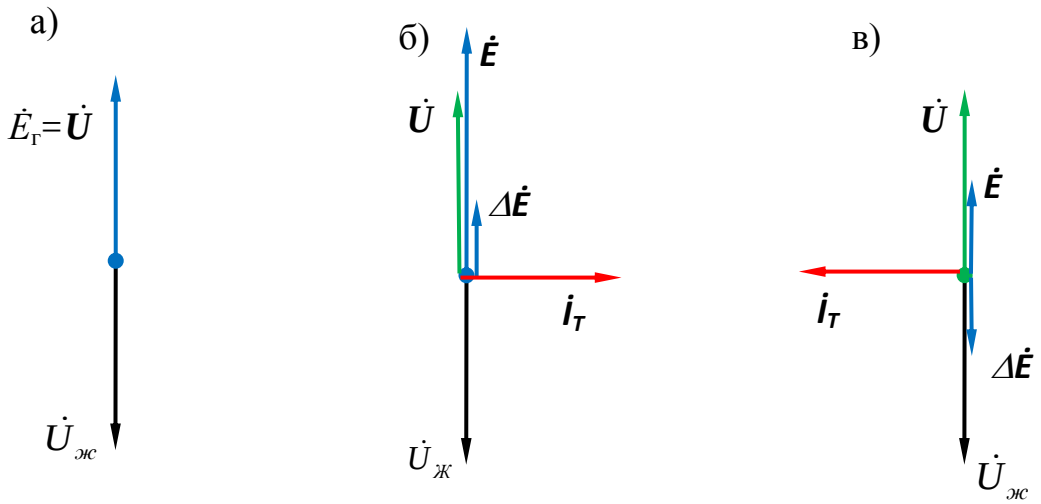
$$\dot{I}_T = \frac{\dot{E} - \dot{U}_ж}{jx_d} = \frac{\Delta \dot{E}}{jx_d}. \qquad (1.10)$$

Реактивті қуаттың өзгеруі. Синхронды компенсатор режимі.

Синхронды жылдамдықпен $\omega_2 = \omega_{1ж}$ айналып тұрған үш фазалы синхронды машина желіге қосылған және оның әрбір фазасындағы ЭҚК амплитудасы бойынша қуаты шексіз үлкен болатын желіге балама ГЭС – ің генераторның $U_ж$ кернеуіне тең $E = U_ж$, бірақ фаза бойынша онымен салыстырғанда 180° ығысқан делік (1.15 сурет). Бұндай жағдайда машинаның әрбір фазаларының контурларындағы ЭҚК қосындысы нөлге тең болады және сондықтан статор орамасында ток жүрмейтін болады (1.16, а сурет).

Синхронды машина қуаты шексіз үлкен болатын желімен бос жүріс режимінде параллель жұмыс істеген кезде $E = U_ж$ болғанда оның қоздырылуы өсетін болады (1.16, а сурет). Бұл жағдайда ЭҚК E кернеуден $U_ж$ үлкен болады және $\Delta\dot{E} = \dot{U}_ж + \dot{E}$ фаза бойынша $U_ж$ - мен сәйкес келетін болады. Мұндай жағдай кезінде статор орамасында ΔE ЭҚК әсерімен қалатын реактивті ток I_T пайда болады, ол қоздырушы магнит өрісінің өсуіне қарсы әсер етуші магнитсіздендіруші якорь реакциясын тудырады. Машина, осылайша, желіге таза индуктивті ток және реактивті қуат беретін болады.

Кері үрдіс қоздырушы ток төмендеген кезде пайда болады (1.16, б сурет). Бұл жағдайда ΔE ЭҚК озатын ток тудырады I_1, осының нәтижесінде машинада қоздырылудың төмендеуіне қарсы әрекет ететін және машинаның қысқыштарына берілген кернеудің U тұрақтылығын қамтамасыз ететін магниттеуші якорь реакциясы пайда болады: $\dot{U} = -\dot{U}_ж$, яғни машина желіге сыйымдылықты ток беретін және желіден реактивті қуатты тұтынатын болады. Сонымен, қуаты шексіз үлкен болатын желімен параллель жұмыс істейтін синхронды машина қоздырылудың өзгеруіне қарсы әсер етеді, себебі оның қысқыштарындағы кернеу $U_ж$ қатаң түрде берілген.



1.16 сурет - Реактивті қуаттың өзгеруі

Синхронды машинаның қоздырушы тогының өзгеруі онда тек қана реактивті токтарды тудырады немесе реактивті токтың және реактивті қуаттың өзгеруіне әкеледі. $E \succ U$ болған кезде синхронды машина асқын қоздырылған деп, ал $E \prec U$ болған кезде жете қоздырылмаған деп аталады. Активті қуат нөлге тең болған кезде асқын қоздырылған синхронды машина желіге қатысты сыйымдылыққа, ал жете қоздырылмаған синхронды машина индуктивтіге балама болады.

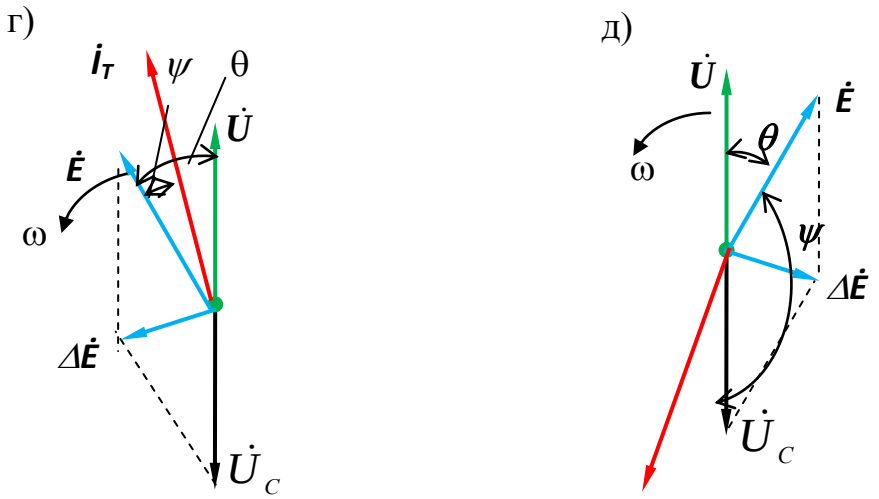
Активті жүктемесі жоқ және реактивті токпен жүктеулі синхронды машина синхронды компенсатор деп аталады. Мұндай компенсаторлар қуат коэффициентін өсіру үшін және желілердегі кернеудің қалыпты деңгейін сүйемелдеу үшін пайдаланылады.

Егер, мысалы, мұндай компенсаторды үлкен өндірістік жүктемесі бар ауданға орналатса және оны асқын қоздырса, онда ол өндірістік кәсіпорындардағы асинхронды қозғалтқыштарды реактивті қуатпен жабдықтайды, қоректендіруші желі және электр станцияларындағы генераторлар толықтай немесе жартылай бұл қуаттан босатылады, генераторлар мен желінің қуат коэффициенті өседі, қуат шығындары және олардағы кернеудің түсуі азаяды және тұтынушылардағы желінің кернеуі қалыпты деңгейде сақталады.

Активті кернеудің өзгеруі. Генератор және қозғалтқыш режимдері.

Жоғарыда айтылғандардан шығатыны, қоздырушы токтың өзгеруі активті жүктеме туғызбайды немесе оны өзгертпейді.

Параллель жұмысқа қосылған машина өзіне активті жүктемені алып және генератор режимінде жұмыс істеу үшін оның білігіндегі айналдырушы механикалық моментті өсіру қажет, мысалы, турбинаға берілетін суды немесе буды өсіріп жібереді.



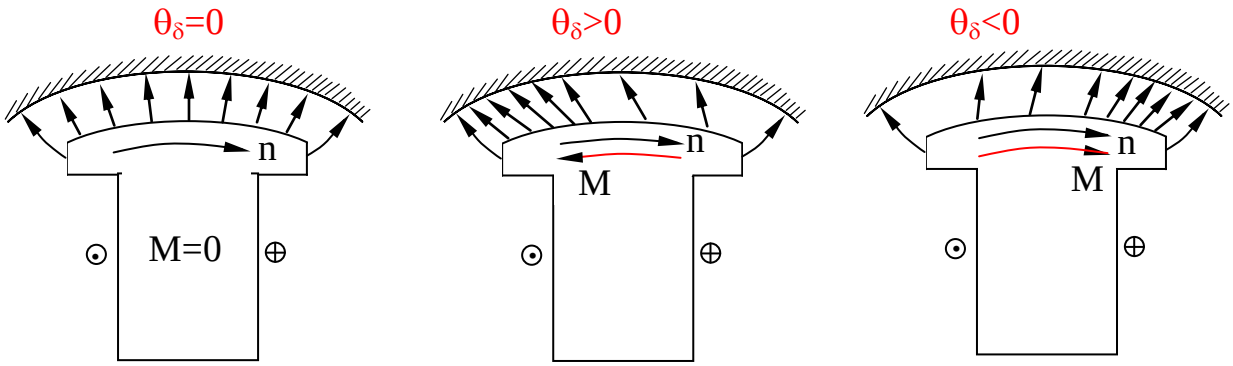
1.17 сурет – Активті қуаттың өзгеруі

Егер қандай да бір себебтермен жетектік қозғалтқыштың айналдырушы моменті өссе, онда генератордың роторы үдейді және комплекстік жазықтықта Ė векторы осыған сәйкес фаза бойынша $\dot{U}_{ж} = -\dot{U}$ векторына

жақындап тезірек жылжи бастайды (1.18 сурет). Мұндай жағдайда машинаның әрбір фазасының контурында ЭҚК пайда болады $\Delta\dot{E} = \dot{E} + \dot{U}_{ж}$ және I_T ток жүретін болады, ол, егер фазаның аз болатын активті кедергісін r_1 ескермесе, $\Delta\dot{E}$ ЭҚК $\pi/2$ бұрышқа қалатын болады. Бұл жағдайда φ бұрышы кішкентай болады және машина желіге қуат $P = m_1 E I_T \cos\varphi$ бере бастайды. Бұл жағдайда генератордың білігінде тежеуші момент пайда болады, ол ротордың әріқарай айналының үдеуіне кедергі жасайды және қайтадан бұрыштық жылдамдықтардың $\omega_2 = \omega_{1c}$ теңесуіне әкеледі.

Синхронды машинаның роторы тежелетін жағдайда $(\omega < \omega_{ж})$, ЭҚК ΔE өзінің фазасын өзгертеді (1.18, в сурет) және ток I_T ЭҚК E салыстырғанда 180° жақын φ бұрышқа ығысатын болады. Мұндай жағдайда $(\cos\varphi < 0)$ қуат $P = m_1 E I_T \cos\varphi$ теріс болады, машина қозғалтқыш режиміне өтеді және ротор үдей бастайды. Бұл үрдіс қайтадан бұрыштық жылдамдықтар теңескенге дейін $\omega = \omega_{ж}$ жалғасатын болады.

1.17, г және д, суреттерден шығатыны, генераторда $\dot{U}$ векторы $\dot{E}$ векторынан қалады, ал қозғалтқышта – керісінше. Жүктеме бұрышы θ_δ бірінші жағдайда оң болып саналады, ал екіншіде – теріс.



а) бос жүріспен жұмыс істеген кезде; б) генератор режимінде;
в) қозғалтқышта.
1.18 сурет – әртүрлі жұмыс режимдері кезіндегі синхронды машинаның ауа саңылауындағы магнит өрісінің сипаты.

Статор мен ротордың арасындағы ауа саңылауындағы магнит өрісінің генератор және қозғалтқыш режимдеріндегі сипаты 1.18 суретте көрсетілген. Генераторда полюстердің өсі статор бетіндегі ағынның бетіне қатысты айналу бағыты бойынша) θ_δ бұрышқа (θ_δ>0 алға қарай ығысқан). Қозғалтқышта – айналу бағытына қарсы (θ_δ<0). θ_δ бұрышын *жүктеменің ішкі бұрышы* деп атауға болады. Айналушы электромагниттік моменттің пайда болуын және оның әсер етуші бағытын 1.18 суретке сәйкес

магниттік сызықтардың тартылуымен түсіндіруге болады, оларды созылмалы жіп ретінде қарастыру қабылданған.

Сонымен, синхронды машина қуаты шексіз үлкен болатын желімен параллель жұмыс жасай отырып, өзінің синхронды айналу жылдамдығын автоматты түрде ұстап тұруға ұмтылады деген қорытындыға келуге болады.

Алда көрсетілетіндей, синхронды машиналардың мұндай қасиеттері шексіз байқала бермейді. Өте үлкен үдетуші немесе тежеуші моменттерде машина синхрондылықтан шығып кетеді. Дегенмен бұл сындық моменттердің мәндері айтарлықтай үлкен, және сондықтан синхронды машиналардың параллель жұмыс кезінде синхрондылықты белгілі бір жүктемеге дейін автаматты түрде ұстап тұру қабілеті, практикада кеңінен пайдаланылатын, олардың ең құнды қасиеті болады.

1.10 Синхрондау және параллель жұмысқа қосу

Синхронды генераторды желімен параллель жұмысқа қосқан кезде келесідей шарттарды орындау керек:

1) Синхронды машина оны желіге қосқан уақытта дәлме-дәл синхронды жылдамдықпен айналуы қажет, бұл кезде машинаның жиілігі желінің жиілігімен дәл келеді.

2) Желіге қосқан уақытта әрбір фазадағы машинаның кернеуі U_1 желінің өздеріне сәйкес келетін фазалық кернеуіне тең және кері таңбамен алынған болуы керек $U_1 = -U_{ж}$, бұл кезде желінің және машинаның кернеуі синусоидалы болады деп ұйғарады.

3) Генератордың шықпасындағы фазалар қатарының реті желінің қысқыштарындағыдай болуы керек.

Жоғарыда көрсетілген шарттар айқын, дегенмен оларды дәл сақтау, іс жүзінде үлкен қиындықтарды туғызады. Сондықтан пайдаланған жағдайда синхронды машинаны желіге қосқаннан кейін оның өздігінен синхрондалу қасиетін пайдаланып, оларды тек қана шамалап сақтаумен шектеледі.

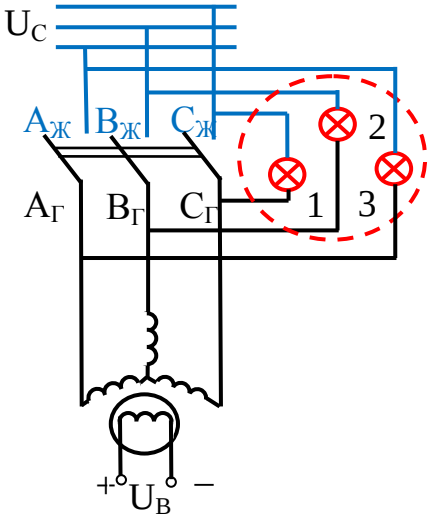
Генераторды барлық көрсетілген шарттарды қанағаттандыратын жағдайға келтіру *синхрондау* деп аталады. Шарттардың кез келген біреуін орындамау статор орамасында үлкен теңгеруші токтардың пайда болыуына алып келеді, олардың шектен тыс мәндері апаттың себебі болуы мүмкін.

Параллель жұмыс істеп тұрған генераторлардың желісіне генераторды дәл синхрондау тәсілімен немесе өздігінен синхрондалу тәсілімен қосуға болады.

1.10.2 Дәлме - дәл синхрондау тәсілі.

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.



1.19 сурет – Шамдық синхроноскоп

Генераторларды шамдық синхроноскоп-ты пайдаланып синхрондау үрдісін қарастырамыз, ол екі тәсілмен қосылатын үш *1,2,3* шамнан тұрады: «өшуге» және «айналатын отпен». 1.19 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 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.

1.10.2 Өздігінен синхрондалу әдісі (өрескел синхрондалу әдісі).

Шамның және нөлдік вольтметрдің көмегімен синхрондылау тек қана қуаты аз болатын генераторлар үшін пайдаланылады. Қазіргі кезде станцияларда өздігінен синхрондалу әдісі кеңінен таралған.

Әдістің мәні.

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. Бұл кезде статор тогы тез азаяды. Өздігінен қоздырылған кезде генераторда орамаларға, генераторды турбинамен жалғайтын мойынтрек пен муфтаға айтарлықтай механикалық әсер ететін күштер тудыратын күрделі электромеханикалық өтпелі үрдістер өтеді. Бұл күштердің генератордың сенімділігіне тигізетін әсері синхронды генераторларды жобалаған кезде

ескеріледі. Өздігінен қоздырылу әдісімен қуаты 500 МВт дейінгі синхронды генераторларды параллель жұмысқа қосады.

1.10.3 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 және *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 (1.20 сурет) келесідей өрнек аламыз:

$$E = x_d I_d + U\cos\theta;\ \ x_q I_q = U\sin\theta, \tag{1.10}$$

мұнан

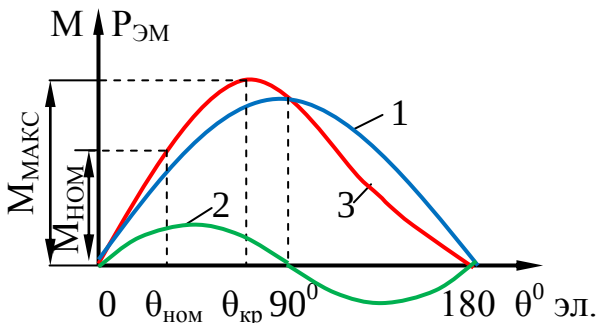
$$I_d = \frac{E - U\cos\theta}{x_d};\ \ I_q = \frac{U\sin\theta}{x_q}. \tag{1.11}$$

1.20 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 (1.91) өрнектегі мәндерін қойып, келесідей өрнек аламыз:

$$P = \frac{mU^2}{x_q}\sin\theta\cos\theta + \frac{mEU}{x_d}\sin\theta - \frac{mU^2}{x_d}\sin\theta\cos\theta. \tag{1.12}$$



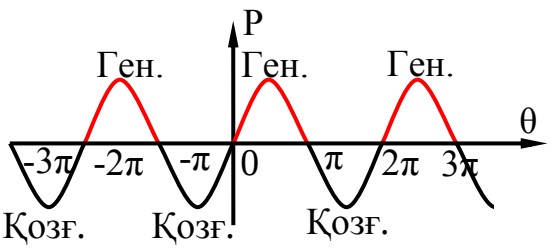
1.20 сурет – Бұрыштық сипаттамалар

$$P = \frac{mEU}{x_d}\sin\theta + \frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\theta. \tag{1.13}$$

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

1.10.4 Айқындалмаған полюсті машина. Статикалық орнықтылық туралы ұғым.

Одан әрі, машина қуаты шексіз желімен параллель жұмыс істейді, сондықтан $U = const$, $f = const$ және генератордың қоздырушы тогы өзгермейді деп жорамалдаймыз. Қарапайымдылық үшін сонымен бірге, X_d =const және $X_q = const$ болады деп ұйғарамыз.



1.21 сурет – Айқындалмаған полюсті машинаның бұрыштық сипаттамасы

Айқындалмаған полюсті машинада X_d=X_q, сондықтан (1.13)өрнектен:

$$P = \frac{mEU}{x_d} \sin\theta \,. \qquad (1.14)$$

P>0 жарты толқын генератор режиміндегі жұмысқа және P<0 қозғалтқыш режиміндегі жұмысқа сәйкес келеді.

$-\pi \le \theta \le 0$ диапазоны қозғалтқыш режиміне, ал $0 \le \theta \le \pi$ генератор режиміне сәйкес келеді. Себебі синусоидалық қисықтың жарты периоды симметриялы болады, сондықтан машинаның қозғалтқыш және генератор режимдеріндегі қасиеттері ұқсас болады. Сол себептен төменде генератор режимін қарастырамыз (1.21 сурет). (1.14) өрнектің негізінде айқындалмаған машина үшін:

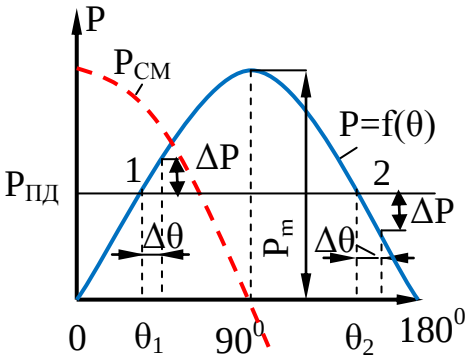
$$P_m = \frac{mEU}{x_d}. \qquad (1.15)$$

(1.15) өрнекте көрсетілгендей E қаншама көп болса, P_m соншама көп болады немесе машинаның қоздырушы тогы, U қаншама көп және X_d соншама аз. Осы себептен X_d азайту мақсатымен синхронды машиналарда саңылау асинхронды машиналардікінен үлкен етіп жасалады.

Генератордың қалыптасқан жұмыс режимінде бірінші реттік қозғалтқыш тудыратын қуат $P_{БҚ}$ генератор желіге беретін P электрлік қуатқа тең болады, яғни $P_{БҚ} = P$.

$P_{БҚ}$ қуат θ бұрышына тәуелсіз және сондықтан 1.22 суретте горизонталь сызықпен көрсетілген, ол электр қуатының $P=f(\theta)$ сипаттамасымен *1* және *2* нүктелерде қиылысады. Бұл нүктелерде $P_{БҚ}$=P болады, демек, олардың екеуіде әдеттегідей қалыптасқан жұмыс режиміне сәйкес келген болар еді. Дегенмен тек қана *1* нүктедегі жұмыс орнықты болады.

Шынында да, егер 1.22 суреттегі *1* нүктеде жұмыс істеген кезде аздаған кездейсоқ өтпелі ауытқу нәтижесінде θ бұрышы $\Delta\theta$ өседі, онда генератордың электрлік қуаты бірінші реттік қозғалтқыштың қуатынан ΔP асып кетеді. Осының салдарынан білікте тежеуші артық электромагниттік момент әрекет ететін болады:



1.22 сурет – Айқындалмаған полюсті синхронды генератордың бұрыштық сипаттамасы

$$\Delta M = \frac{\Delta P}{\Omega} = \frac{p\Delta P}{\omega}. \qquad (1.16)$$

Генератордың роторы тежеледі. θ бұрышы азаяды, және *1* нүктеде орнықты қалыптасқан жұмыс режимі қалпына келеді. Егер *1* нүктеде жұмыс істеп тұрған кезде θ бұрышы кездейсоқ ауытқу нәтижесінде азайса, онда осы ауытқудың әрекеті басылған кезде генератор тағыда *1* нүктедегі жұмыс режиміне оралады.

Егер 1.22 суреттегі *2* нүктеде жұмыс істеген кезде θ бұрышы $\Delta\theta$ өссе, онда генератордың қуаты турбинаның қуатынан ΔP аз болады, ротор үдейді, θ бұрышы тағыда өсе береді. Нәтижесінде генератор синхрондылықтан шығады немесе қолайлы жағдай кезінде 1.22 суреттегі қисықтың келесі оң жарты толқынында орнықты жұмыс режиміне өтеді. Егер де *2* нүктеде жұмыс істеген кезде θ бұрышы азайса, онда қуаттар балансының бұзылу салдарынан бұл бұрыш әрі қарай *1* нүктеде осы байланыс қалпына келгенге дейін азайатын болады.

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

Айқындалмаған полюсті синхронды қозғалтқыштың $0>\theta>-90°$ аймақта орнықты жұмыс істейтінін, осыған ұқсас анықтауға болады.

Осындай жолмен, айқындалмаған полюсті синхронды қозғалтқыштың $0>\theta>-90°$ аралықта орнықты жұмыс істейтінін көрсетуге болады.

Белгілі бір қондырғының жұмыс режимі статикалық деп аталады, егер жұмыс режимінде аздаған ауытқулар болған кезде (U, $P_{БҚ}$, $i_қ$ және т.б. аздап өзгеруі) жұмыс режимінің де өзгеруі көп болмайтын болса (θ, P және т.б. шамалар) және бұл ауытқулардың әрекеттері басылған кезде бұрынғы жұмыс режимі қалпына келетін болса. Жоғарыда айтылғандардан шығатыны, синхронды машинаның жұмыс режимі статикалық тұрақты болады, егер:

$$\frac{\Delta P}{\Delta\theta} > 0 \text{ болса және орнықты емес, егер } \frac{\Delta P}{\Delta\theta} < 0 \text{ болса.} \qquad (1.17)$$

1.10.5 Статикалық асқын жүктемелік.

Синхронды машинаның қуаты $P=0$ болғанда, сондай-ақ $\theta=0$. P өскен кезде θ бұрышы да өседі, және $\theta=\theta_{KP}$ болған кезде қуат максимал мәнге жетеді $P=P_m$. Біліктегі механикалық қуат одан әрі өскен кезде машина синхрондылықтан шығады және оның роторы статор өрісімен (якорь реакциясының өрісі) салыстырғанда S сырғумен асинхронды айналатын болады. Қозғалтқышта ротордың жылдамдығы синхрондыдан аз болады (S>0), ал генераторда – синхрондыдан көп болады (S<0). Мұндай асинхронды режим қалыптан тыс және жарамсыз болады, себебі ол машина үшін қауіпті және желінің, синхронды машинамен жалғанған машиналар мен механизмдердің қалыпты жұмысын бұзады. Сондықтан синхронды машиналарды пайдаланған кезде олардың орнықты синхронды жұмысының жеткілікті деңгейде болуын қамтамасыз ету жөнінде ойлану керек.

Синхронды машина жұмыс істеген кезде қысқа мерзімдегі асқын жүктемеге ұшырауы мүмкін. Одан басқа, кернеудің азаю салдарынан, мысалы, желідегі қысқаша тұйықталу кезінде машина тудыра алатын максимал қуат P_m азаяды. Сондықтан, машинаның қуат қоры жеткілікті болуы қажет, яғни P_m мәні айтарлықтай үлкен болуы керек.

Синхронды машинаның статикалық асқын жүктемелілігі $U=U_H$ және $i_Қ = i_{ҚH}$ болған кезде максимал қуаттың P_m номинал қуатқа P_H қатынасымен сипатталады:

$$K_{АЖ} = \frac{P_M}{P_H}. \qquad (1.18)$$

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

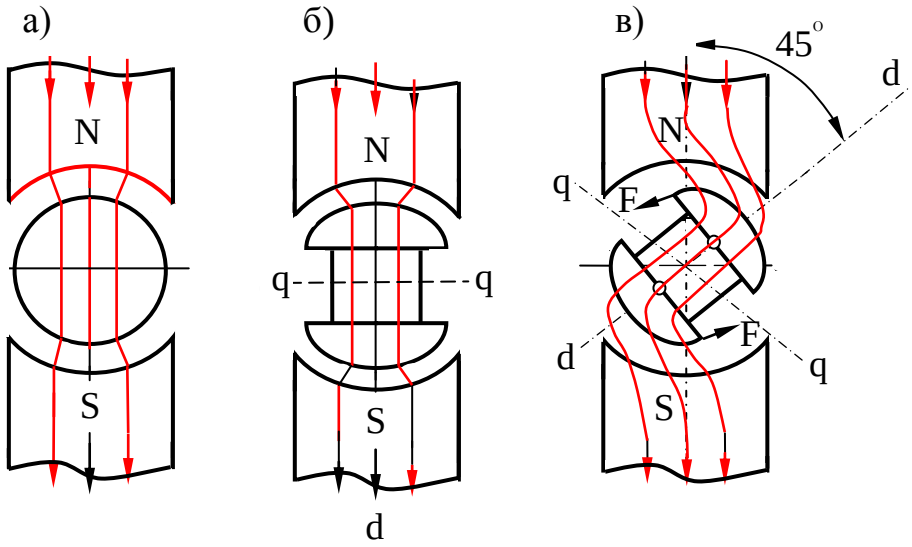
1.10.6 Жете қоздырылмаған айқындалмаған полюсті синхронды машина.

(1.19) теңдік және 1.21 сурет бойынша, айқындалған полюсті машина да синхронды жұмыс режимі кезінде қоздырылмай-ақ қуатты дамыта алады.

Егер $i_Қ = 0$, және $E=0$, онда:

$$P = \frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\theta. \qquad (1.19)$$

$P=(\theta)$ тәуелділігі (1.19) теңдікке сәйкес жиілігі екі еселенген синусоида болады (1.22 сурет, 2 қисық)



1.23 сурет – қоздырылмаған синхронды машинаның магнит өрісі

Қарастырылып отырған жағдай үшін машинада тек қана якорь реакциясының ағыны бар. 1.23 суретте көрнекілік үшін статор айқындалған полюсті етіп бейнеленген. Цилиндр тәріздес ротор кезінде (1.23, а сурет), $X_d=X_q$ болғанда айналушы якорь реакциясының өрісіне қатысты ротордың қалай тұрғаны бәрібір болады, сондықтан машина электромаиниттік момент пен қуат тудырмайды. Айқындалған полюсті машинада ротор айналушы өріске қатысты, бұл кезде магнит ағынына тигізетін кедергі және магнит өрісінің энергиясы минимал болатын қалыпқа тұруға ұмтылады. Егер бұл кезде біліктегі момент $M_{CT}=0$ болса, онда $\theta=0$ болады (1.23, б сурет) және роторға әсер ететін электромагниттік моментте нөлге тең болады. Бұл кезде (1.19) теңдікке сәйкес $P=0$. Егер білік сыртқы моментпен жүктелген болса, онда ротор өріске қатысты ығысады, $\theta\neq 0$ тең болмайды және машинада электромагниттік момент пен активті қуат үдейді (1.23, в сурет). Ротор якорь өрісіне қатысты $180°$ бұрылған кезде режим өзгермейді, себебі ротордың өзі магниттелмеген.

Қоздырылмаған айқын полюсті машинада электромагниттік момент ауа саңылауы бірқалыпты болмаған кезде $X_d\neq X_q$ тек қана якорь өрісі әрекетінің салдарынан ғана үдейді және сондықтан реактивті деп аталады.

Реактивті жұмыс режимі, мысалы, желімен параллель жұмыс істеп тұрған кезде айқындалған полюсті генератор қандай болса да бір себептермен қоздырылуын жоғалтса (қоздырғыш бұзылғандықтан, өрісті өшіруші автоматтың жалған іске қосылуынан және т.б.) және бұл кезде аз жүктелген болса пайда болуы мүмкін. Соңғы елеулі жағдай, өйткені қуат шектеулі.

Машина бұл режимде магнит өрісін тудыру үшін үлкен реактивті ток тұтынады.

Сонымен бірге қоздырушы орамасы болмайтын және реактивті деп аталатын қуаты аз синхронды қозғалтқыштар да жасалады.

1.10.7 Реактивті қуаттың бұрыштық сипаттамасын қорытып шығару. Реактивті қуат.

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

Мұнда теңдіктен I_d және I_q қойып және $cos^2\theta$ мен $sin^2\theta$ екі еселенген бұрыштың функциясымен ауыстырып, аламыз

$$Q = \frac{mEU}{x_d}\cos\theta + \frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\cos\theta - \frac{mU^2}{x_q}\left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d}\right).$$

Косинус жұп функция болатындықтан, онда басқадай тең жағдайлар кезінде генератор және қозғалтқыш режимдері үшін бұл сипаттамалар бірдей болады.

1.10.8 Синхронды машиналардың тұрақты қуат және айнымалы қоздыру кезіндегі жұмысы. Синхронды машиналардың U - тәріздес сипаттамалары.

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

Кейде бұл сипаттамаларды V – тәріздес деп те атайды. Бұл олардың латын әріптерімен U және V ұқсастығынан пайда болған.

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

$$\dot{U} \cong \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{\sigma a} = \dot{E} - j\dot{I}X_d \quad \text{немесе} \quad \dot{E} = \dot{U} + j\dot{I}X_d. \qquad (1.20)$$

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

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

2) $P = \frac{mUE}{X_d}\sin\theta$, демек, $E\sin\theta = const$.

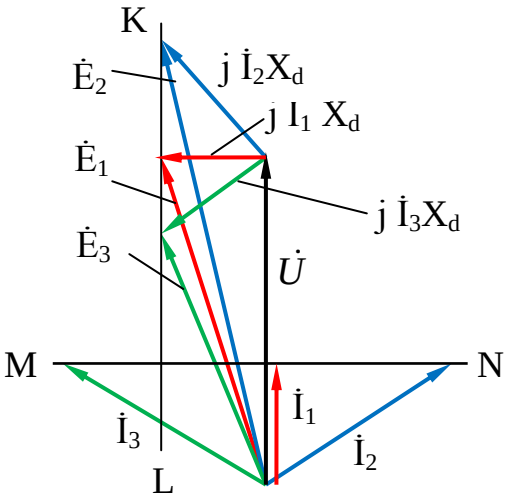
Алдымен диаграмманы якорь тогы I_1 таза активті болатын жағдай үшін тұрғызамыз. $j\dot{I}_1X_d$ векторы $i_{қ1}$ тогы тудыратын $\dot{E}_1$ векторына перпендикуляр болады. (1.20) шарты бойынша ЭҚК векторының соңы қоздырушы ток кез келген мәнге өзгерген кезде KL тузуінің бойымен жылжиды, ал якорь тогы векторының соңы – MN түзуінің бойымен.

Ары қарай қоздырушы токты $i_{қ2}$ дейін өсіреміз. Оған векторының соңы KL тузуінің бойымен жылжитын ЭҚК сәйкес келеді. (1.20) теңдеуі бойынша $j\dot{I}_2X_d$ векторын және оған перпендикуляр болатын I_2 токтың векторын, оның соңы MN түзуінің бойымен жылжитындай етіп тұрғызамыз. $i_{қ3} < i_{қ1}$ ток үшін

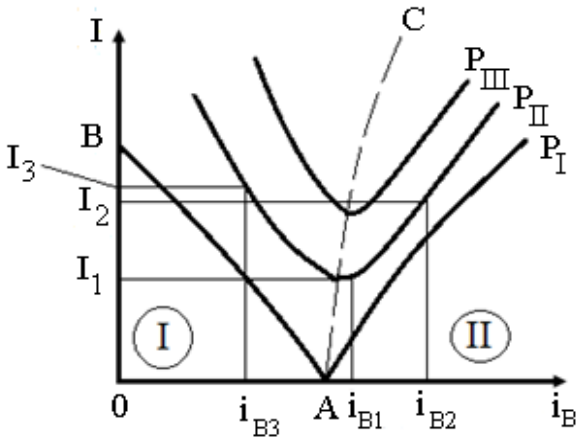
диаграмманы осыған ұқсас жолмен тұрғызамыз. Барлық алынған мәндерді 1.25 графикке көшіреміз.

АС сызығы, олар үшін cos $\varphi = 1$ тең болатын нүктелер арқылы өтеді.

Графикте $P_{III} > P_{II} > P_I$, және $P_I=0$. I аймақ – жете қозбаған режим және генератордың сыйымдылықты жүктемесіне сәйкес келеді, бұл кезде желі үшін генератор индуктивтілік болады, сондықтан ол желіден реактивті ток тұтынады (1.24 сурет). II аймақ – асқын қоздырылған режим және генератордың индуктивті жүктемесіне сәйкес келеді, бұл кезде генератор желі үшін сыйымдылықты болады, сондықтан ол желіге реактивті ток береді (1.24 сурет). $P_I=0$ тең болған кездегі график синхронды компенсатор режиміне сәйкес келеді.



1.24 сурет – айқындалмаған полюсті машинаның векторлық диаграммасы



1.25 сурет – U – тәріздес сипаттамалар

A нүктесінде генератор жүктемесіз жұмыс істейді. *B* нүктесінде генератор қоздырылмай жұмыс істейді, ал машинаның магнит өрісі тек қана якорьдің реактивті тогымен құрылады. B_1C сызығы статикалық орнықты болатын маңдағы жүктеме тогының қоздырушы токқа тәуелділігін сипаттайды. *AB* сызығының бір мезгілде $cos\varphi_1 = 0$ және $\varphi_1 < 0$ болған кезде және координат өстерін *AB* сипаттамасына ұқсас сәйкестендіріп бағыттаған кезде реттемелік сипаттама болатынын атап өткен жөн. *AE* сызығы дәл осындай шарттар кезінде $cos\varphi_1 = 0$ және $\varphi_1 > 0$ мәндеріне сәйкес келетін реттемелік сипаттаманы, ал *AD* сызығы $cos\varphi_1 = 1$ тең болған кездегі реттемелік сипаттаманы көрсетеді.

Синхронды генератордың реттемелік сипаттамаға сәйкес келетін жұмыс режимі, жоғарыда генератордың автономды желіге істеген жұмыс жағдайы үшін қарастырылды.

Шексіз үлкен қуаты бар желімен параллель жұмыс істеген кездгі бұл режимнің де үлкен практикалық маңызы бар, себебі жүктеме өзгерген кезде $U_1 = const$ болғанда генератордың қуат коэффициентін өзгертпей ұстау қажеттілігі жиі пайда болады.

Генератордың автономиялық жұмыс жағдайында түсірілген реттемелік сипаттамалары, оның қуаты шексіз үлкен болатын желімен параллель жұмысына талдау жүргізу үшін толықтай жарамды.

Қазіргі кездегі ірі электр станцияларындағы активті және реактивті қуаттарды реттеумен байланысты болатын үрдістер, әдетте автоматтандырылады.

Бұрыштық, U-тәріздес және реттемелік сипаттамалар үшін жоғарыда келтірілген талдаулар келесідей қорытындылар жасауға мүмкіндік береді:

1) Қуаты шексіз үлкен болатын желімен параллель жұмыс істеген кездегі синхронды генератордың активті қуаты тек қана оның бірінші реттік қозғалтқышының айналдырушы моментін өзгерту есебінен реттелуі мүмкін. Қозғалтқыштың айналдырушы моментін өсірген кезде генератордың роторы үдейді, θ бұрышы қозғалтқыштың моменті мен генератордың кедергі моменті арасында тепе-теңдік орналасқанға дейін өседі. Қозғалтқыштың айналдырушы моменті азайған кезде кері үрдіс орын алады.

Қоздырушы ток өзгермеген кезде активті қуатпен бір уақытта генератордың реактивті қуаты да өзгереді.

2) Генератордың активті қуатын реттеген кезде $cos\varphi_1$ мәнін тұрақты сақтау үшін реттемелік сипаттамаға сәйкес бір уақытта қоздырушы токты өзгерту қажет.

3) Синхронды генератор желіге беретін немесе желіден тұтынатын реактивті қуатты өзгерту, қоздырушы токты реттеу арқылы іске асырылады.

Кішкентай қоздырушы токтар кезінде және берілген активті қуатта генератор жете қозбаған режимде жұмыс істейді және желіден оған магнит өрісін күшейту үшін қажетті, қалатын реактивті ток тұтынады. Үлкен қоздырушы токтар кезінде және сол активті қуатта асқын қоздырылады; бұл жағдайда генератор желіден қоздырушы ток тудырған, шамадан тыс үлкен болатын магнит өрісін азайтатын озушы реактивті ток тұтынады.

Генератордың реактивті тогы нөлге тең және $\cos\varphi = 1$ тең болатын кезде аралық режим болады.

4) Генератордың желіден қалатын реактивті токты тұтынуы генратордың желіге озатын реактивті ток беруімен тең, сондай-ақ озатын реактивті токты тұтынуы желіге қалатын реактивті ток беруімен тең болады.

1.10.9 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 қозғалтқышта U^2 пропорционал болады. Сондықтан кернеу төмендеген кезде синхронды қозғалтқыштың асқын жүктемелік қабілеттілігінің үлкен бөлігі сақталады. Одан басқа, синхронды қозғалтқыштардың қоздырушы токты өсіруші мүмкіндігін пайдалану желінің кернеуінің апаттық төмендеуі кезінде олардың жұмысының сенімділігін өсіруге мүмкіндік береді және бұл жағдайларда бүтіндей энергия жүйесінің жұмысын жақсартады.

Ауа саңылауы шамасының үлкен болу салдарынан болаттағы және синхронды қозғалтқыштың ротор торындағы қосымша шығындар асинхрондыдағыдан аз болады, осының нәтижесінде синхронды қозғалтқыштардың ПӘК әдетте жоғары болады.

Басқа жақтан, синхронды қозғалтқыштардың құрылысы қысқаша тұйықталған роторлы асинхронды қозғалтқыштардан күрделі болады және одан басқа, синхронды қозғалтқыштарда қоздырғыш немесе қоздырушы ораманы тұрақты токпен қоректендіруге арналған басқа бір құрылғылар болу керек. Осының салдарынан синхронды қозғалтқыштар көптеген жағдайда қысқаша тұйықталған роторлы асинхронды қозғалтқыштан қымбат болады.

Бірақ ең үлкен кемшілігі – оларды жүргізудің күрделілігі.

Қозғалтқышты өндірістік жиіліктегі желіге тікелей қосқан кезде ол айналмайды, себебі f = 50 Гц жиілікке сәйкес келетін жарты периодта, яғни $t = T/2 = 1/2f = 1/2 \cdot 50 = 0{,}01$ секундке тең болатын уақытта электромагниттік моменттің ротор инерциялы болатындықтан оны синхронды жылдамдыққа дейін үдетуге әлі келмейді. 0.01 секундтан соң электромагниттік момент өзінің бағытын кері қарай өзгертеді. Ротор тербеліске ұшырап, орнында қалады.

Ерекшеліктері:

1) Қозғалтқыш режимінің генератордан айырмашылығы, білікке түсірілетін момент ротордың айналуымен бағыттас болады. Қозғалтқыш режимінде жүктеме бұрышы θ - теріс. Бұрыштық сипаттама генератор режимі үшін берілген теңдеумен анықталады.

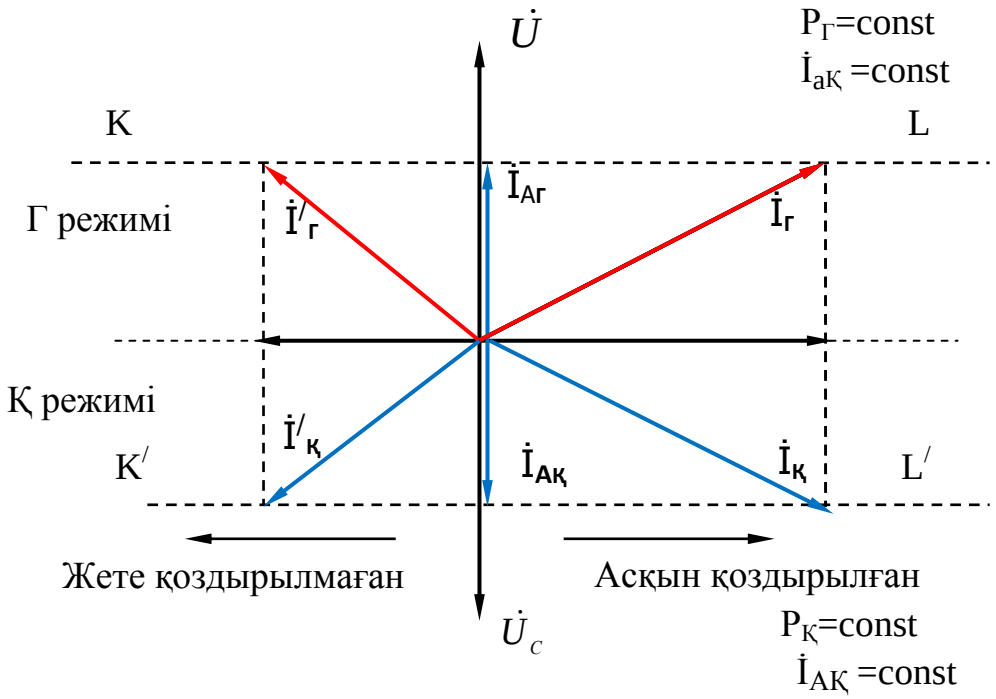
2) Қозғалтқыш режиміндегі U – тәріздес сипаттама негізінен генератор режиміндегі U – тәріздес сипаттамадай болады. Рас сипаттаманы $P=0$ болған кезде түсіру мүмкін болмайды, себебі тіпті бос жүрістің өзінде де қозғалтқыш өзінің шығынын жабу үшін активті қуат тұтынады.

3) В Қозғалтқыш режимінде токтың активті құрамының бағыты генератор режимімен салыстырғанда өзгереді, бірақ реактивті құрамы

генераторлықпен бір бағытта болады. Қозғалтқыштық және генераторлық режимге қарамастан асқын қоздырылған синхронды машина сыйымдылықты режимде жұмыс істейді және желіге реактивті қуат береді. Әдеттегі синхронды машина әрқашан асқын қоздырылуға есептеледі.

Асқын қоздырылған синхронды машина ол желіге қосылған сыйымдылық, жете қоздырылмаған – желіге қосылған индуктивтілік.

4) Векторлық диаграмма гнератор режиміндегідей тұрғызылады, тек қана φ_1>90°.



1.26 сурет - Синхронды машинаның жұмыс режимдері

Жүргізу әдістері:

1) Қосымша қозғалтқыштың көмегімен.

Синхронды қозғалтқыштың роторы айналысқа келу үшін оны бөтен қозғалтқыштың көмегімен синхрондыға жақын жылдамдыққа дейін айналдыру керек және тек осыдан кейін ғана қозғалтқыш желіге қосылуы мүмкін. Жүргізуші қондырғы кішкентай және орташа қуаттағы қозғалтқыштар үшін күрделілеу болады және экономикалық тұрғыдан алғанда ақталмайды. Әдіс, егер қозғалтқыш бос жүргізілетін жағдайда ғана пайдаланылады;

2) Асинхронды жүргізу.

Ол үшін ротордың полюстік ұштарындағы жабық ойықтарға түрі бойынша асинхронды қозғалтқыштың тиіндік торына ұқсас болатын 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.

Жүргізуші токты азайту үшін қуаты үлкен синхронды қозғалтқыштарды асинхронды жүргізу төмендетілген кернеу кезінде іске асырылады.

Статор орамасындағы жүргізуші ток оған берілетін кернеуге пропорционал азаяды, ол синхронды қозғалтқышты жүргізген уақытта желідегі кернеудің шамадан тыс азаюын болдырмауға мүмкіндік береді.

Үш фазалы синхронды қозғалтқыштарды реверстеу асинхронды қозғалтқыштағыдай статор орамасының кез келген екі фазасының орындарын ауыстыру жолымен іске асырылады.

Синхронды қозғалтқыштарды жиі жүргізудің, тоқтатудың және айналу жылдамдығын реттеудің (қозғалтқыш-генераторлар, қуатты насостар, желдеткіштер, компрессорлар, диірмендер, ұнтақтағыштар және басқалар) қажеті болмайтын барлық жерде пайдалану тиімді болады. $cos\varphi_H=1$ болатын синхронды қозғалтқыштар өзінің құны және энергия шығыны бойынша, қуат коэффициентін $cos\varphi_H=1$ дейін компенсациялау үшін конденсаторлық батареялармен жабдықталған асихронды қозғалтқыштардан әрқашан артықшылықта болады.

$P_н$ > 300 *кВт* болғанда $cos\varphi_H$ = 0.9 (асқын қоздырылу) тең болатын синхронды қозғалтқыштарды пайдаланған тиімді және P_n > 1000 *кВт* болған кезде - $cos\varphi_H = 0,8$ болатын.

1.10.10 Синхронды компенсаторлар.

Синхронды компенсаторлар желінің қуат коэффициентін компенсациялау және тұтынушылық жүктемелер шоғырланған аймақтарда 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 компесаторлардың 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.

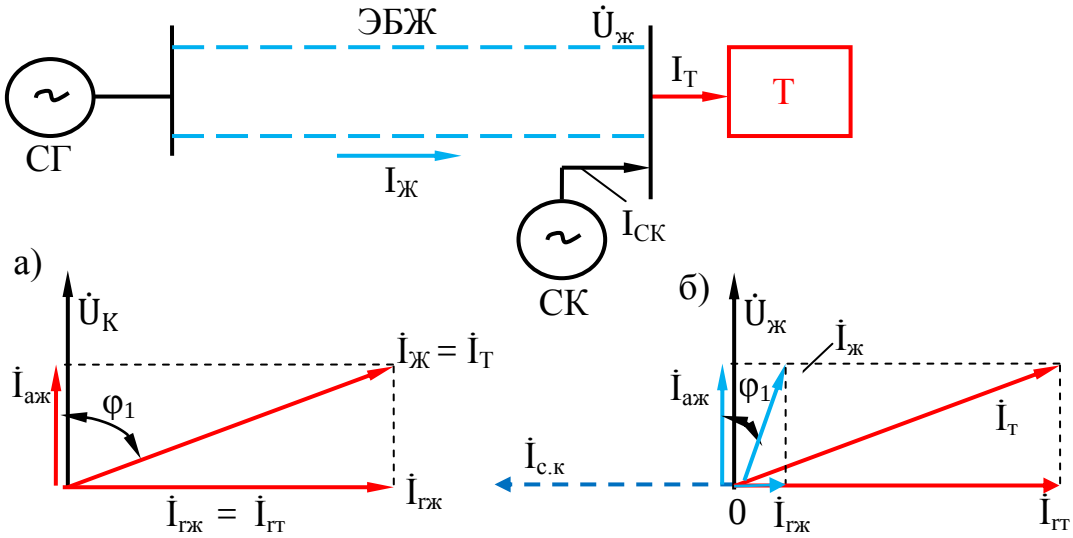
Компенсаторлар $S_H=100000$ *кВа* дейінгі қуатқа жасалады және құрылысы айқындалған полюсті болады, әдетте $2p$=6 немесе *8* тең. Бұл, сутегімен салқындатылатын етіп жасалған алғашқы машиналар.

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.



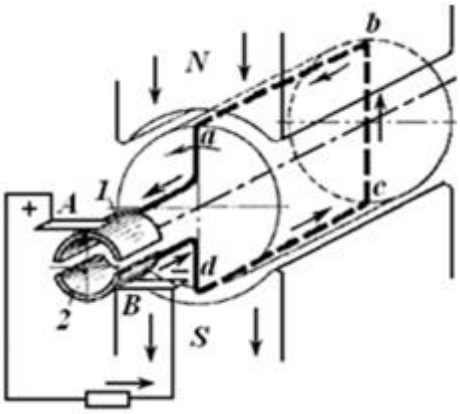
а) синхронды компенсаторсыз; б) синхронды компенсатормен.

1.28 сурет – Векторлық диаграммалар

2 Тұрақты ток машиналары

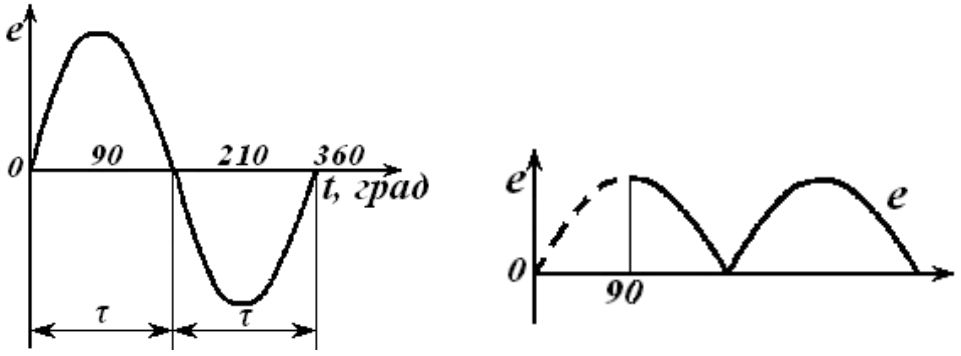
2.1 Тұрақты ток машинасының жұмыс істеу принципі

Қарапайым генератор ретінде екі тұрақты магнит *N* және *S* арасындағы магнит өрісінде айналатын, рама тәріздес бір орамнан тұратын өткізгіш жұмыс істей алады (2.1 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.



2.1 сурет – Тұрақты ток машинасының жұмыс жасау реті

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)*

2.2 сурет – Орамадағы индукцияланатын ЭҚК (*а*) және сыртқы аймақтағы (*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 (2.2, *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.

2.2 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 жапырақшалардың пакетінен құрастырылады. Якорь орамасын коллектор табақтарына жалғайды.

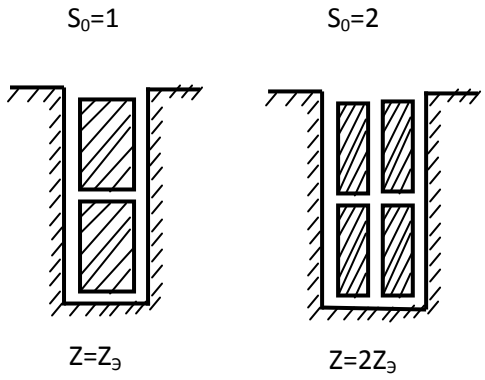
2.3 Тұрақты токтың машинасыларының якорь орамалары. Негізгі ұғымдар

Якорь орамасы – коллекторға қосылған белгілі жағдаймен якорьдің оқтамасында орналасқан өткізгіштердің бекітулі жүйесі.

Якорь орамасының элементі ретінде екі коллектор пластиналарында қосылған секция (орам) есептеледі. Секцияның ойықты бөлшегінің арасы полюс бөлігі τ–ға тең немесе одан азғана айырмасы бар

$$\tau=\pi D/2p, \qquad (2.1)$$

мұнда D_0 - якорь орамасының диаметрі, мм.



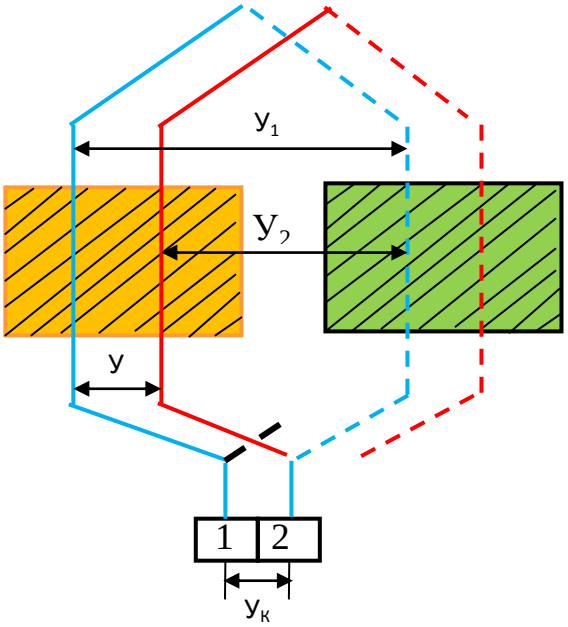
2.3 сурет - Элементарлық ойықтар

Якорьдің орамасы әдетте екі қабат орындалады. Олар мына параметрлермен міндеттеледі: *S*-секцияның саны; *Z*-ойықтардың саны; S_0=*S*/*Z*-бір ойыққа келетін секцияның саны; n_0=*N*/*Z*-бір ойықтағы ойық жақтардың саны. Бір секцияның жоғарғы ойық жағы басқа секцияның төменгі ойық жағы элементарлық ойықты құрады. Нақты ойықтағы элементарлық ойықтардың саны ойыққа келетін секциялардың санына белгіленеді (2.3 сурет).

Якорь орамасының схемасынан жайылу жасайды және секцияларды бір орамды қылып көрсетеді. Бұл жағдайда екі ойық жағы бар, әрбір бір секцияға элементарлық ойық сәйкес. Секцияның аяғын коллекторлық пластинаға қосады: әрбір пластинаға секцияның басын және басқа секцияның аяғын қосады, яғни әрбір секцияға бір коллекторлық пластина келеді. Сонымен, якорь орамасына әділді $S = Z_Э = K$, мұнда $Z_Э$- элементарлық ойықтардың саны; *K*- коллекторлық пластиналардың саны.

Тұрақты токтың машинасыларында келесі якорь орамаларының түрлері қолданады: жай тұзақты, құранды тұзақты, жай толқынды, құранды толқынды және түйдектескен.

2.3.1 Якорьдің жай тұзақты орамасы.



2.4 сурет - Тұзақты ораманың қадамдары

Жай тұзақты орамада әрбір секция қатар жатқан екі коллекторлық пластиналарға қосылады. Оқтамаға секцияларды төсегенде әрбір келесі секцияның басы алданғы секцияның аяғымен қосылады: якорьді айналып шыққанда ораманың барлық секциялары төсіліп шығады. Ақырында, ақырғы секцияның аяғы бірінші секцияның басымен қосылады, яғни якорь орамасы құлыптанады. Ораманың қаламы – якорь үстімен секциялардың ойықты жақтарының аралығы: бірінші жарым-жарты қадам Y_1; екінші жарым-жарты қадам Y_2 және нәтижелі қадам *Y* (2.5 сурет).

Нәтижелі қадамның ойық санымен

мәні

$$Y=Y_1-Y_2 \qquad (2.2)$$

Бір секцияның басымен алғы қосылған екі коллекторлық пластиналардың аралығы коллектор бойынша қадам Y_K деп белгіленеді. Якорь бойынша қадамдарды элементарлық ойық арқылы білдіріледі, ал коллектор бөлшектері (пластиналар) арқылы білдіріледі.

Жай тұзақты орамаларда әрбір секцияның басымен алғы қатарлы жатқан коллекторлық пластиналарға қосылады, сондықтан $Y=Y_K=1$.

Бірінші жарым - жарты қадамның мәні

$$Y_1=Z_Э/2p\pm\varepsilon, \qquad (2.3)$$

мұнда ε-бірден аз кейбір мөлшер, оны алып не қосу арқылы қадам Y_1-дін толу саны мәнін табады.

Екінші жарым -жарты қадамның мәні

$$Y_2=Y_1-Y=Y_1-1. \qquad (2.4)$$

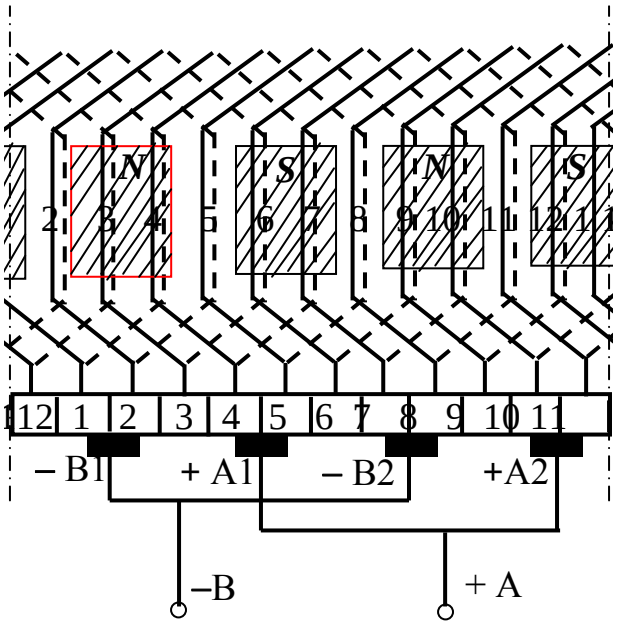
Мысалы.

Төртполюсті *(2p=4)* тұрақты токтың машинасының жай тұзақты якорь орамасының қадамдары есептеу және жайылу схемасын орындау. Секцияның саны *S=4*.

Бірінші жарым- жарты қадамның мәні: $Y_1=Z_Э/2p\pm\varepsilon=12/4=3$ ойық.

Екінші жарты-жарым қадамның мәні: $Y_2=Y_1-Y=Y_1-1=3-1=2$ ойық.

Ораманың схемасын орындаудың алдында барлық ойықтармен секцияларды белгілеу керек, магнит полюстердін контурларын түсіру және олардың қарама-қарсылықтары көрсетілу керек.



2.5 сурет – Жай тұзақты ораманың жайылу схемасы

Орама бір біріне параллельді қосылған параллельді тарамдар деп аталатын бірнеше тармақтан құрылады. Әрбір параллель тарап тізбектеп қосылған секцияларды ішіне кіргізеді. Якорь орамасының *ЭҚК*-і бір параллель тарамдының *ЭҚК*-інің мәнісіне тең, ал ораманың тогы барлық тарамдардың қосынды мәнісімен белгілінеді:

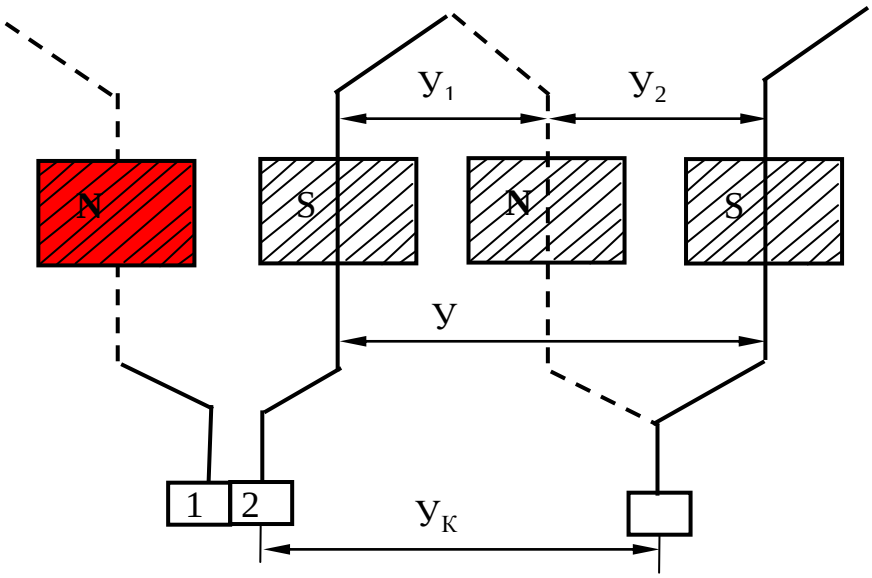
$$I_a=2ai_a. \qquad (2.5)$$

Мұнда *2a*-якорь орамасының параллель тарамдардың саны;

i_a- бір параллель тарамның тоғы.

Жай тұзақты ораманың параллель тарамдардың саны машинаның негізгі полюстер санына тең, яғни $2a=2p$.

2.3.2 Якорьдің жай толқынды орамасы



2.5 сурет - Толқынды ораманың қадамдары

Жай толқынды ораманы әртүрлі жұп полюстердің астында жатқан тізбектеп қосылған секциялардан құрады.

Жай толқынды ораманы секцияларының аяқтары бір бірінен коллектор бойынша бір қадам аралығы $Y_K= Y$ бар коллекторлық пластиналарға қосылады.

Якорьді айналып шыққанда машинаның жұп полюстер санына тең секциялар жатқызылады: ең соңғы секцияның аяғы бастапқы тұрған пластинаның қасында тұрған пластинаға қосылады.

Коллектор бойынша жай толқынды ораманың қадамы:

$$Y_K =Y=(K-1)/p. \qquad (2.6)$$

Бірінші жарым - жарты қадамды (2.3) арқылы табады, ал екінші жарты-жарым қадамы $Y_2 = Y = Y_1$ - ге тең.

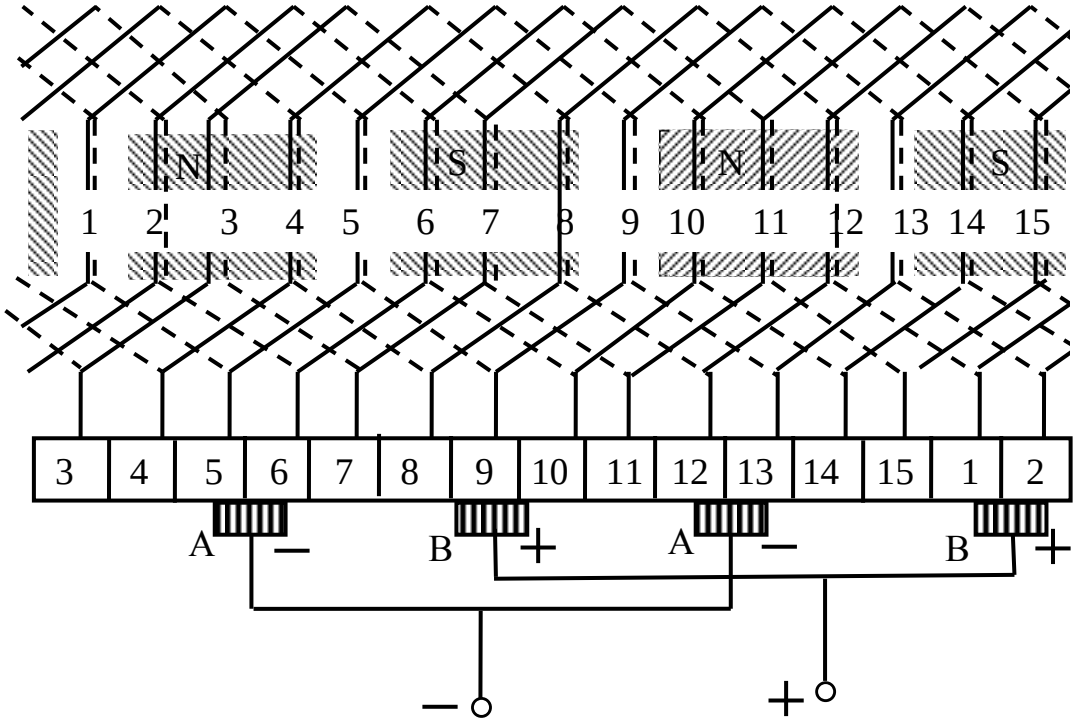
Мысалы.

Төрт полюсті *(2p=4)* тұрақты токтың машинасының жай толқынды якорь орамасының қадамдарың есептеу және жайылу схемасын орындау. Секцияның саны *S=13.*

Бірінші жарым- жарты қадамның мәні: $Y_1 = Z_Э/2p \pm \varepsilon = 13/4 + 1/4 = 3$ ойық.

Нәтижелі қадамның мәні: $Y_K = Y = (K-1)/p = (13-1)/2 = 6$ ойық.

Екінші жарты-жарым қадамның мәні: $Y_2 = Y - Y_1 = 6-3 = 3$ ойық. Якорьді бірінші рет айналып шыққанда 1 және 7 секцияларды жатқызамыз (2.6). екінші рет аійналып шыққанда 13 және 6 секцияларды жатқызамыз т.б. барлық 13 секцияны жатқызғанша және ораманы бекіткенше содан кейін щеткалардың қарама-қарсылығын анықтаймыз. Ораманың электр схемасынан орама екі параллель тарамнаң құрылатыны көрініп тұр, яғни 2а=2. Жай толқынды орамалардың тарамдар саны полюстер санына тәуелді емес және әрқашан екіге тең.



2.6 сурет – Жай толқынды ораманың жайылу схемасы

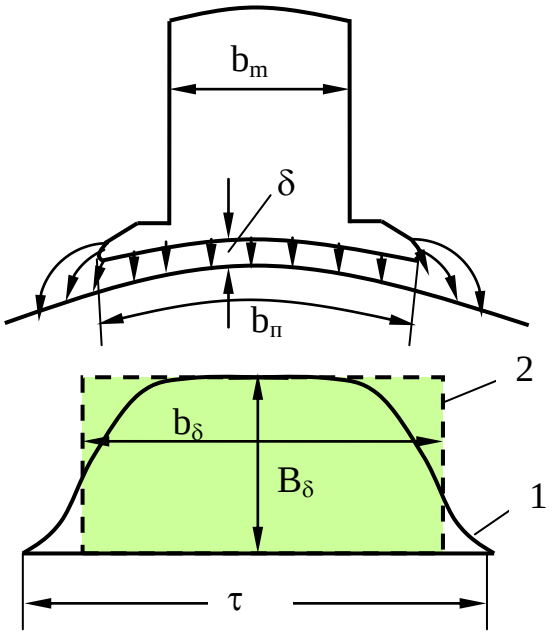
2.4 Тұрақты токтың машинасының электр қозғаушы күші және электр магнит моменті

Тұрақты токтың машиналарында әдетте полюс астындағы ауа санылаунда магниттік индукция *АВСД* трапециялық қисық түрде тарайды. Егер де *АВСД* көлемді тең шамалы тік бұрыш *АЕҒД*-мен алмастырсақ, онда

полюс астындағы индукцияның орта мәні $B_Ф$-ға тең. Бұл жағдайда электр магниттік индукция заңы бойынша бір өткізгіште индукцияланатын *ЭҚК*-тің орташа мәні тең:

$$e_{OP}=B_{OP}\, l_a\, v, \qquad (2.7)$$

мұнда l_a-якорьдің жалпы ұзындығы, м;
v – якорьдің айналу жылдамдығы, м/с.



2.7 сурет – Ауа саңылауының магниттік индукцияның таралуы

Егерде ораманы құрайтын өткізгіштердің саны N-ға тең, ал параллель тармақтар саны $2a$ боса, онда әрбір тармақта $N/2a$ бірімен бірі тізбектілеп қосылған өткізгіштер болады.

Бір тарамдының, яғни электр машинаның *ЭҚК* – і тең:

$$E_a= e_{OP}(N/2a)\alpha_i= B_{OP}\, l_a\, v(N/2a)\alpha_i, \qquad (2.8)$$

мұнда $\alpha_i=в/\tau$- полюстің асыру коэффициенті.

Егерде D_a-якорьдің диаметрі, ал n-машинаның айралу жиілігі (ай/мин) болса, онда

$$v= D_a\, n/60=2p\, n\, \tau/60=(2p\, n\, /60)\tau.$$

Енді $E_a=(2p\, n\, /60)\tau\, B_{OP}\, l_a\, (N/2a)\alpha_i$ болады.

Пайдалы ағын $Ф=B_{OP}\tau l_a\alpha_i$ болғандықтан, ақырғы түрде:

$$E_a = \frac{pn}{60}\frac{N}{a}Ф = C_e Фn, \qquad (2.9)$$

мұнда $C_e=2p\, n\, /60\tau$- тан осы машинаның тұрақты шамасы.

Электр магниттік момент.

Якорь орамасынан ток аққан кезде әрбір өткізгішке электрмагниттік күш әрекет етеді:

$$F_{ЭМ} = B_{\delta} l_{\delta} i_a. \qquad (2.10)$$

Ауа саңылауында электрмагниттік күш бір уақытта ойықтарда N өткізгіштерге әрекет етеді. Сондықтан, тұрақты токтын машинасының электрмагниттік моменті:

$$M = F_{ЭМ} N(D_a/2) = B_{OP}\, l_a\, (I_a/2a)(N/2a)\alpha_i.$$

Пайдалы ағының мәнін қойғаннан кейін, және $D_a = 2p\tau/\pi$-ге екенін еске алсақ, онда ақырғы түрде:

$$M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_M \Phi I_a\ , \qquad (2.11)$$

мұнда C_M- тан осы машинаның тұрақты шамасы.

Машина қозғалтқыш ережеде жұмыс істеген кезде электрмагниттік момент айналғыш, ал генератор ережеде тежеуіш (жетек қозғалтқыш айналдыру моментіне кері).

Егерде (2.10)-ге пайдалы ағынның мәнін (2.11)-ді қойсақ, онда моменттін тағы бір түрін табамыз.

$$M = \left(\frac{60}{2\pi n}\right) E_a I_a = 9{,}55 \frac{P_{ЭМ}}{n},$$

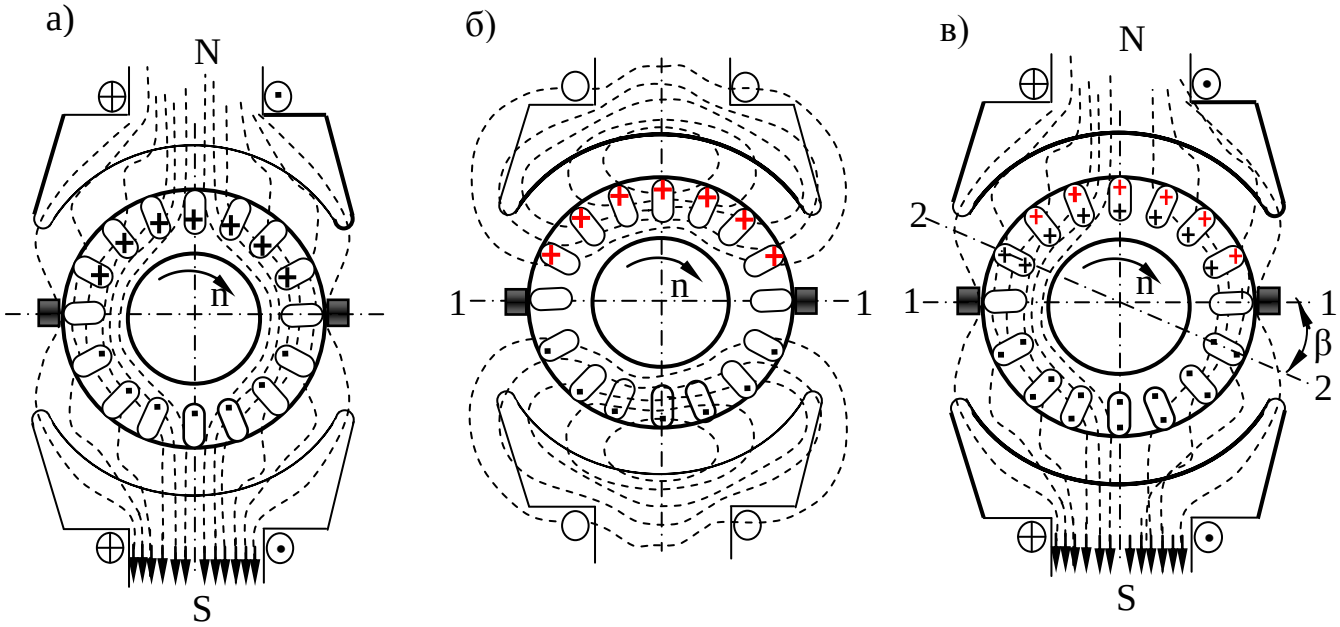
мұнда $P_M = E_a I_a$- тұрақты токтың машинаның электрмагниттік қуаты.

2.5 Тұрақты ток машинасының якорь реакциясы

Якорь реакциясы туралы түсінік.

Машина бос жүріс режимінде жұмыс істеген кезде машинада қоздырушы ораманың МҚК тудыратын тек қана негізгі магнит ағыны Φ 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. 2.8, *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 2.8, *а* суретте крестермен және нүктелермен көрсетілгендей болады, бірақ якорь орамасында ток жоқ, себебі тізбек ажыратулы. Мұнда және одан кейін ЭҚК бағыты өткізгіштердің соңғы

қабатында көрсетіледі, ал токтікі – жоғарыда. 2.8, б суретте якорьдегі магнит өрісінің таралуы көрсетілген.



а) индуктордың магниттік өрісі; б) якорьдің магниттік өрісі; в) қорытқы өріс.
2.8 сурет– Тұрақты тоқ генераторының магниттік өрістері

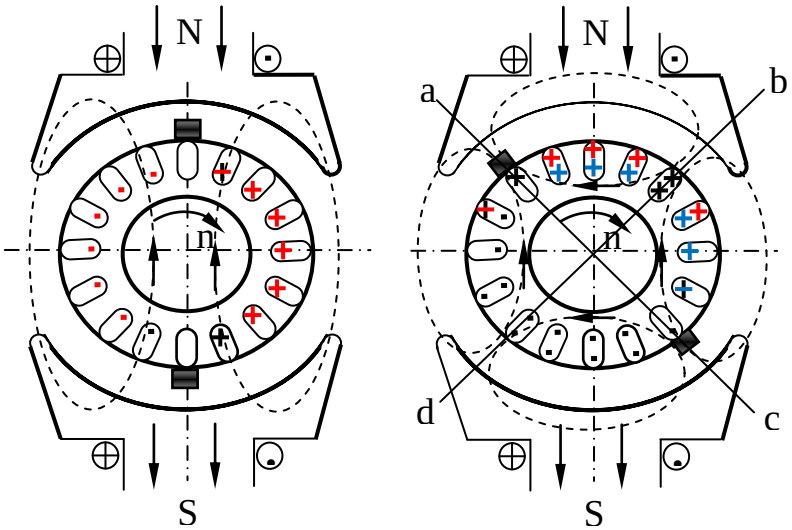
2.5.1 Якордің көлденең әсер ететін магнит қозғаушы күші

Машина қоздырылмаған, ал якорь қозғалмайды: $I_B=0$ және $n=0$. *Щеткаларды геометриялық бейтарап сызығының бойымен орналастырамыз qq* (2.8, б сурет) және оларға басқа бір тұрақты ток көзінен, ораманың тармақтарындағы токтардың бағыты, 2.8, *а* суретте көрсетілген *ЭҚК* бағытымен сәйкес келетіндей ток береміз. Бұл жағдайда якорь өрісінің магниттік сызықтары (олардың бағытын якорь орамасының өткізгіштіктеріндегі токтың бағытын басшылыққа ала отырып бұранда заңы бойынша анықтаймыз) 90° бұрышпен бағытталған, яғни негізгі полюстердің өстік сызықтарына *dd* көлденең. Якорьдің мұндай өрісін *көлденең* деп атайды, және ол якорьдің көлденең *МҚК* $F_{Яq}$ анықталады.

Машина жүктелген кезде қорытқы магнит өрісі болады (2.8, в сурет), ол енді полюстер өсіне қатысты симметриялы болмайды. Магнит өрісінің пішінінің өзгеру себебі, якорьдің көлденең өрісінің магниттік сызықтарының бағыты және полюстер өрісінің бағыты полюстің келе жатқан шетінің астында бір-біріне сәйкес келеді, осыдан қорытқы өріс полюстің келе жатқан шетінің астында күшейеді, ал полюстің өтіп бара жатқан шетінің астында бұл өрістер қарсы бағытта болады, сондықтан қорытқы өріс азаяды. Магнит өрісінің таралуының бұрмалану салдары физикалық бейтараптың айналу бағыты бойынша β бұрышқа ығысуы болады, оның шамасы машинаның жүктемесіне байланысты болады. Физикалық бейтарап деп центр арқылы және якорь шеңберіндегі магнит өрісінің нөлге тең болатын нүктесі арқылы өтетін түзу сызықты айтады, яғни қорытқы магнит өрісінің өсіне перпендикуляр болатын

түзу сызық (2 – 2 қисық). Щетканың жұмысы қанағаттанарлық болу үшін (ұшқынсыз) қосымша полюсі жоқ машиналарда щеткаларды геометриялық бейтараптан β бұрыштан аздап үлкен болатын , α бұрышқа сол бағытта ығыстыруға тура келеді.

2.5.2 Бойлық және аралас якорь реакциясы.



а) индуктордың магнит өрісі; б) якорьдің магнит өрісі

2.9 сурет – Тұрақты ток генераторының магнит өрісі

Щетка бейтараптан $\pm 90°$ бұрышқа ығысқан кезде якорь өрісінің өсі полюстер өсінің *dd* бойымен абсцисса өсінен жоғары немесе төмен орналасады (13.4, *б* сурет). 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, екі еселенген бұрыштың 2π ішінде орналасқаны және ораманың бір бөлігінен жасалғаны якорьдің бойлық МҚК $F_{Яd}=2Ab_C$ тудырады, ал басқасы, доға бойымен ораманың қалған бөлігімен жасалғаны $\tau–2b_C$, якорьдің көлденең МҚК $F_{Яq}=A(\tau–2b_C)$ тудырады.

2.6 Тұрақты ток машинасының коммутациясы

Якорь мен коллектор айналған кезде орама секциясы бір бағыттағы тогы бар параллель тармақтан басқа бағыттағы тогы бар параллель тармаққа үздіксіз ауыстырылып отырады. Бұл кезде ауыстырылатын секцияның тогы да өзінің таңбасын қарсы таңбаға өзгертеді, ал секция ауыстырылған уақытта коллекторлық табақтар мен щеткалар арқылы қысқаша тұйықталады, олар арқылы ток якорьден сыртқы тізбекке немесе сыртқы тізбектен якорьге беріледі.

Секциядағы токтың олардың якорь орамасының бір параллель тармағынан басқасына ауыстырылған кездегі өзгеруінің өтпелі үрдісі коммутация деп аталады.

Щеткалық түйіспедегі құбылыс, яғни коллектор щеткалары мен пластиналары арасындағы, коммутацияға және машинаның дұрыс жұмыс істеуіне үлкен әсерін тигізеді.

Коммутация периоды, яғни секция щеткамен қысқаша тұйықтаулы тұрған кездегі уақыт:

$$T_к = \frac{в_щ}{\upsilon_к},$$

мұнда $в_щ$ – щетканың ені;

$\upsilon_к$ – коллектордың айналу жылдамдығы.

Щеткалық түйіспе арқылы жұмыстық ток пен секцияның қысқаша тұйықтау тогы өтеді. Щеткалардың коллекторға идеалды жанасуы мүмкін емес және жанасу нүктелік болады. Жанасу нүктелеріндегі токтың тығыздығы 100 - 1000 а/мм^2 дейін жетеді. Щеткалар күйеді, щеткалық түйіспеде шаң-тозаң пайда болады және тозаңдар арқылы да ток жүреді, олар да үзіліссіз жанады. Сондықтан тозаңтектес түйіспе тұрақсыз болады және оған тағы да жаңа тозаңдар қосылады. Қызу өскен кезде электрондық эмиссия пайда болады. Иондар құралады және түйіспе іске асырылады. Сонымен, щеткалық түйіспенің келесідей түрлері болады:

- механикалы, тікелей;
- тозаң тектес;
- ионды өткізгіштік. Коммутация сапасын ұшқындар бойынша бағалайды.

Коллектордың ұшқындау себептері.

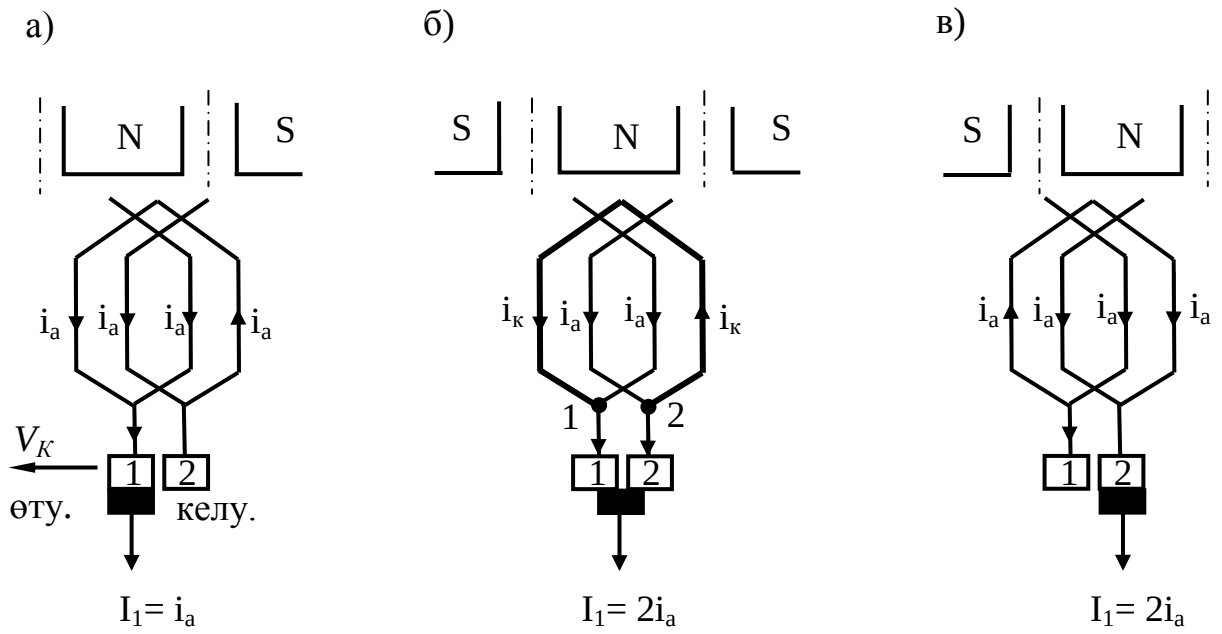
Механикалықтар: дірілден, коллектор бетінің тегіс болмауынан, коллектордың сынуынан, эллипс пішіндіктен, коллектор бетінің щеткамен байланысының бұзылуынан (коллектордың кейбір бөліктерінің, слюда бөлшектерінің шығып тұруы), щеткалар дірілінен пайда болады.

Электромагниттіктер коммутацияланатын секциялардағы электромагниттік үрдістердің өту сипатымен байланысты болады.

Потенциялды ұшқындау – дара кллектор пластиналарының арасындағы потенциалдар айырымынан пайда болатын, дара коллекторлық пластиналар арасындағы ұшқындардан болады. Оның өзгешелігі, ол щетканың астында емес ал кез-келген басқа жерде пайда болуы. Ең үлкен ЭҚК, көлденең якорь реакциясынан немесе оқшауландырушы төсемдердің ластануынан магнит өрісі қай жерде көп бұрмаланса сол жерде пайда болады.

Жою: коллекторды тазалау, үлкен потенциалдар айырымын болдырмау $U_{кп\max} \le 30-50В$. Егер ұшқындау қарқынды болса, онда ол коллекторда дөңгелек от пайда болуына әкелуі мүмкін, яғни дұрысы щеткалық болттар арасындағы қысқаша тұйықталу, бұл машинаны істен шығарады.

Коммутация үрдісі.



а) коммутацияның басталуы t=0; б) коммутацияның ортасы t= $T_к/2$;
в) коммутацияның соңы t= $T_к$.
2.10 - сурет - Коммутация үрдісі

Коммутация периоды, яғни секция щеткамен қысқаша тұйықталған және коммутацияланған кездегі уақыты:

$$T_к = \frac{b_щ}{\nu_к},$$

мұнда $b_щ = b_к + \delta_{из}$ – щетканың ені;
$b_к$ – коллекторлық пластинаның ені;
ν_K – коллектордың айналу жылдамдығы.

Коммутация теңдеуі.
Жорамал: $b_щ = b_к$.
1) 1 және 2 түйіндік нүктелер үшін Кирхгофтың бірінші заңы бойынша екі теңдеу жазамыз:

$$i_1 = i_к + i_a;$$
$$i_2 = i_a - i_k,$$

мұнда i_1, i_2 – жалғайтын сымдар мен коллекторлық пластиналар арқылы 1 және 2 щеткіге жүретін токтар;
$i_к$ – коммутацияланатын секцияның тогы;
i_a – якрьдің параллель тармақтарындағы ток.

2) Коммутацияланатын секция үшін Кирхгофтың екінші заңы бойынша теңдеу құрамыз:

$$\sum e = i_1 r_1 + i_1 r_{щ1} - i_2 r_{щ2} - i_2 r_2 + i_к r_c \ ,$$

мұнда r_1, r_2 − жалғайтын сымдардың кедергісі;

r_c − секцияның кедергісі;

$r_{щ1}, r_{щ2}$ – коллекторлық пластиналардың 1 мен 2 және щетканың арасындағы щеткалық кедергі.

r_c және r_1, r_2 кедергілер $r_{щ1}, r_{щ2}$, кедергілерден айтарлықтай аз болады сондықтан $r_c \approx r_1 \approx r_2 = 0$ деп алуға болады, онда

$$\sum e = i_1 r_{щ1} - i_2 r_{щ2}.$$

$i_{1,} i_2$ токтардың мәндерін қойып, аламыз:

$$i_k = \frac{r_{щ2} - r_{щ1}}{r_{щ2} + r_{щ1}} \ i_a + \frac{\sum e}{r_{щ1} + r_{щ2}}.$$

Бұл өрнектің бірінші мүшесі коммутацияның негізгі тогын көрсетеді, ал өрнектің екінші мүшесі коммутацияның қосымша тогы деп аталатын токты көрсетеді.

Кедергімен коммутациялау, түзу сызықты коммутация.

Алдымен $\sum e = 0$ болған кездегі жағдайды қарастырамыз. Бұл кезде секцияда тек қана негізгі ток болады. Секциядағы токтың i_k өзгеруі тек қана $r_{щ1}$ *және* $r_{щ2}$ кедергілердің өзгеруімен анықталады, осының салдарынан бұл жағдай кедергімен коммутациялау деп аталады. Ток төмендегідей анықталады:

$$i_k = \frac{r_{щ2} - r_{щ1}}{r_{щ2} + r_{щ1}} i_a.$$

Коммутацияның классикалық теориясында $r_{щ1}$ *және* $r_{щ2}$, 1 және 2 пластиналардың щеткамен түйісетін ауданына S_1 *және* S_2 кері пропорционал деп алынады. Бұл кезде i_1 *және* i_2 токтар осы аудандарда біркелкі таралады деп жорамалдайды.

Коммутацияның басталуы *t=0*, ал соңы $t = T_k$ уақытқа сәйкес келеді делік, онда $b_щ = b_к$ болған кезде:

$$S_1 = \frac{T_k - t}{T_k} S; \quad S_2 == \frac{t}{T_k} S,$$

мұнда S – коллекторлық пластинаның щеткамен, 2.10 суретте көрсетілген қалыптағы толық түйісетін ауданы.

Онда

$$r_{щ_1} = \frac{S}{S_1} r_щ = \frac{T_к}{T_к - t} r_щ;$$

$$r_{щ_2} = \frac{S}{S_2} r_щ = \frac{T_к}{t} r_щ.$$

мұнда $r_щ - = 0$, және $t = T_k$ болған кездегі, шектік жағдайдағы щетка мен пластинаның арасындағы өтпелі кедергі.

Мұнда $r_{щ1}$ *и* $r_{щ2}$ мәндерін қойып келесі өрнекті аламыз:

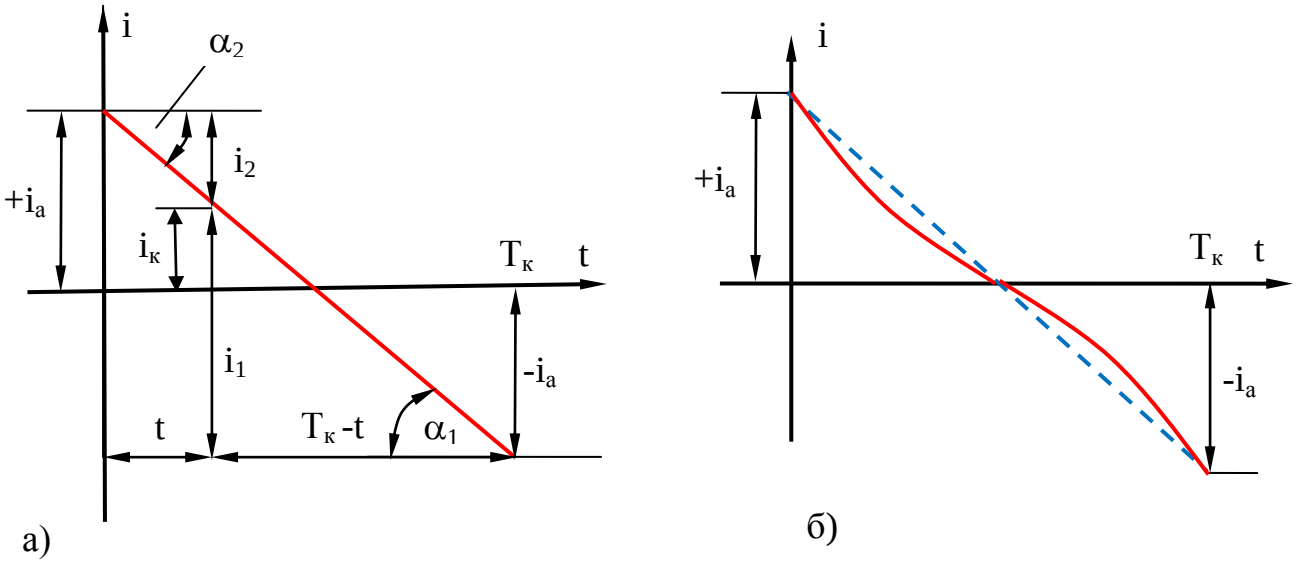
$$i_k = (1 - \frac{2t}{T_k}) i_a.$$

Бұл тәуелділік сызықты және сондықтан мұндай коммутацияны *түзу сызықты* деп атайды.

Коммутацияның бұл жағдайы үшін щетканың астындағы токтың таралу тығыздығын анықтаймыз. Щетканың астындағы токтың тығыздығы келе жатқан және өтіп бара жатқан шеттерінде тең болады:

$$J_{щ_1} = \frac{i_1}{S_1} = \frac{T_к}{S} \cdot \frac{i_1}{T_к - t};$$

$$J_{щ_2} = \frac{i_2}{S_2} = \frac{T_к}{S} \cdot \frac{i_2}{t}.$$



а) түзу сызықты; б) қисық сызықты кедергінің коммутациясы.

2.11 сурет

Бұл суреттен

$$\frac{i_1}{T_k - t} \sim tg\alpha_1; \qquad \frac{i_2}{t} \sim tg\alpha_2$$

ендеше

$$r_{щ_1} \sim \frac{T_к}{t} tg\alpha_1; \quad r_{щ_2} \sim \frac{T_к}{S} tg\alpha_2.$$

Әлбетте, түзу сызықты коммутация кезінде $\alpha_1 = \alpha_2 = const$. Сондықтан коммутацияның бүкіл периоды ішінде кедергілер де $r_{щ_1} = r_{щ_2} = const$.

Сонымен, түзу сызықты коммутация кезінде барлық щеткалардың астындағы токтың тығыздығы бүкіл коммутация уақыты ішінде өзгермейді, щеткалар коллекторда емес, ал тұтас айналып тұрған түйіспелік сақинада тұрғандай. Сондықтан коммутацияның мұндай жағдайы теориялық тұрғыдан идеалды болады.

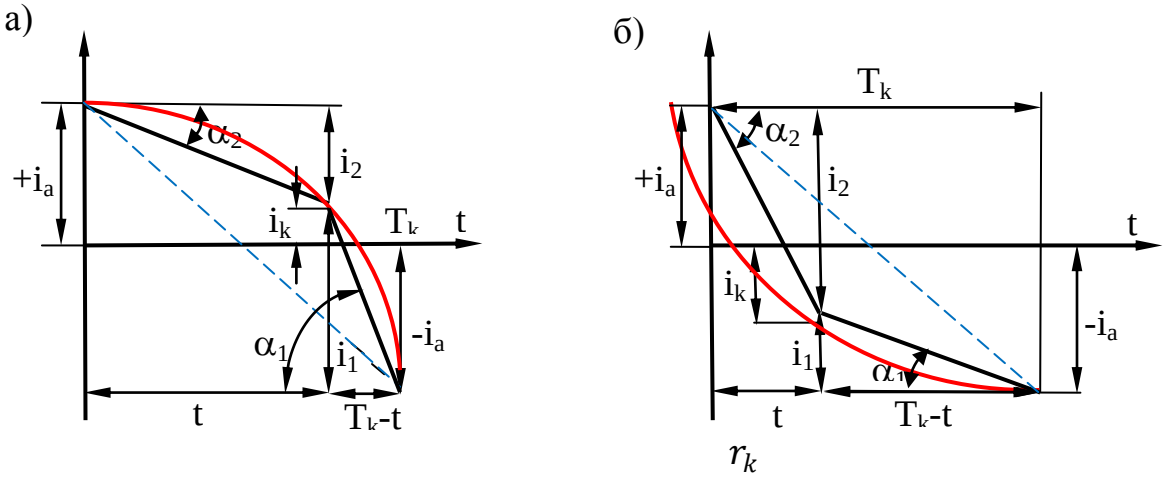
Егер $r_c \neq 0$, $r_1 \neq 0$ және $r_2 \neq 0$ болса онда $\sum e = 0$ болған кезде i_k 2.11 суретте көрсетілгендей өзгеретінін анықтауға болады. Демек, жалпы жағдайда кедергі коммутациясы түзу сызықты болмайды. Бірақ қарапайым жағдайда қисықтың түзу сызықтан ауытқуы аз және оны ескермеуге болады.

Баяулатылған және тездетілген коммутация.

Жалпы жағдайда $\sum e \neq 0$ кезде негізгі токқа теңдіктің екінші мүшесімен анықталатын қосымша ток қосылады:

$$i_{k_Д} = \frac{\sum e}{r_{щ_1} + r_{щ_2}}; \quad r_c \text{ және } r_n \text{ ескеріп } i_{k_Д} = \frac{\sum e}{r_c + 2r_n + r_{щ1} + r_{щ2}},$$

мұнда $r_c + 2r_n + r_{щ1} + r_{щ2} = r_к -$ коммутацияланатын секцияның кедергісі.



а) баяулатылған; б) тездетілген.

2.12 сурет - Коммутация түрлері

$\sum e > 0$ болғанда i_{k_n} тогы негізгі коммутация тогымен қосылады, оны сызықтық деп алуға болады. Бұл кезде *баяулатылған коммутация* деп аталатын жағдай болады (2.12 сурет), яғни коммутацияның басында i_k тогының өзгеруі жай өтеді және соңында тездетеді.

Щетканың өтіп бара жатқан шетіндегі токтың шамасы бұл жағдайда коммутацияның соңына дейін үлкен болады, соның салдарынан токтың тығыздығы щетканың $r_{щ_1}$ жағындағы шетінде коммутацияның соңында үлкейеді. Қысқаша тұйықталған секцияның щетканың өтіп бара жатқан шетімен ажырауы бұл кезде активті r және индуктивті L кедергілері бар ток тізбегінің шаппа қосқыштың көмегімен қосылуына немесе ажыратылуына ұқсас болады.

Сондықтан баяулатылған коммутация кезінде өтіп бара жатқан щетканың асты ұшқындау үшін жайлы жағдай пайда болады.

Бұған тағы, щетканың шет жақтарының орнықсыз болу жағдайы да көмектеседі (щеткаұстағыштың және щетканың арасында саңылау болуынан соңғысы тербеледі, және щетканың шеттері көп желінеді және т.б.).

$\sum e < 0$ болғанда ток i_{k_l} теріс таңбалы болады және токтардың өзгеру сипаты 2.12 суретке сәйкес келеді. Бұл жағдайда $i_к$, i_1 және i_2 токтар коммутацияның басында тез өзгереді, және коммутация *тездетілген* деп аталады. Онда щетканың келе жатқан жағындағы ток i_2 және токтың тығыздығы $j_{щ2}$ енді коммутацияның басында болады. Щетканың бұл шеті шаппа қосқышқа ұқсас қысқаша тұйықталған секция тізбегін тұйықтайды. Бұл кезде щетканың келе жатқан шетінде ұшқындауға аздаған беталыс болады, бірақ әдетте күшті ұшқындау байқалмайды. Коммутация үрдісінің соңында i_1 және $r_{щ_1}$ щетканың өтіп бара жатқан шетінде аз болуы немесе тіпті іс жүзінде нөлге де тең болуы мүмкін. Сондықтан щетканың өтіп бара жатқан шетінде қысқаша тұйықталған секция тізбегінің ажырауы, мұндай тездетілген коммутация кезінде тогы аз болатын тізбекті шаппа қосқышпен ажыратқанға ұқсас өте жайлы жағдайда өтеді.

Яғни баяулатылған коммутация жайсыз және қажетсіз болады. Керісінше, аздап жылдамдатылған коммутация жайлы және іс жүзінде дәл осындай коммутацияға жетуге ұмтылады.

2.6.1 Коммутацияаланатын секциядағы электр қозғаушы күштер.

Өзіндік индукция ЭҚК.

Коммутация периоды өте аз – микросекундтармен өлшенеді, сондықтан индуктивтілігі L_C бар, коммутацияланатын секцияларда токтың мұндай тез өзгеруі кезінде, *өзіндік ЭҚК* индукцияланады:

$$e_L = -L_C \frac{di}{dt}.$$

Коммутация периоды ішінде ток $+i$ мәннен $-i_a$ мәнге дейін өзгеретіндіктен, $\frac{di}{dt} < 0$ және $e_L > 0$. Демек өзіндік ЭҚК коммутацияны баяулатуға ұмтылады.

Өзара индукция ЭҚК.

Әдетте щетканың ені коллекторлық пластинаның енінен үлкен, сондықтан машинада бір уақытта магниттік байланыста болатын бірнеше

секция өзара коммутацияланады. Бұл, оларда *өзара индукция ЭҚК* индукциялануына әкеледі

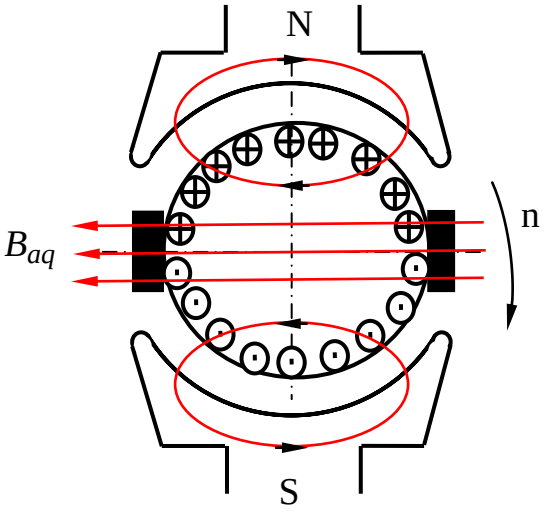
$$e_M = -\sum_n \frac{di}{dt} M_n,$$

мұнда M_n - коммутацияланатын секциялардың өзара индуктивтілігі. Әдетте бұл ЭҚК ортақ *реактивті ЭҚК* біріктіреді

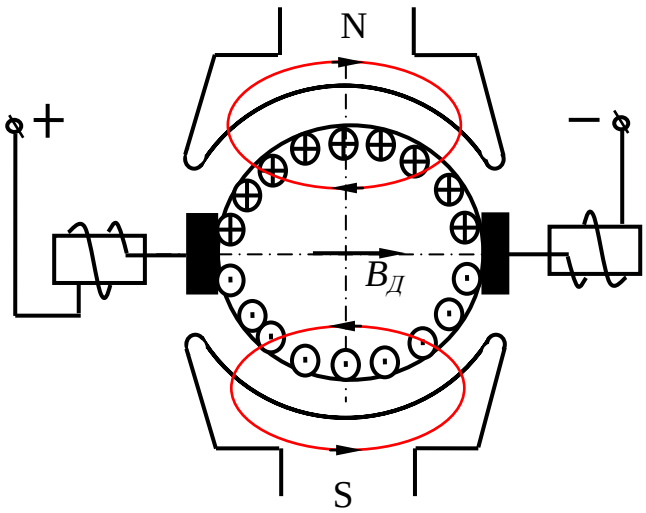
$$e_{r=}e_L + e_M.$$

Көлденең якорь реакциясы өрісінен пайда болатын ЭҚК.

2.13 суретте көлденең якорь реакциясының қозғалмайтын өрісі B_{aq} көрсетілген, ол щеткалардың астында орналасқан өткізгіштерде ЭҚК e_{aq} индукциялайды. Олардың бағыттары 2.13 суретте көрсетілген, одан ЭҚК e_{aq} бағыты коммутация басталғандағы секциядағы токтың бағытымен бағыттас болатыны көрсетілген. Яғни оң болады және коммутацияны баяулатуға ұмтылады.



2.13 сурет – Секциялар коммутацияланатын аймақтағы көлденең якорь реакциясы



2.14 сурет – Қосымша полюстердің орамаларын жалғау сұлбасы

Секциядағы ЭҚК e_{aq}:

$$e_{aq} = 2B_{aq} w_c l_\delta v_a,$$

мұнда B_{aq} – көлденең якорь реакциясы өрісінің индукциясы;
w_c – секциялардың түйіндер саны;
l_δ – сымның ұзындығы;
v_a – якорьдің шеңберлік жылдамдығы.

2.6.2 Коммутацияны жақсарту әдістері.

Коммутацияланатын секциядағы токты $i_к$ азайтуға келесідей әдістермен жетуге болады: коммутацияланатын секцияның кедергісін өсірумен $r_к$;

реактивті ЭҚК e_r азайтумен; қосымша полюстердің көмегімен коммутацияланатын ЭҚК құрумен немесе щеткаларды геометриялық бейтараптан ығыстырумен.

Коммутацияланатын секцияның кедергісін өсіру.

Жақсы коммутация көз қарасы бойынша меншікті кедергісі үлкен болатын щетка пайдаланған тиімді болады. Дегенмен ондай щеткалар щеткалық түйіспеде тығыздығы төмендетілген токты жібереді, ол коллектордың бетін оның ұзындығының есебінен үлкейтуді талап етеді.

Реактивті ЭҚК азайту.

Оны бірнеше тәсілдермен орындауға болады, мысалы, орамдар саны w_c көп болмайтын якорь орамасының секцияларын пайдаланып. Бірақ бұл әрқашан орындала бермейді, себебі жалпы өткізгіштер санын N өзгеріссіз сақтап қалу мақсатымен секциялар санын өсіруді талап етеді, демек коллекторлық пластиналар санын да.

Тым жіңішке щеткаларды пайдаланып, өзіндік индукция ЭҚК шамасын азайтуға болады. Бірақ өте жіңішке щеткаларды пайдалану орынсыз, себебі щеткалардың түйіспелік бетінің ауданын өзгеріссіз сақтап қалу үшін олардың ұзындығын өсіруге тура келген болар еді, демек, коллектордың ұзындығын да, бұл машиналардың габариттерін және оның құнын өсіруге әкелер еді. Әдетте щетканың енін екі-үш коллекторлық пластиналардың еніне тең етіп алады.

Қосымша полюстердің көмегімен коммутациялайтын ЭҚК құру.

Қосымша полюстер негізгі полюстердің арасына орналастырылады және индуктордың мойынтұрығына болттармен бекітіледі. Қосымша полюстердің МҚК көлденең якорь реакциясының МҚК қарсы бағытталуы керек. Себебі оны компенсациялап және реактивті ЭҚК e_r компенсациялау үшін одан да жоғары коммутациялағыш өріс $B_к$ құруы үшін қосымша полюстер қажет. Өйткені F_{aq} мен e_r де якорь тогына пропорционал болуы керек, онда оларды компенсациялау үшін сонымен қатар $F_{дп}$ және $B_к$ якорь тогына пропорционал болуы керек. Сондықтан қосымша полюстердің орамаларын якорь орамасымен тізбектеп жалғайды, қосымша полюстерді қанықпайтын магниттік жүйеден жасайды.

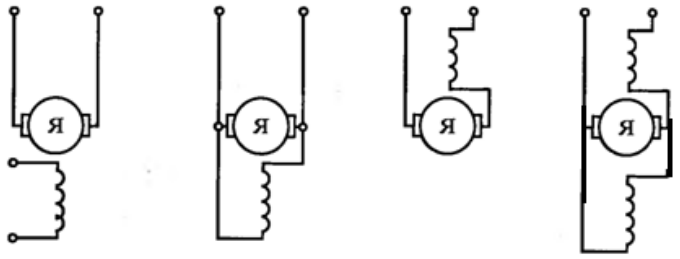
Щеткаларды геометриялық бейтараптан ығыстыру.

Қуаты бірнеше жүздеген Вт дейінгі машиналарға қосымша полюстер қоймайды. Коммутациялаушы өрісті щеткаларды бейтараптан β бұрышқа генераторларда якорьдің айналу бағыты бойынша және қозғалтқыш режимінде якорьдің айналуына қарсы бағытта ығыстыру жолымен құруға болады, осының нәтижесінде коммутация аймағында якорь реакциясының және e_r әрекетін компенсациялайтын негізгі полюстердің өрісі әрекет ете бастайды.

2.7 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.



2.15 сурет – Жалғау сұлбалары

Тұрақты ток генераторларының сипаттамалары.

Негізгі сипаттамалар:

- жүктемелік $U=f(I_Қ)$ 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;

- шықпалық $U=f(I_Я)$ бұл кезде $R_B=const$;

- реттемелік $I_B=f(I)$ бұл кезде $U=const$. Дербес жағдайда, $U=0$ болғанда, реттемелік сипаттама қысқаша тұйықтауға өтеді $I_K=f(I_Қ)$.

Тұрақты ток генераторының ЭҚК теңдеуі.

Генератор якорінің қысқаштарындағы кернеу ЭҚК E_a активті кедергіге түсетін $IR_Я$ кернеудің шамасынан аз болады:

$$U = E_a - IR_Я . \qquad (2.12)$$

2.7.1 Тәуелсіз қоздырылатын генераторлар

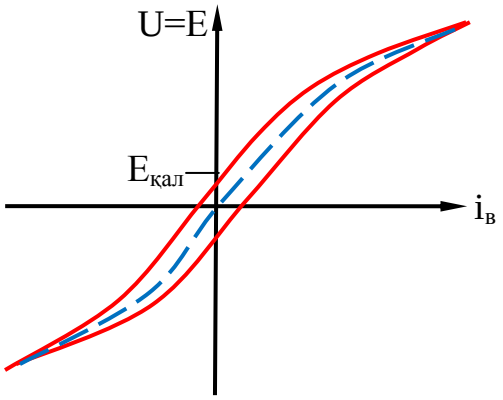
Тәуелсіз қоздырылатын генераторлар көп жерлерде пайдаланылады: төменгі (4 – 24 В) және жоғарғы кернеудің (600 В жоғары) генераторларында, кернеуді үлкен аралықта реттеу қажет болатын қуаты үлкен машиналарда (кемелердің рульдік электр жетектерінде, тұрақты токтың ескектік электрлік қондырғыларында басты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

2.7.1 Бос жүріс сипаттамасы.

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

Бос жүріс сипаттамасы $U=f(Ф)=f(I_B)$

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.

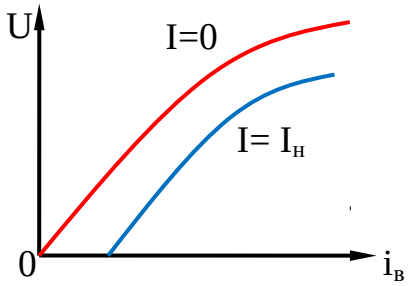


2.16 сурет – Тәуелсіз
қоздырылатын генератордың
бос жүріс сипаттамасы

2.7.2 Жүктемелік сипаттама**.**

$U=f(I_B)$ 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 (2.17 сурет).

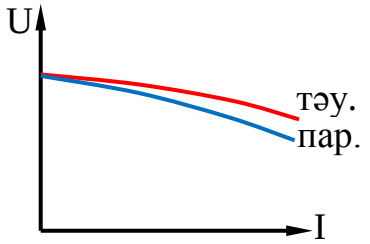


2.17 сурет – Генератордың жүктемелік сипаттамасы

2.7.3 Шықпалық сипаттама

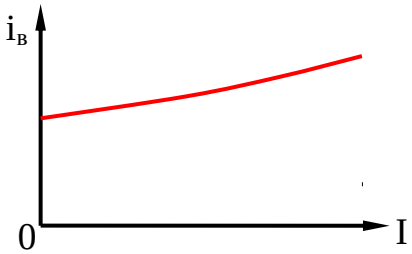
$U=f(I_a)$ бұл кезде $i_в=const$ және $n=const$.

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:



2.18 сурет – Тәуелсіз және параллель қоздырылатын генераторлардың шықпалық сипаттамалары

$$\Delta U = \frac{U - U_{НОМ}}{U_{НОМ}} = \frac{\Delta U_{НОМ}}{U_{НОМ}}.$$



2.19 сурет – Тәуелсіз қоздырылатын генератордың реттемелік сипаттамасы

2.7.4 Реттемелік сипаттама.

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

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

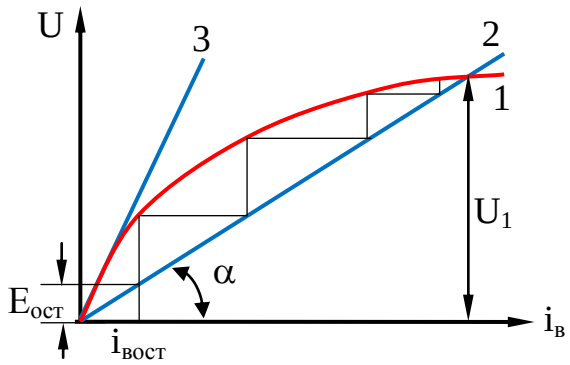
2.7.2 Параллель қоздырылатын генератор.

2.7.2.1 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:

$$i_к = \frac{E_{қал}}{R_к}.$$

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.

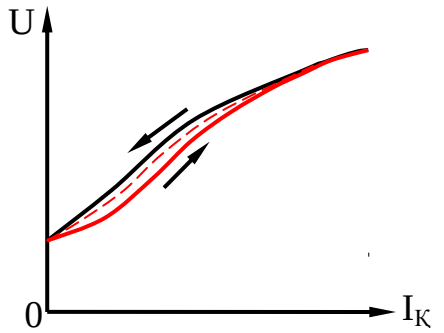


2.20 сурет – Параллель қоздырылатын генераторды өздік қоздыру

Әдетте өздігінен қоздырылу үрдісі бос жүріс кезінде және $R_Қ=const$ болғанда пайда болады. Онда $U_Қ=f(I_Қ)$ тәуелділігі бос жүріс қисығымен (2.20 суретте 1 қисық сызық) бейнеленеді, ал $I_Қ R_Қ=f(I_Қ)$ тәуелділігі 2 түзуімен анықталады, қисық 1 және ЭҚК түзуі 2 қиылысқан A_1 нүктеде өздігінен қоздырылу үрдісі тоқталады. $tg\alpha=U/I_Қ=R_Қ$, 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:

а) машинаның магнит жүйесінде қалдық магнитизм болуы керек;

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



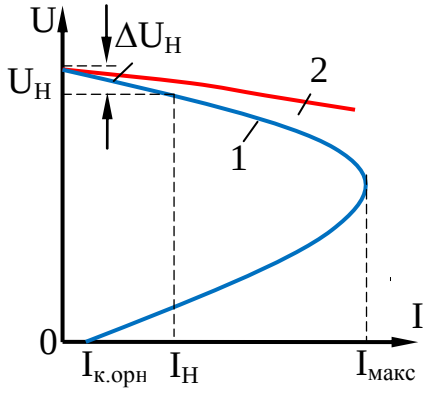
2.21 сурет – Параллель қоздырылатын генератордың бос жүріс сипаттамасы

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

2.7.2.2 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 (2.21 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.



2.22 сурет – Тәуелсіз қоздырылатын 1 және параллель қоздырылатын 2 генератордың шықпалық

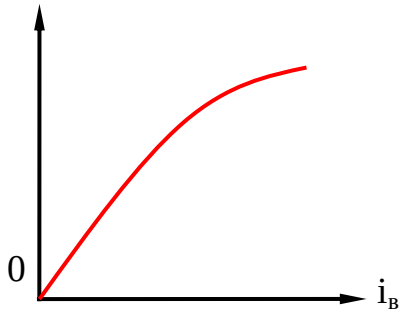
2.7.2.3 Шықпалық сипаттама *U=f(I)* бұл кезде R_B*=const* и *n=const*.

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 $I_Қ=U/R_Қ$ азайтады. Өз кезегінде, $I_Қ$ азаюы негізгі магнит ағынын әлсіретеді, демек, генератордың қысқаштарындағы ЭҚК мен кернеу де азаяды, сондықтан бұл сипаттама тәуелсіз қоздырылатын генератордың сипаттамасынан төменде болады.

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

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

2.7.3 Тізбектеп қоздырылатын генератор.



2.23 сурет – Тізбектей қоздырылатын генератордың шықпалық сипаттамасы

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 тұтынушылардың талабын қамтамасыз ете алмайды.

2.7.4 Аралас қоздырылатын генератор.

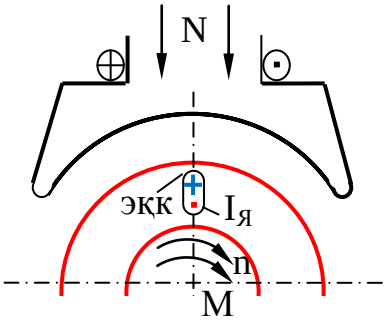
Аралас қоздырылатын генераторда параллель қоздырылатын және тізбектеп қоздырылатын орамалар да болатындықтан, ол өзіне екі типтегі генераторлардың да қасиеттерін біріктіреді. Қоздырушы ағынды негізінен параллель орама тудырады. Сипаттамалардың түрі негізінен олардың

қоздырушы орамаларының орамдар санының қатынасына және оларды жалғау тәсіліне байланысты болады.

2.8 Тұрақты ток қозғалтқышы

2.8.1 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.



2.24 сурет – Тұрақты тоқ қозғалтқышының әсер ету принципі

Қозғалтқышқа желіден тұрақты кернеу берілді деп ұйғарайық $U_{ж}=const$. 2.24 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:

$$I_a = \frac{U-E}{C_E n \Phi}. \qquad (2.13)$$

Жылдамдықтық сипаттама:

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

2.8.2 Тұрақты ток қозғалтқыштарының жіктелуі және сипаттамалары.

Генераторлар сияқты қоздырушы орамаларды және якорь орамаларын қосу тәсілдеріне байланысты тұрақты ток қозғалтқыштарының келесідей түрлері болады:

- параллель қоздырылатын;
- тізбектеп қоздырылатын;
- 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:

а) тікелей жүргізу;

б) жүргізуші реостаттың көмегімен жүргізу;

в) якорь тізбегіндегі кернеу төмендетілген кезде жүргізу:

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

- жүргізуші реостаттың көмегімен жүргізу, бұл кезде жүргізуші ток:

$$I_{жур} = \frac{U}{R_a + R_{жур}}, \qquad (2.14)$$

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 $Ф_\delta$ 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;

- 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.

2.8.3 Параллель қоздырылатын қозғалтқыштар.

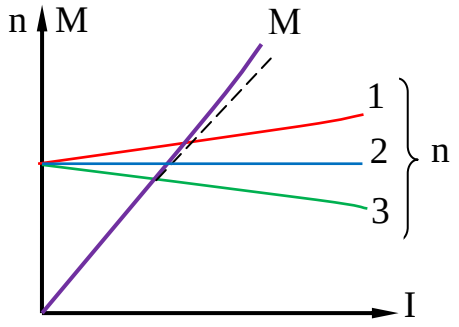
2.8.3.1 Табиғи жылдамдықтық және механикалық сипаттамалар.

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

Жылдамдықтық сипаттама.

Қозғалтқыштың айналу жиілігіне елеусіз екі себеп әсер етеді:

а) якорьде кернеудің түсуі $I_Я R_Я$;



2.25 сурет – Параллель қоздыру кезіндегі шынайы механикалық және жылдамдықты сипаттамалар

б) 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. 2.25 сурет сипаттама 1 – екінші себеп басым болған кезде; сипаттама 3 – бірінші себеп басым болған кезде; сипаттама 2 – екі себеп бір-бірін компенсациялаған кезде.

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.

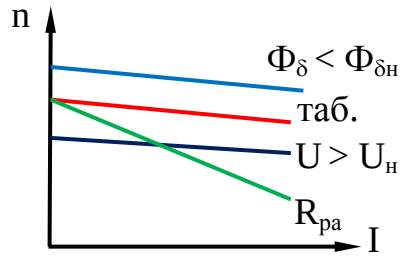
2.8.3.2 Реттемелік сипаттамалар.

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:

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

- 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.);



2.26 сурет – Параллель қоздыру кезіндегі реттемелік сипаттамалар

- қоздырушы ағынды өзгерту арқылы, демек қоздырушы токты $I_{коз}$ өзгертумен. Магнит ағынының Φ_δ азаюымен жылдамдық өседі. Қозғалтқыштар номиналды режим кезінде Φ_δ ең үлкен мәнінде жұмыс істеу үшін есептеледі, яғни жылдамдықтың *n* ең аз мәнінде. Содықтан іс жүзінде магнит ағынын Φ_δ тек қана азайтуға болады. Реттемелік сипаттамалар 2.26 суретте көрсетілген.

2.9 Тізбектеп қоздырылатын қозғалтқыш

Қозғалтқыштың жұмыстық сипаттамалары.

Олар *n*; *M* және $\eta=f(I_я)$ 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.

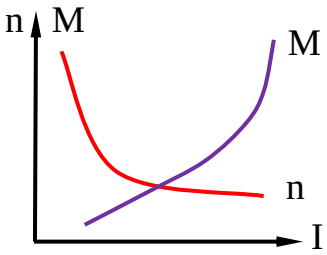
Ағынды $\Phi=кI$ түрде көрсетеміз, мұнда *к* – ағын мен токтың арасындағы пропорционалдық коэффициент, онда:

$$n = \frac{U - IR_a}{C_E \Phi} = \frac{U - IR_a}{C_E kI} = \frac{U}{C_E kI} - \frac{IR_a}{C_E kI} = \frac{U}{C_E kI} - \frac{R_a}{C_E k}. \qquad (2.15)$$

R_a кедергі аз болатындықтан:

$$n = \frac{U}{C_E kI}. \qquad (2.16)$$

2.27 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.



2.27 сурет – Тізбектей қоздырылатын қозғалтқыштың жұмыс сипаттамалары

Моменттің якорь тогына тәуелділігі.

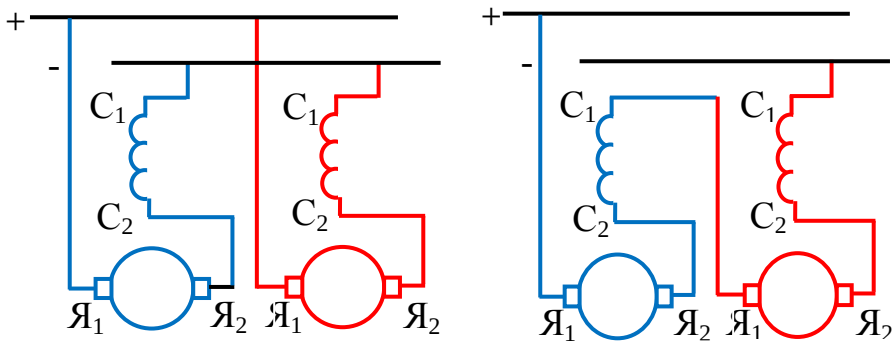
$\Phi=k_{\Phi}I_{Я}$, ал $M=c_M I_{Я}\Phi$, болатындықтан $M=c_M' I_{Я}^2$.

Тізбектеп қоздырылатын қозғалтқыштың $U=U_{НОМ}=const$ болған кездегі $M=f(I_{Я})$ сипаттамасы болат нашар қаныққан 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.

2.9.1 Қозғалтқыштың реттемелік сипаттамалары.

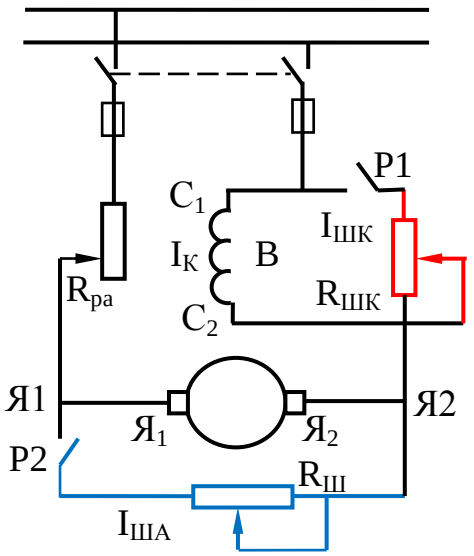
Тізбектеп қоздырылатын қозғалтқыштардың айналу жиілігі де, параллель қоздырылатын қозғалтқыштарда қолданылатын тәсілдермен реттеледі.

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.

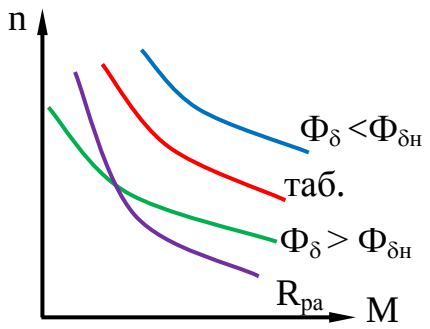


а) параллельді; б) тізбектей.

2.28 сурет – Қозғалтқыштарды қосу



2.29 сурет – Тізбекті қозғалтқыштардың айналу жылдамдығын реттеу



2.30 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 (2.30 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).

2.10 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 Φ_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.