

M. Rejepow, D. Hommadow

ELEKTRİK MAŞYNLARY

Ýokary okuw mekdepleri üçin okuw kitaby

*Türkmenistanyň Bilim ministrligi
tarapyndan hödürlenildi*

Aşgabat
“Ylym” neşirýaty
2014

UOK 378:621. 313

R40

Rejepow M., Hommadow D.

R40 **Elektrik maşynlary.** Ýokary okuw mekdepleri üçin okuw kitaby. – A.: Ylym, 2014. – 340 sah.

«Elektrik maşynlary» okuw kitabynda elektroenergetikada, maşyn-gurluşygynda, ulagda we önümçiligiň beýleki pudaklarynda giňden ulanylýan dürli görnüşli elektrik maşynlarynyň işleýiş düzgünleri, konsturtiw aýratynlyklary hem-de olaryň esasy häsiýetnamalary barada düşünje berilýär. Şeýle-de bu kitapda tehniki ulgamlaryň awtomatiki dolandyrylyşynda ulanylýan üýtgeýän we hemişelik toguň ýöriteleşdirilen maşynlaryna hem-de transformatorlaryna seredilýär.

Okuw kitaby ýokary okuw mekdepleriniň talyplary üçin niýetlenen bolup, ondan digişli orta hünär okuw mekdepleriniň talyplary hem okuw gollanmasy hökmünde peýdalanyp bilerler.

TDKP № 397, 2014

KBK 31.26 ýa 73

© M. Rejepow, D. Hommadow, 2014

© “Ylym” neşirýaty, 2014



**TÜRKMENISTANYŇ PREZIDENTI
GURBANGULY BERDIMUHAMEDOW**



TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET TUGRASY



TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET BAÝDAGY

TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET SENASY

Janym gurban saňa, erkana ýurdum,
Mert pederleň ruhy bardyr köňülde.
Bitarap, garaşsyz topragyň nurdur,
Baýdagyň belentdir dünýäň öňünde.

Gaýtalama:

Halkyň guran Baky beýik binasy,
Berkarar döwletim, jigerim-janym.
Başlaryň täji sen, diller senasy,
Dünýä dursun, sen dur, Türkmenistanym!

Gardaşdyr tireler, amandyr iller,
Owal-ahyr birdir biziň ganymyz.
Harasatlar almaz, syndyrmaz siller,
Nesiller döş gerip gorar şanymyz.

Gaýtalama:

Halkyň guran Baky beýik binasy,
Berkarar döwletim, jigerim-janym.
Başlaryň täji sen, diller senasy,
Dünýä dursun, sen dur, Türkmenistanym!

**Türkmenistanyň Prezidenti
Gurbanguly Berdimuhamedow:**

*– Elektrik energiýasyny öndürmek,
bu ugurda täze mümkinçilikleri açmak
we işe girizmek geljege gönükdirilen uzak
möhletleýin döwlet ähmiýetli wezipedir.*

GIRIŞ

Berkarar döwletiň bagtyýarlyk döwründe Hormatly Prezidentimiz Gurbanguly Berdimuhamedowyň parasatly ýolbaşçylygynda durmuşa geçirilýän giň gerimli özgertmeleriniň netijesinde halk hojalygynyň ähli pudaklarynda bolşy ýaly, elektroenergetika pudagynyň önümçiliginde hem dünýä ylmynyň we tehnikasynyň täze gazananlaryna esaslanan enjamlar hem-de tehnologiýalar köpçülikleýin ornaşdyrylýar. Bu özgertmelere laýyklykda täze tehnologiýalardan baş çykarýan, hünärine ökde, watansöýüji, halkymyza, Hormatly Prezidentimize wepaly hünärmenleri taýýarlamak ýokary tehniki okuw mekdepleriniň esasy wezipesidir. Şu nukdaýnazardan, “Elektrik maşynlary” dersi boýunça taýýarlanan bu okuw kitaby Türkmenistanyň Prezidentiniň bilim ulgamynda geçirýän özgertmelerine laýyklykda täzeden işlenilen we Türkmenistanyň Bilim ministrligi tarapyndan tassyklanan okuw maksatnamasynyň esasynda ýazyldy.

Türkmenistanyň elektroenergetikasy öz başlangyjyny Hindiguş suw elektrik stansiýasyndan alyp gaýdýar. Hindiguş gidroelektrik stansiýasy 1913-nji ýylda gurlup ulanylmaga berildi. Stansiýa W.A.Wasilýew tarapyndan taslamasy düzülen we wenger firmasy tarapyndan taýýarlanan, her biriniň kuwwaty 400 kWt bolan üç sany gorizontál ýerleşdirilen gidrogeneratorlardan ybaratdyr.

Soňra 1941-nji ýyla çenli Türkmenistanda umumy kuwwaty 36 müň kWt bolan suw we dizel elektrik stansiýalary işe goýberilýär. Beýik Watançylyk urşunyň başlanmagy bilen Tuapse şäherindäki nebiti gaýtadan işleýän zawod Krasnowodskä (häzirki Türkmenbaşy şäherine) göçürilip getirilýär. Bu zawody elektrik energiýasy bilen üpjün etmek maksady bilen bu ýerde Türkmenistanda ýylylyk bilen işleýän ilkinji elektrik stansiýasy gurulýar. 1945-nji ýylda Türkmenbaşy şäherinde Türkmenistanda ilkinji ýylylyk elektrik stansiýasy işläp başlaýar.

1948-nji ýylda Murgap derýasynda kuwwaty 600 kWt bolan Gowşutbent, 1954-nji ýylda kuwwaty 3200 kWt bolan Kolhozbent suw elektrik stansiýalary gurulýar. 1967-nji ýylda Mary döwlet elektrik stansiýasynyň gurluşygy başlandy, 4 ýyldan soň onuň birinji energiýa blogy herekete getirildi. 1987-nji ýylda bu ýerde eýýäm 8 energiýa blogy işe girizildi, türkmen energetikasynyň önbaşçysynyň kuwwaty 1685 megawata yetdi. Seýdi ýylylyk elektrik merkeziniň iki blogy 1992-nji we 2004-nji ýyllarda işe girizildi.

1996-njy ýylda Daşoguz-Seýdi elektrik geçiriji liniýasynyň gurlmagy ýurduň demirgazyk sebitini Türkmenistanyň merkezleşdirilen energiýa ulgamyna birikdirdi, 1998-nji ýylda bolsa ýurdumyzda öndürilýän elektrik energiýasy bilen Amyderýanyň sag kenary üpjün edildi. 2001-nji ýylda naprýaženiýesi 500 kW bolan „Serdar“ podstansiýasynyň işe girizilmegi ýurduň doly energiýa howpsuzlygyny üpjün etmek, elektrik energiýasyny Lebap we Daşoguz welaýatlaryna iň amatly ýollar bilen geçirmek hem-de Merkezi Aziýa ýurtlaryna elektrik energiýany çykarmak mümkinçiligini berdi.

1998-nji we 2003-nji ýyllarda gaz turbina desgalary Abadan döwlet elektrik stansiýasynda, Balkanabat döwlet elektrik stansiýasynda işe girizildi. Türkmenbaşynyň nebiti gaýtadan işleýän zawodlar toplумы üçin aýratyn elektrik stansiýasy guruldy. Paýtagtymyzda elektrik energiýasynyň sarp edilişiniň ýokarlanýandygy bilen baglylykda 2006-njy ýylda işläp başlan Aşgabat döwlet elektrik stansiýasyny gurmaklyk karar edildi. 2007-nji ýylyň 7-nji dekabrynda Türkmenistanyň Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedowyň gatnaşmagynda Daşoguz gaz turbina elektrik stansiýasynyň açylmagy pudak üçin wajyp pursatdyr.

Garaşsyzlyk ýyllaryň içinde ýurdumyzda ençeme müň kilometr paýlaýjy we birleşdiriji howa hem-de kabel liniýalary, ýüzlerçe podstansiýalar guruldy. Çaklamalara görä, ýurduň içinde elektrik energiýasynyň sarp edilişi 2020-nji ýyla çenli 2 mlrd kilowatt/sagada, daşary ýurtlara çykarylyşy bolsa 11,57 mlrd kilowatt/sagada çenli artýar. Döwrüň talabyna görä ýurduň energiýa ulgamynyň kuwwatyny güýçli depginler bilen ösdürmek göz önünde tutulýar. Bar bolan bug-turbina energiýa bloklaryny kämilleşdirmek we häzirki zaman enjamlar bilen abzallaşdyrmak göz önünde tutulýar. Olaryň ilkinjisi Mary döwlet elektrik stansiýasynda döwrebaplaşdyryldy. 2020-nji ýyla çenli stansiýada energiýa bloklarynyň ýene-de 2-si işe goýberiler, bu bolsa öndürilýän elektrik energiýasynyň kuwwatynyň 2180 MWt-a çenli ýokarlanmagyny üpjün eder.

Bagtyýarlyk döwrüniň möhüm taslamalarynyň biri milli syýahatçylyk zolagyny elektrik energiýasy bilen üpjün etmek üçin Awazada kuwwaty 254,2 MWt bolan elektrik stansiýasy guruldy. Paýtagtymyzda elektrik energiýasyny sarp etmekligiň mukdarynyň her ýylda takmynan 10% ýokarlanýandygy sebäpli, Aşgabadýň gündogar tarypynda Ahal welaýatynda ýene-de bir gaz-turbinaly elektrik stansiýasy gurlup ulanylmaga berildi. Ahaldaky we Awazadaky desgalar 2010-njy ýylda işe girizilen desgalarydyr. Geljekde häzirki zaman elektrik stansiýalarynyň gurluşygy dowam etdiriler.

Ýokary woltly elektrik geçiriji liniýalaryň we podstansiýalaryň gurluşygynyň dowam etdirilmegi elektrik energiýasynyň ýitgisini azaltmaga mümkinçilik berer. Paýtagtyň energiýa üpjünçiliginiň durnuklylygyny ýokarlandyrmak üçin naprýaženiýesi 220 kV bolan halkalaýyn liniýany gurmak göz önünde tutulýar. Amyderýanyň sag kenarynyň energiýa üpjünçiligini has ygtybarly etmek maksady bilen «Parahat – Pelwert – Atamyrat» elektrik liniýasy gurlar. «Günorta Ýolötende», «Gurpluda», «Garabilde» özleşdirilýän gaz ýataklaryny energiýa bilen üpjün etmek, elektrik energiýasynyň Owganystana çykarylyşyny artdyrmak üçin Mary-Tagtabazar elektrik geçirijisiniň gurluşygyny alyp barmak göz önünde tutulýar.

Aşgabatda ýakyn 2–3 ýylyň içinde naprýaženiýesi 110 we 35 kV bolan 28 podstansiýany gurmaklyk göz önünde tutulýar, howa we kabel «energiýa arteriýalarynyň», şäher ýagtylandyryş we ýaşaýyş

jaýlaryny energiýa bilen üpjün ediş ulgamlarynyň durky täzelener. Energiýa ulgamlaryny döwrebaplaşdyrmak we olary häzirki zaman enjamlary bilen üpjün etmek işleri beýleki şäherlerde hem geçiriler.

Türkmenistanyň energetika ulgamy bilen Merkezi Aziýanyň birleşen energetika ulgamynyň arasynda elektrik baglanyşygy bar. 220 kilowoltlyk Balkanabat-Gonbat elektrik geçiriji liniýa boýunça elektrik energiýanyň eksporty başlanandan soň, Eýrana bolan energetika «Köprüsi» işläp başlady. Hut şu liniýa elektrik energiýany Türkiýä çykarmak üçin energiýa geçelgesiniň bir bölümi boldy. 2004-nji ýylda türkmen elektrik energiýasynyň Eýranyň demirgazyk-gündogar welaýatlaryna berilmegini üpjün edýän elektrik geçirijisi işe girizildi.

Türkmenistan Owganystanyň uruşdan soňky dikeldiş ýagdaýyna işenňir goşuldy. Biziň ýurdumyz bu döwlete elektrik energiýasyny ýeňillikli bahalar bilen bermekligi amala aşyrýar hem-de berilýän elektrik energiýasynyň mukdaryny barha artdyrýar. Türkmen energetikleri Owganystanyň Demirgazyk we Günorta-Günbatar welaýatларында elektrik liniýalarynyň 300 kilometrden gowragyny gurdular hem-de durkuny täzelediler. Bu işler ýene-de dowam etdiriler.

Elektrik energiýasynyň daşary ýurtlara çykarmak mümkinçiligini artdyrmak üçin täze energiýa arteriýalaryny gurmaklyk bellendi. Häzirki wagtda energiýanyň daşary ýurtlara çykarylyşy ortaça ýyl hasabynda 1,3 milliard kilowatt sagat bolýan bolsa, 2020-nji ýyla çenli elektrik energiýasynyň çaklanylýan eksporty eýýäm 11,57 milliard kilowatt sagat bolar.

«Elektrik maşynlary» dersi öz önünde elektroenergetikada, maşyngurluşygynda, transportda we önümçiligiň beýleki pudakларында elektrohereketlendirilişde giňden ulanylýan dürli görnüşli elektrik maşynlaryň işleýiş prinsipleri, konstruktiv aýratynlyklary hem-de olaryň esasy häsiýetnamalary barada ygtybarly düşünje bermekligi maksat edinýär. Şeýle-de bu dersiň düzümine tehniki ulgamlaryň awtomatiki dolandyrylyşynda giňden ulanylýan üýtgeýän we hemişelik toguň ýöriteleşdirilen maşynларына seredilýär.

Transformatorlarda bolup geçýän elektromagnit hadysalaryň elektrik maşynlardaky hadysalara örän ýakynlygy sebäpli, transformatorlar «Elektrik maşynlary» dersinde öwrenilýär.

ENERGIÝANYŇ ELEKTROMECHANIKI ÖZGERDILIŞI WE ELEKTRIK MAŞYNLARYNYŇ NOMINAL ULULYKLARY

Elektrik maşynlarynda energiýanyň elektromehaniki özgerdilişi

Tebigatda duş gelýän ýylylyk, himiki, atom ýadrosynyň energiýalaryny, ýeliň, günüň, derýalardaky we deňizlerdäki suwlaryň hereketleriniň energiýalaryny aralyga geçirmek we paýlamak üçin olar, ilki bilen, köpçülikleýin ýylylyk hem-de gidrawliki maşynlaryň kömegi arkaly mehaniki herekete, soňra bolsa mehaniki hereketi elektrik energiýa özgerdilýär. Beýle edilmegi elektrik energiýanyň beýleki görnüşleri bilen deňeşdirilende, ony uzak aralyklara geçirilende, paýlanylanda we ony energiýanyň beýleki görnüşlerine özgerdilende ýüze çykýan ýitgileriň azlygy bilen düşündirilýär. Mehaniki hereketi elektrik energiýa we elektrik energiýany mehaniki herekete öwürýän maşynlara **elektrik maşynlary** diýilýär. Mehaniki hereketi elektrik energiýa özgerdýän elektrik maşynlara generatorlar, elektrik energiýany mehaniki herekete özgerdýän maşynlara bolsa elektrik hereketlendirijiler diýilýär. Şol bir elektrik maşyny generator ýa-da hereketlendiriji (dwigatel) hökmünde ulanmak mümkindir.

Eger-de elektrik maşynyň hereket edýän bölegine daşyndan mehaniki energiýa goýlan bolsa, ol generatoryň wezipesini ýerine ýetirýär. Eger-de maşyna daşyndan elektrik energiýa berilýän bolsa, onda ol hereketlendirijiniň wezipesini ýerine ýetirýär. Elektrik maşynlary özara baglanyşykly magnit we elektrik zynjyrlaryndan düzülen ulgamydyr. Maşynyň magnit zynjyrynyň düzümine magnitgeçiriji material-

dan taýýarlanan hereket edýän we hereket etmeýän bölekleri hem-de bu bölekleriň arasyny bölýän howa gatlagy girýär. Maşynyň elektrik zynjyryna onuň magnitgeçirijilerinde ýerleşdirilen sarymlar degişlidir.

Elektrik maşynlarda energiýanyň elektromehaniki öwrülişi elektromagnit induksiýasy hadysasyna esaslanandyr. Elektrik maşynlary üýtgeýän we hemişelik toklaryň maşynlaryna bölünýärler. Hemişelik toguň maşynlaryna hemişelik toguň generatorlary we hereketlendirijileri degişlidir. Üýtgeýän toguň maşynlary asinhron we sinchron maşynlara bölünýärler. Şeýle-de üýtgeýän toguň maşynlaryna kollektorly asinhron maşynlar hem degişlidir. Emma bu hereketlendirijiler özüniň gymmatlygy, ekspluatasiýasynyň çylşyrymlylygy sebäpli häzirki döwürde örän seýrek ulanylýar. Kollektorly asinhron maşynlary elektrik togunyň ýygylgyny, faza sanyny üýtgetmekde we ony bir görnüşden başga görnüşe özgertmekde hem ulanylýar. Şeýle maşynlara elektromaşynly özgerdijiler diýilýär.

Elektrik maşynlary şertli: mikromaşynlara (1 Wt-dan 500 Wt-a çenli), pes kuwwatly (0,5 kWt-dan 10 kWt-a çenli), orta kuwwatly (10 kWt-dan 200 kWt-a çenli), uly kuwwatly (200 kWt we ondan ýokary) maşynlara bölünýärler.

Hemişelik magnit meýdanynda ýerleşdirilen, elektrik toguny üstünden geçirip bilýän simi magnit akymyna perpendikulýar ugur boýunça daşyndan täsir edýän güýç bilen saga we çep tarap herekete getirilende simde elektrik hereketlendiriji güýç indusirlenýär. Emele gelen elektrik hereketlendiriji güýjüň ugry sag elniň düzgüni boýunça kesgitlenýär. Eger-de simiň uçlary R garşylykly kabul edijä birikdirilende, elektrik hereketlendiriji güýjüň täsiri netijesinde onuň üstünden i tok akyp başlar. Toguň ugry elektrik hereketlendiriji güýjüň ugry bilen gabat gelýär. Bu ýagdaýda elektrik maşyny generatoryň wezipesini ýerine ýetirýär. Simiň üstünden geçýän i tok magnit akymy bilen özara täsir edip, F_{em} elektromagnit güýjüni döredýär. Bu güýjüň ugry çep elniň düzgüni boýunça kesgitlenýär we ol indiki aňlatma boýunça hasaplanylýar:

$$F_{em} = B \cdot l \cdot i, \quad (1)$$

bu ýerde B – magnit meýdanyň induksiýasy; l – simiň magnit meýdanynda ýerleşdirilen işjeň (aktiw) uzynlygy. F_{em} güýç simi herekete getirýän F mehaniki güýjüň garşysyna tarap ugrukdyrylandyr:

$$F_{\text{em}} = F. \quad (2)$$

Eger-de (2) aňlatmanyň iki tarapyny hem v_a tizlige köpeltsek, kuwwatlaryň deňligini alarys:

$$F_{\text{em}} \cdot v_a = F_{\text{em}} \cdot v_a. \quad (3)$$

(3) aňlatmadaky F_{em} elektromagnit güýjüň ýerine onuň (1) aňlatmadaky ululygyny goýup, v_a tizligiň ýerine bolsa $e = B \cdot l \cdot v_a$ aňlatmadan $v_a = \frac{e}{B \cdot l}$ goýup alarys.

$$e \cdot i = F \cdot v_a. \quad (4)$$

(4) aňlatmadan görnüşi ýaly, maşyn generator iş düzgüninde işleýän wagtynda $F \cdot v_a$ mehaniki energiýa $e \cdot i$ elektrik energiýasyna öwürülýär.

Eger-de hemişelik magnit meýdanynda ýerleşdirilen geçiriji sime elektrik energiýasynyň çeşmesinden i tok berilse, onda tok güýjüniň magnit akymy bilen täsir etmegi netijesinde F_{em} elektromagnit güýji dörrär. Bu güýjüň täsirinde sim v_a tizlik bilen herekete geler. Bu ýagdaýda elektrik maşyny hereketlendirijiniň wezipesini ýerine ýetirýär. Simiň hereketiniň ugry sag eliň düzgüni boýunça kesgitlenýär. Magnit meýdanynda v_a tizlik bilen hereket edýän simde e elektrik hereketlendiriji güýji indusirlenýär. Netijede, hereketlendiriji $e \cdot i$ elektrik kuwwaty mehaniki kuwwata özgerdýär:

$$e \cdot i = B \cdot l \cdot v_a \cdot i = F_{\text{em}} \cdot v_a = F \cdot v_a. \quad (5)$$

(4) we (5) aňlatmalardan görnüşi ýaly, elektrik maşynlarda energiýanyň elektromehaniki özgerdilişi bolup geçýär.

Elektrik maşynlarynyň nominal kuwwatlary, naprýaženiýeleri we aýlaw ýyglyklary

Üýtgeýän we hemişelik toguň maşynlarynyň kuwwatlary halkara elektrotehniki komissiýasy (HEK) tarapyndan standart ululyklara bölünendir.

Standart boýunça nominal kuwwatlaryň aşakdaky ululyklary göz öňünde tutulandyr (0,12 kWt-dan 1000 kWt-a çenli aralykda): 0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 11; 15; 18,5; 22; 30; 37; 45; 55; 75; 90; 110; 132; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800 we 1000 kWt.

Nominal kuwwatyň bu ululyklary goragy we montažy hem-de ähli sowadylyş usullary boýunça ýerine ýetirilen elektrik maşynlary üçin hökmanydyr. Ýörite niýetlenen elektrik maşynlary üçin nominal kuwwatlaryň görkezilen ululyklary hökmany dälir.

Naprýaženiýesi 1000 W we ondan ýokary bolan generatorlaryň we hereketlendirijileriň nominal naprýaženiýeleri halkara elektrotehniki komissiýanyň standarty tarapyndan reglamentirlenendir. Standart tarapyndan kesgitlenen has giňden ulanylýan nominal naprýaženiýeler 1-nji tablisada görkezilendir.

1-nji tablica

Toguň görnüşi	Üýtgeýän üçfazaly, W					Hemişelik, W		
Generator	230	400	690	6300	10500	115	230	460
Hereketlendiriji	220	380	660	6000	10500	110	220	440

Standart tarapyndan üýtgeýän toguň $f_1 = 50$ Gs ýyglygynda sinhron generatorlar üçin: 125; 150; 157,6; 214,3; 250; 300; 375; 428,6; 500; 600; 750; 1000; 1500 we 3000 aýl/min. Standart tarapyndan kesgitlenen nominal aýlaw ýyglyklaryň bu şkalasyna käbir üýtgeşmeler girizilip, ol sinhron we asinhron hereketlendirijiler üçin hem peýdalanylýar. Ýagny sinhron hereketlendirijiler üçin goşmaça 100 we 166,6 aýl/min nominal aýlaw ýyglyklar girizilendir, emma 428,6 aýl/min aýlaw ýyglyk aýrylandyr. Asinhron hereketlendirijiler üçin bolsa 120 we 160 aýl/min aýlaw ýyglyklar goşulandy, ýöne 214,3 we 428,6 aýl/min aýlaw ýyglyklar aýrylandyr. Asinhron

hereketlendirijileriň nominal aýlaw ýygylarynyň ululyklary sanalyp geçilen ululyklardan bir aýlaw ýygylık kiçi bolmalydyr, ýagny bu aýlaw ýygylık nominal typmanyň ululygyna görä kesgitlenilýär.

Aýlaw ýygylıgy 3000 aýl/min çenli bolan hemişelik toguň generatorlary üçin standart tarapyndan aşakdaky nominal aýlaw ýygylık kesgitlenendir: 400; 500; 600; 750; 1000; 1500; 2000; 3000 hereketlendirijiler üçin: 25; 50; 75; 100; 125; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 1000; 1500; 2000; 2200 we 3000 aýl/min. Hereketlendirijiniň has kiçi (esasy polýuslaryň döredýän magnit meýdanyny üýtgetmek arkaly sazlamak) we has uly aýlaw ýygylık (nominal naprýaženiýede we nominal ýükde ýakoryň naprýaženiýesini üýtgetmek arkaly sazlamak) hem standart tarapyndan kesgitlenen aýlaw ýygylıkaryň nominal ululyklaryna gabat gelmelidirler.

Elektrik maşynlarynda energiýanyň ýitgileri

Elektrik maşynlarda elektrik energiýanyň mehaniki energiýa (hereketlendiriji) ýa-da mehaniki energiýanyň elektrik energiýa (generator) özgerdilmesi bolup geçýär. Energiýa bir görnüşden beýleki görnüşe öwrülende onuň bir bölegi maşynyň özünde ýitirilýär. Ýitýän energiýa soňra ýylylyk energiýasyna öwrülýär. Ýitirilýän energiýanyň mukdary maşynyň peýdaly täsir koeffisiýentiniň ululygyna täsir edýär. Şeýle-de maşynda ýüze çykýan energiýanyň ýitgileri onuň bölekleriniň temperaturasynyň rugsat berilýän ululyklaryndan ýokary geçmegine we käbir halatlarda olaryň hatardan çykmagyna getirýär.

Elektrik maşynlarda ýüze çykýan energiýanyň ýitgileri iki topara: esasy we goşmaça ýitgilere bölünýär. Esasy ýitgiler elektromagnit we mehaniki prosesleriň netijesinde ýüze çykýar. Olara maşynyň sarymlarynda ýüze çykýan elektrik, magnitgeçirijilerinde ýüze çykýan magnit, podşipniklerinde ýüze çykýan mehaniki ýitgiler we birikmelerdäki (kontaktlardaky) elektrik ýitgiler degişlidir. Goşmaça ýitgiler ikilenji häsiýetli elektromagnit hadysalaryň netijesinde ýüze çykýar. Meselem, ýaýraýan magnit akymynyň, kommutasion prosesleriň, ýakoryň dişlerinde ýüze çykýan magnit akymynyň pulsasiýasy sebäpli sarymlarda ýüze çykýan energiýanyň ýitgileri we beýlekiler.

Elektrik ýitgiler maşynyň sarymlarynda, elektrik hereketlendiriji güýçler indusirlenýän böleginde (ýakorynda) we oýandyryjy ulgamyň zynjyrlarynda ýüze çykýar. Ýakor zynjyryndaky elektrik ýitgiler:

$$P_{ýa} = m \cdot \sum R_{ýa} \cdot I_{ýa}^2, \quad (6)$$

bu ýerde $\sum R_{ýa}$ – ýakor zynjyryndaky yzygider birikdirilen elementleriň garşylyklarynyň jemi, m fazalaryň sany (hemişelik toguň maşynlary üçin $m = 1$).

Oýandyryjy ulgamyň zynjyrlarynda ýüze çykýan elektrik ýitgiler:

$$P_{oý} = I_{oý} \cdot U = R_{oý} \cdot I_{oý}^2. \quad (7)$$

Döwlet standartlaryna (ГОСТ 183–74 belgili standarta) laýyklykda sarymlardaky ýitgiler hasaplananda olaryň garşylyklaryny hasaplamak arkaly olaryň işçi temperaturalaryna getirilýär. Gyzgyna çydamlylyk izolýasiýa klasy A , E we B bolan maşynlaryň işçi temperaturasy 75°C . Bu temperaturada misiň udel garşylygy

$\rho = \frac{10^{-6}}{47} \text{ Om} \cdot \text{m}$. Izolýasiýa klasy F we H bolan maşynlaryň işçi temperaturasy 115°C we misiň udel garşylygy $\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{41} \text{ Om} \cdot \text{m}$ diýip kabul edilendir.

Elektrik maşynlaryň magnit zynjyrlarynyň esasyň düzýän elektrotehniki poladyň magnitlenmegi we magnitsizlenmegi netijesinde döreýän gisterezis hadysasy we köwlenme toklary olarda energiýanyň ýitgileriniň ýüze çykmagyna sebäp bolýar. Bu ýitgilere magnit ýitgileri diýilýär. Gisterezis hadysasy netijesinde döreýän ýitgiler poladyň magnitlenmek we magnitsizlenmek ýygylgyna we magnit induksiýasynyň kwadratyna baglydyr ($P_{\text{gist}} \sim fB^2$). Gisterezis hadysasynda ýüze çykýan ýitgiler polat plastinkalaryň galyňlygyna bagly däl. Köwlenme toklary netijesinde ýüze çykýan energiýanyň ýitgileri magnitlenmek ýygylgyna, magnit induksiýasyna we polat plastinkalaryň galyňlygynyň kwadratyna baglydyr: $P_{\text{köwl}} \sim (f \cdot B \cdot \Delta)^2$, (bu ýerde Δ plastinkanyň galyňlygy).

Köplenç ýagdaýlarda, elektrik maşynlaryň magnit ýitgileri elektrik aňlatmalaryň üsti arkaly kesgitlenýär. Bu aňlatmalaryň düzü-

mine girýän koeffisiýentler tejribeleriň kömegi arkaly kesgitlenýär. Hasaplamalarda gisterezis we köwlenme toklar sebäpli ýüze çykýan ýitgileriň jemi bilelikde doly magnit ýitgisi hökmünde alynýar. Doly magnit ýitgisi $P_{\text{mag}} \sim f^{\beta} \cdot B^2$ (bu ýerde $\beta = 1,3 \div 1,5$).

Kollektordaky we kontakt halkalardaky ýitgiler aşakdaky aňlatma arkaly hasaplanylýar:

$$P_{\text{sürt}} = K_{\text{sürt}} \cdot F_s \cdot S_s \cdot v. \quad (8)$$

Bu aňlatmada $K_{\text{sürt}}$ – çotga bilen kollektoryň arasyndaky sürtülme koeffisiýenti ($K_{\text{sürt}} \approx 0,25$); F_s – çotganyň kollektora basylyş güýji [$(F_s = 1,5 \div 2,5) \cdot 10^3$ Pa]; S_s – çotgalaryň galtaşýan üst meýdanlarynyň jemi, (m²); v – kollektoryň gönüçyzykly tizligi, (m/s).

Çotgalaryň galtaşýan üstlerindäki elektrik ýitgileri:

$$P_{\text{el.s}} = \Delta U_s \cdot I_{\text{ýa}}. \quad (9)$$

Kömürden we grafitden taýýarlanan çotgalaryň galtaşmalaryndaky naprýaženiýäniň peselmesi $\Delta U_s \approx 2$ V diýip kabul edilýär. Metalgatysykly kömürden we metalgatysykly grafitden taýýarlanan çotgalaryň galtaşmalaryndaky naprýaženiýäniň peselmesi $\Delta U_s \approx 0,6$ W. Hasaplamalarda ΔU_s -iň ululygy ýakoryň toguna bagly däl diýip kabul edilýär.

Elektrik maşynlarynyň peýdaly täsir koeffisiýenti

Elektrik maşynlarda ýüze çykýan energiýanyň ýitgileriniň jemi aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

$$\Sigma P = P_{\text{ýa}} + P_{\text{oý}} + P_{\text{mag}} + P_{\text{meh}} + P_s + P_{\text{goş}}. \quad (10)$$

Elektrik maşynlaryň peýdaly täsir koeffisiýenti diýip, onuň P_2 peýdaly kuwwatynyň P_1 sarp edilýän kuwwatyna bolan gatnaşygyna aýdylýar:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \text{ ýa-da } \eta \% = \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \cdot 100. \quad (11)$$

Hereketlendirijide setden alynýan elektrik kuwwat: $P_1 = U \cdot I$;

Hereketlendirijiniň okundan işçi mehanizme berilýän peýdaly kuwwat: $P_2 = P_1 - \Sigma P$;

Generatordan sete berilýän peýdaly kuwwat: $P_2 = U \cdot I$;

Generatoryň okuna berilýän mehaniki kuwwat: $P_1 = P_2 + \Sigma P$.

Şeýlelikde, hereketlendirijiniň peýdaly täsir koeffisiýenti

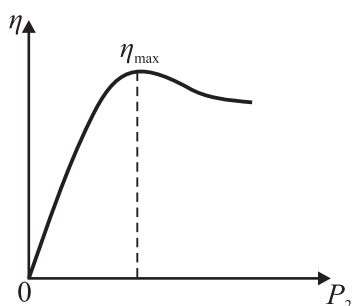
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}. \quad (12)$$

Generatoryň peýdaly täsir koeffisiýenti

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P}. \quad (13)$$

Uly we orta kuwwatly elektrik maşynlaryň peýdaly täsir koeffisiýenti: $\eta = 0,85 \div 0,95$, pes kuwwatly maşynlarda bolsa $\eta = 0,25 \div 0,3$ töweregi bolýar. Şol sebäpli maşynlaryň peýdaly täsir koeffisiýenti olaryň nominal kuwwatlaryny ýokarlandyrmak arkaly beýgeldilýär.

Maşynyň peýdaly täsir koeffisiýenti onuň ýüküniň ululygyna görä ilki ösýär we maksimal ululyga barýar, soňra bolsa peselýär (1-nji surat).



1-nji surat. Elektrik maşynlaryň peýdaly täsir koeffisiýentiniň P_2 peýdaly kuwwata bolan baglanyşygynyň grafigi

Elektrik maşynlarda ýüze çykýan energiýa ýitgileriniň bir bölegi ýüke bagly däl. Meselem: mehaniki, magnit we oýandyryjy ulgamda ýüze çykýan ýitgiler. Bu ýitgilere hemişelik ýitgiler diýilýär.

Ýitgileriň ikinji böleginiň mukdary I_{ya}^2 ýüküň togunyň kwadratyna baglydyr. Bu ýitgilere ýakoryň sarymlaryndaky ýüze çykýan elektrik we goşmaça ýitgiler degişlidir. Ýitgileriň üçünji bölegine I_a toga bagly ýitgiler degişlidir. Bu görnüşli ýitgilere çotgalaryň galtaşmalaryndaky energiýa ýitgileri degişlidir.

Ýokarda aýdylanlary hasaba alyp, maşynda ýüze çykyan energiýa ýitgileriniň jemini aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\Sigma P = A + B \cdot I_{\dot{y}a} + C \cdot I_{\dot{y}a}^2. \quad (14)$$

Maşynyň maksimal peýdaly täsir koeffisiýenti $\frac{\Sigma P}{U \cdot I_{\dot{y}a}}$ gatnaşygyň iň pes ululyga deň bolan ýagdaýyna degişlidir.

(14) aňlatmany $I_{\dot{y}a}$ toga bölüp alarys:

$$\frac{\Sigma P}{I_{\dot{y}a}} = \frac{A}{I_{\dot{y}a}} + B + C \cdot I_{\dot{y}a}. \quad (15)$$

(15) aňlatmadan $I_{\dot{y}a}$ toga görä birinji tertipli önüm alyp we alnan netijäni nola deňläp, peýdaly täsir koeffisiýentiň maksimal ululygyny taparys:

$$\frac{d(\Sigma P)}{dI_{\dot{y}a}} = -\frac{A}{I_{\dot{y}a}^2} + C, \quad (16)$$

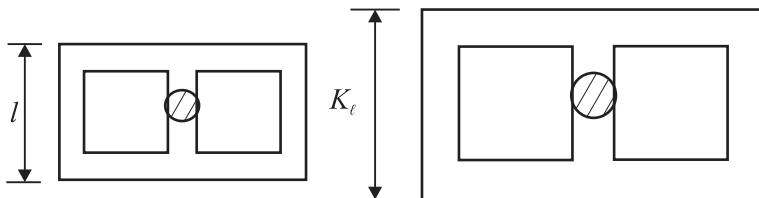
bu ýerde $A = CI_{\dot{y}a}^2$.

Şeýlelikde, maşyn peýdaly täsir koeffisiýentiň maksimal ululygy hemişelik ýitgileriň, $I_{\dot{y}a}^2$ toga bagly bolan üýtgeýän ýitgilere deň bolan ýagdaýynda alýar. Elektrik maşynlar projektirlenende η_{\max} maksimal peýdaly täsir koeffisiýenti maşynyň uzak wagtlap işläp biljek ýüküne hasaplanylýar. Şol sebäpli häzirkizaman elektrik maşynlarynda η_{\max} maksimal peýdaly täsir koeffisiýenti nominal ýüküň $0,5 \div 0,7$ bölegine deň bolan ýagdaýynda ýüze çykýar.

Elektrik maşynlaryň naprýaženiýeleriniň, toklarynyň we kuwwatlarynyň gabara ölçegleri hem-de massalary bilen özara baglanyşyklary

Elektrik maşynlaryň we transformatorlaryň kuwwatlarynyň ýokarlanmagy bilen olaryň gabara ölçegleri hem-de massalary ösýär. Bu baglanyşyklaryň haýsy kanunyň esasynda ösýändigine düşünmek üçin birmeňzeş görnüşli dürli kuwwatly iki sany transformatoryň mysalynda seredeliň (2-nji surat). Daýanç (bazis) ululyk hökmün-

de transformatoryň magnitgeçirijisiniň l beýikligini we onuň beýleki ölçeglerini bu ululyga bagly diýip kabul edeliň. Meselem, transformatoryň magnit geçiriji sterženiniň diametri $D \sim l$ ýa-da sarymlaryň orta uzynlygy $l_d \sim l$ (2-nji surat).



2-nji surat. Dürli kuwwatly iki sany birmeňzeş transformatoryň magnitgeçirijileriň gurluşyna mysal

Transformatoryň ýa-da elektrik maşynyň islendik elementiniň kese-kesiginiň meýdany l ölçeginiň kwadratyna baglydyr ($\Pi \sim l^2$). Şeýle-de olaryň islendik elementiniň göwrümi l ölçeginiň kubyna baglydyr ($S \sim l^3$).

Indi transformatorlaryň nominal iş düzgünlerindäki elektromagnit hadysalary häsiýetlendirýän ululyklaryň onuň gabara ölçeglerine bolan baglanyşyklaryna seredeliň.

Analiz üçin seredilýän transformatorlar şol bir materialdan taýýarlanylýdyr diýeliň we olaryň elektromagnit ýükleri (magnitgeçiriji steržendäki B magnit induksiýasy, sarymlaryndaky toguň J dykzlygy, şeýle-de toguň f ýygyllygy) hemişelik diýip kabul edeliň ($B = \text{const}, J = \text{const}, f = \text{const}$).

1) Naprýaženiýe bilen elektrik hereketlendiriji güýjüň arasyndaky tapawudy hasaba almazdan ýazyp bileris:

$$U_{1n} \approx E_{1n} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot w_1 \cdot (B \cdot \Pi_{st}) \sim w_1 \cdot \Pi_{st} \sim w_1 \cdot l^2. \quad (17)$$

Bu ýerden naprýaženiýäniň ululygy transformatoryň w_1 sarymlaryň sargy sanyna we onuň l ölçeginiň kwadratyna baglydygy görünýär. Bu aňlatmada Π_{st} magnitgeçiriji sterženiň kese-kesiginiň meýdany.

2) Transformatoryň l ölçeginiň üýtgemegi bilen onuň sarymlarynyň umumy kese-kesiginiň meýdany l ölçeginiň kwadratyna bagly üýtgeýär:

$$I_{1n} = \Pi_1 \cdot \frac{J}{w_1} \sim \frac{l^2}{w_1}; \quad J = \frac{I_{1n}}{\Pi_1}; \quad I_{1n} = \Pi_1 \cdot J. \quad (18)$$

Aňlatmadan görnüşi ýaly, toguň ululygy l ölçegiň kwadratyna göni, sarym sanyna bolsa ters baglydyr. Bu aňlatmada Π_1 sarymlaryň umumy kese-kesiginiň meýdany.

3) Transformatoryň doly kuwwaty l ölçegiň dördünji derejesine baglydyr:

$$S = S_n = U_{1n} \cdot I_{1n} \sim (l^2 \cdot w_1) \cdot \frac{l^2}{w_1} = l^4. \quad (19)$$

Bu aňlatmadan görnüşi ýaly, transformatoryň kuwwaty sarymlaryň sargy sanyna bagly dälendir.

4) Birmeňzeş materialdan taýýarlanan transformatorlaryň massasy l ölçegiň üçünji derejesine baglydyr:

$$m = \sum \gamma \cdot v \sim l^3.$$

Bir kuwwat birligine düşýän massa bolsa l ölçege ters baglydyr:

$$\frac{m}{S} \sim \frac{l^3}{l^4} \sim \frac{1}{l} \sim \frac{1}{\sqrt[4]{S}}.$$

Has takygy transformatoryň ýa-da elektrik maşynyň kuwwatynyň ýokarlanmagy bilen onuň bir kuwwat birligine düşýän massasy azalýar.

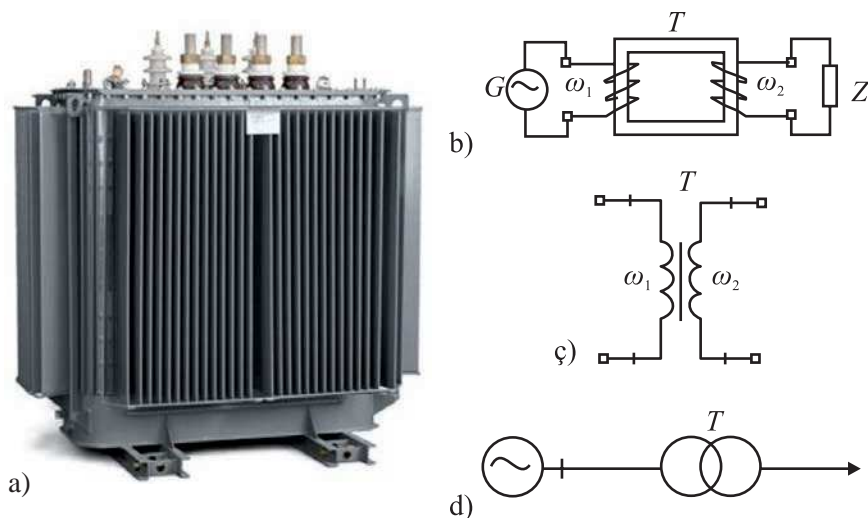
I. TRANSFORMATORLAR

1.1. Transformatoryň wezipesi we onuň işleýiş düzgüni

Elektrik energiýasyny öndürýän, ýylylyk we suw elektrik stansiýalar tebigy baýlyklaryň (gazyň, kömrüň, suwuň we ş.m.) bol ýerinde gurulýarlar. Emma, köplenç ýagdaýlarda, elektrik energiýasynyň sarp edýän senagat merkezleri bu stansiýalardan ýüzlerçe kilometr daşlykda ýerleşýär. Elektrik energiýany şeýle uzak aralyklara geçirmek üçin ulanylýan geçiriji liniýalaryň esasy bölegi bolup transformatorlar hyzmat edýär.

Transformator diýip magnit meýdanynyň kömegi arkaly üýtgeýän toguň naprýaženiýesini onuň ýygylgyny üýtgetmezden bir ululykdan ikinji ululyga geçirmek üçin ulanylýan elektrotehniki enjama aýdylýar. Onuň umumy görnüşi, şertli grafiki şekillendirilişi we elektromagnit shemasy 1.1-nji suratda görkezilendir.

Suw, ýylylyk we atom elektrik stansiýalarynda öndürilýän energiýanyň nominal naprýaženiýeleriniň biri-birinden tapawutlanýandyklary hem-de olaryň öz ululyklary boýunça 6,3; 10,5; 15,75 kWt-den ýokary geçmeýär. Şol sebäpli bu stansiýalaryň ählisini bir ulgama birikdirmek we elektrik liniýalaryň öz üstünden energiýa geçirip bilijilik ukybyny ýokarlandyrmak, şeýle-de liniýalardaky energiýanyň ýitgilerini azaltmak maksady bilen, stansiýalarda öndürilýän elektrik energiýany liniýalara berilmezden önürti olaryň naprýaženiýelerini belli bir derejä çenli ýokarlandyrmak zerurlygy ýüze çykýar. Şonuň üçin elektrik stansiýalarda naprýaženiýäni beýgeldiji transformatorlar oturdylýar we olaryň kömegi arkaly öndürilýän energiýanyň naprýaženiýesi 110; 220; 500; 750; 1150 kWt-e çenli ýokarlandyrylýar we elektrik geçiriji liniýalara berilýär.



1.1-nji surat. Transformatoryň umumy görnüşü (a) şertli belgilenişi (b), (ç) we elektromagnit shemasy (d)

Elektrik energiýasyny sarp ediji ýükleriň köpüsiniň nominal naprýaženiýeleriniň 500 W-den, kuwwatly elektrik hereketlendirijileriň naprýaženiýesiniň 10,5 kWt-den ýokary geçmeýändigini sebäpli liniýalardan alynýan energiýany ulanmazdan öňürti onuň naprýaženiýesi transformatoryň kömegi arkaly birnäçe gezek peseldilýär.

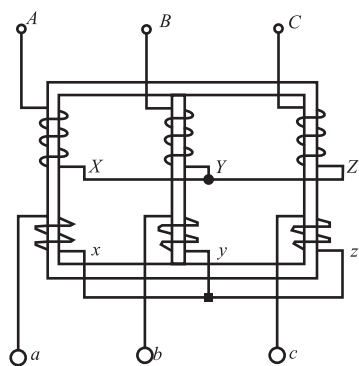
Elektrik energiýasyny geçirmek we ony paýlamak maksady bilen ulanylýan transformatorlara güýç transformatorlar diýilýär. Bu transformatorlaryň nominal kuwwatlygy birnäçe kilowolt amperden birnäçe ýüz müň kilowoltamper arasynda bolup bilýär. Olar özleriniň fazalarynyň sanyna görä, esasan, bir we üçfazly bolýar. Önümçilikde kebsirlemek, impuls signallary almak, elektrik ölçeg abzallaryň ölçeg çäklerini giňeltmek üçin ýörite niýetlenen transformatorlar hem ulanylýar.

Senagat elektronikasynyda ikinji sarymynyň sany birnäçe bolan pes kuwwatly ($10 \div 300 \text{ W} \cdot \text{A}$) güýç transformatorlary giňden peýdalanylýar. Transformatorlaryň dürli görnüşleriniň bardygyna garamazdan olarda bolup geýän elektromagnit hadysalaryň arasynda örän köp meňzeşligiň barlygy sebäpl, olaryň ählisiniň ekspluatasion iş düzgünlerine seredilende ýeke-täk bir teoriýa daýanylýar. Bu teo-

riýa akyl ýetirmek üçin, ilki bilen, birfazaly we üçfazaly transformatoryň gurluşyna we onuň işleýiş prinsipine seredeliň.

Birfazaly transformator (*1.1-nji ç surat*) ýapyk magnitgeçiriji serdeçnikde ýerleşdirilen, özara elektrik baglanyşygy bolmadyk, iki sany sarymdan ybaratdyr. Transformatoryň magnit geçirijisi, aralary biri-birinden izolirlenen, galyňlygy 0,35 mm ýa-da 0,5 mm bolan polat plastinkalardan ýygnaýar. Onuň sarymlary bolsa daşy izolirlenen mis ýa-da alýumin simlerinden saralýar. Transformatoryň elektrik energiýasynyň çeşmesine birikdirilýän sarymyna onuň birinji sarymy diýilýär we oňa degişli fiziki ululyklaryň ählisiniň harp belgilerine 1-lik san belgili indeks goýulýar. Meselem: $U_1, I_1, R_1, X_1, Z_1, P_1$ we ş.m. Onuň kabul edijä birikdirilýän sarymyna bolsa transformatoryň ikinji sarymy diýilýär we bu sarymlara degişli fiziki ululyklaryň ählisiniň harp belgilerine 2-lik san belgili indeks goýulýar. Meselem: U_2, I_2, R_2, Q_2 we ş.m.

Uly kuwwatly energiýa ulgamlarynda üçfazaly toklary transformirmek üçin üç sany birmeňzeş birfazaly transformatorlar ulanylýar. Orta we pes kuwwatly energiýa ulgamlarynda bolsa ykdysady taýdan arzan düşýändigine sebäpli, üç faza üçin umumy magnitgeçirijisi bolan üçfazaly transformatorlar ulanylýar. Üçfazaly transformatorlar üç sany birfazaly transformatoryň konstruktiw birleşmesi bolup, ol şahalanýan magnit geçirijiden we üç sany birinji hem-de üç sany ikinji sarymlardan ybaratdyr (*1.2-nji surat*).



1.2-nji surat. Üçfazaly transformatoryň elektromagnit shemasy

Magnit geçirijiniň sarymlar ýerleşdirilýän bölegine steržen diýiliýär. Sarym ýerleşdirilmedik bölegine bolsa ýarmo diýilýär.

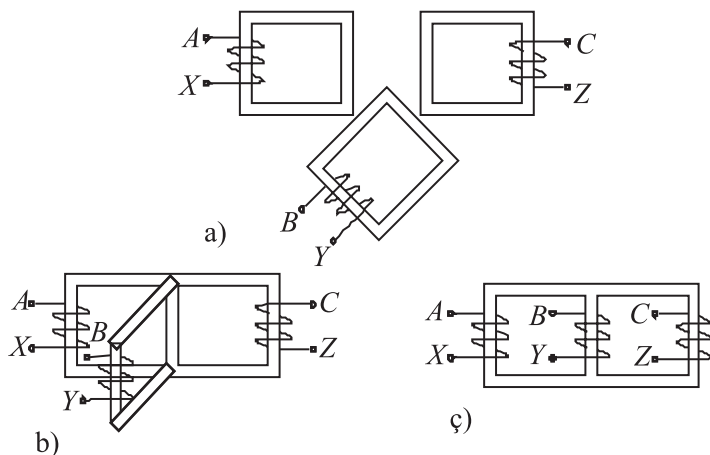
Magnit geçiriji sterženleriň her birinde şol bir faza degişli biri-birinden we sterženlerden izolirlenen birinji we ikinji sarymlar ýerleşýär. Adatça, pes naprýaženiýeli sarymlar magnitlendiriji sterženlerde ilki ýerleşdirilýär. Soňra olaryň üstünden ýokary naprýaženiýeli sarymlar ýerleşdirilýär. Önümçilikde

üçfazly toklary transformirmek üçin ulanylýan birfazly we üçfazly transformatolaryň ýokary hem-de pes naprýaženiýeli sarymlary “Ýyldyz” ýa-da “Üçburçluk” görnüşinde birikdirilýär.

1.2-nji suratda ýokary we pes naprýaženiýeli sarymlary “Ýyldyz” görnüşli birikdirilen üçfazly transformatoryň elektromagnit shemasy görkezilendir. Faza sarymlaryň birikdiriliş toparlary drob görnüşinde görkezilýär. Meselem: Y/Y ; Y/Δ ; Δ/Δ we ş.m. Drobun sanawjysynda ýokary naprýaženiýeli sarymlaryň, maýdalawjysynda bolsa pes naprýaženiýeli sarymlaryň birikdirilişi topary görkezilýär. Ýokary we pes naprýaženiýeli sarymlardaky biratly liniýa naprýaženiýeleriniň biri-biri bilen fazalary boýunça gabat gelýändigini ýa-da tapawutlanýandygyny görkezmek üçin bir san belgisi 30° -a deň bolan 0-dan 11-e çenli sanlar ulanylýar. Ýagny bu sanlar drobun yzyna kese çyzyk bilen ýazylýar. Meselem: $Y/\Delta-11$; Y/Y_0-0 .

Sarymlaryň birikdirilişiniň dürli shemalary transformatorlar ulanylýan wagtynda düşnüksizlik döretmezligi üçin döwlet standarty tapyndan Y/Y_0-0 , $Y/\Delta-11$ we Δ/Y_0-11 görnüşdäki üç sany birikdiriliş topary bilen çäklenilýär. Bu ýerde Y_0 ýyldyzyň aşagyndaky „0“ bellik transformatoryň sarymlarynyň neýtral nokadynyň korpusynyň daşyna çykarylandygyny görkezýär. Transformatoryň fazalarynyň dogry birikdiriliş toparyny üpjün etmek üçin ýokary naprýaženiýeli sarymlarynyň başlanýan we gutarýan uçlary A, B, C we X, Y, Z harplar bilen, pes naprýaženiýeli sarymlaryň başlanýan we gutarýan uçlary a, b, c we x, y, z harplar bilen belgilenilýär. Bu sarymlaryň başlanýan we gutarýan uçlary transformatoryň korpusynyň ýokarsyna farfor izolýatorlar arkaly çykarylýar.

Transformatora goýlan U_A, U_B, U_C faza naprýaženiýeleriň täsiri astynda, onuň birinji sarymlaryndan geçýän I_A, I_B, I_C toklar magnit geçiriji sterženlerde Φ_A, Φ_B, Φ_C magnit akymalaryny döredýärler. Bu akymlar öz ululyklary boýunça deň, emma fazalary boýunça biri-birinden 120° -a tapawutlanmagy transformatorlaryň magnitgeçirijisini üç sterženli gurnamaga mümkinçilik berýär. Ýagny üç sany birfazly transformatoryň sterženlerini (1.3-nji a surat) umumy bir steržene birikdirilen wagtynda (1.3-nji b surat) bu steržendäki magnit akymy islendik pursatda nola deň bolýar ($\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$) we onuň üstünden hiç hili magnit akymy geçmeýär.



1.3-nji surat. Bir (a) we üç (b, c) fazaly transformatorlaryň elektromagnit shemalary

Şeýlelikde, transformatoryň magnit geçirijisini üç sterženli konstruktirlämäge mümkinçilik döredýär. Ulanylyş wagtynda transformatorlaryň sarymlaryndan we magnit geçirijisinden bölünip çykýan ýylylygy aýyrmak üçin transformatorlar ýörite içine mineral ýag guýlan, daşy radiator görnüşli turbalar bilen üpjün edilen sowadyjy gabyň içinde ýerleşdirilýär. Mineral ýag diňe transformatory sowatmak bilen çäklenmän, eýsem onuň elektrik izolýasiýasyny hem ýokarlandyrýar. Transformatoryň temperaturasynyň daşky sredanyň temperaturasyna we onuň sarymlarynyň üstünden geçýän toguň ululygyna bagly üýtgemegi mineral ýagyň göwrüminiň üýtgemegine getirýär. Şonuň üçin kuwwaty 100 kW·A-dan kiçi bolan transformatorlara ýag guýlanda onuň gaby doldurylman guýulýar. Kuwwatly transformatorlaryň gaby bolsa tutuşlygyna ýagdan doldurylýar we ýagyň giňelmegi üçin onuň gabynyň ýokarsynda arasy turba bilen baglanyşykly aýratyn gap goýulýar. Bu gabyň göwrümi transformatora guýlan ýagyň göwrüminiň takmynan ondan bir (1/10) bölegini tutýar we gapda ýagyň derejesine gözegçilik etmek üçin ýörite abzal goýulýar.

Transformatoryň sarymlarynyň ýa-da onuň sargylarynyň duýdamsyz gysga birleşmegi netijesinde bölünip çykýan köp mukdardaky ýylylyk mineral ýagyň dargamagyna we onuň netijesinde döreýän gazyň transformatoryň gabynyň diwarlaryna döredýän basyşyny

azaltmak maksady bilen, ol içi ýukajyk membrana görnüşli perde bilen örtülen goraýjy turba bilen üpjün edilýär. İçine mineral ýag guýlan transformatorlaryň ýanmak we ýarylmak howpunyň barlygy sebäpli, olar gurnalanda ýaşayyş jaýlaryndan aýratyn ýerde ýerleşdirilýär. Eger-de olar jaýlaryň içinde ýerleşdirilýän bolsa, onda betondan ýasalan ýörite oýjagazlaryň içinde ýerleşdirilýär.

Transformatorlaryň pasportlarynda olaryň kysymy, birikdiriliş shemalary we S_n , U_{1n} , U_{2n} , $i_0\%$, P_0 , $u_{g.u}\%$ – nominal ululyklary görkezilýär. Bu ýerde $S_n = \sqrt{3}U_{1n} \cdot I_{1n} \approx \sqrt{3}U_{2n} \cdot I_{2n}$ – transformatoryň nominal doly kuwwaty.

U_{1n} we U_{2n} transformatoryň islendik birikdiriliş shemasynda, onuň birinji we ikinji sarymlarynyň liniýa naprýaženiýeleri. P_0 we $P_{g.u}$ transformatoryň magnit we elektrik ýitgileridir. $u_{g.u}\%$ – gysga utgaşmanyň $U_{g.u}$ naprýaženiýesiniň U_{1n} nominal naprýaženiýä görä görterimlerde alnan ululygy $\left(u_{g.u}\% = \frac{U_{g.u}}{U_{1n}} \cdot 100\right)$, i_0 – boş iş toguň ot-nositel ululygy $\left(i_0\% = \frac{I_0}{I_{1n}} \cdot 100\right)$.

Transformatoryň birinji sarymyna goýlan, üýtgeýän u_1 naprýaženiýäniň täsirinde onuň üstinden geçýän i_1 tok bu sarymda üýtgeýän magnit meýdanyny döredýär. Ýagny üýtgeýän toguň çeşmesinden alynýan elektrik energiýasy bu sarymda magnit meýdanynyň energiýasyna öwrülýär. Magnit akymynyň esasy bölegi transformatoryň ýapyk magnitgeçirijisi boýunça hereket edip, onuň sarymlarynyň sargylaryny kesip geçýär we olarda degişlilikde e_1 we e_2 elektrik hereketlendiriji güýçleri indusirleýär.

Eger-de transformatoryň ikinji sarymyna ýük birikdirilen bolsa, onda e_2 elektrik hereketlendiriji güýji bu zynjyrdaky i_2 togy döredýär. Ýagny magnit meýdanynyň energiýasy elektrik energiýasyna öwrülýär. Şeýlelikde, transformatoryň çeşmeden alýan elektrik energiýasy onuň birinji sarymyndan ikinji sarymyna üýtgeýän magnit meýdany arkaly geçirilýär.

Fizika kursundan belli bolşy ýaly, transformatoryň sarymlarynda indusirlenýän e_1 we e_2 elektrik hereketlendiriji güýçleriň ululyklary

magnit akymynyň üýtgemek tizligine ($d\Phi/dt$) we sarylaryň sargy sanyna (w) göni baglydyr. Olar deňişlilikde aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

e_1 we e_2 elektrik hereketlendiriji güýçleriň gatnaşygyna transformatoryň transformasiýa koeffisiýenti diýilýär we ol K harpy bilen bellenilýär:

$$K_{12} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.1)$$

Bu koeffisiýent transformatora goýlan naprýaženiýäniň näçe esse ýokarlandyrylýandygyny ýa-da peseldilýändigini görkezýär.

1.2. Transformatoryň boş iş düzgüni

Boş iş düzgüninde transformatoryň ikinji sarymyna hiç-hili ýük birikdirilmeýär, ýagny ol açyk goýulýar. Onuň birinji sarymy bolsa, U_1 naprýaženiýeli üýtgeýän toguň çeşmesine birikdirilýär. U_1 naprýaženiýäniň täsiri netijesinde birinji sarymdan transformatoryň boş iş togy diýlip atlandyrylýan I_0 tok geçýär. Adatça, bu toguň ululygy transformatorlar konstruktirlenende onuň nominal togunyň $2,5 \div 10\%$ -inden köp bolmaz ýaly edilýär, ýagny $I_0 = (0,025 \div 0,1) I_{1n}$. Bu toguň döredýän magnit akymynyň transformatoryň ýapyk magnit geçirijisiniň üsti boýunça geçýän bölegine baş magnit akymy diýilýär we ol Φ harpy bilen belgilenýär. Bu akym transformatoryň birinji we ikinji sarylarynda E_1 we E_2 elektrik hereketlendiriji güýji indusirleýär. Magnit akymynyň, birinji sarymy gurşap alan howanyň üsti boýunça geçýän bölegine ýaýraýan magnit akymy diýilýär we $\Phi_{\delta 1}$ bilen belgilenilýär. Bu akym diňe birinji sarymyň sargylaryny kesip geçýär we ol ýerde $E_{\delta 1}$ elektrik hereketlendiriji güýji indusirleýär. Ýaýraýan $\Phi_{\delta 1}$ magnit akymynyň geçýän ýolunyň esasy böleginiň howanyň üstündeligi sebäpli, onuň ululygy baş magnit akymynyň ululygyndan örän

kiçidir. Şeýle-de $\Phi_{\delta 1}$ akymy I_0 toga göni baglydyr. Baş magnit akymy bilen I_0 toguň arasynda bolsa beýle göni baglanyşyk ýokdur.

Transformatorlarda bolýan hadysalary häsiýetlendirýän ululyklaryň özara gatnaşyklaryny aýdyň görkezmek üçin, köplenç ýagdaýlarda, diagramma gurulýar. Beýgeldiji transformatoryň boş iş düzgüni üçin hil taýdan gurlan diagrammasy 1.4-nji *a* suratda görkezilendir.

Diagramma gurlanda onuň daýanjy hökmünde birinji we ikinji sarymlar üçin umumy bolan amplituda ululygy $\Phi_m = U_1 / 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1$ bolan baş magnit akymy alynýar we beýleki ululyklaryň ählisi Φ_m -e görä gurulýar. $\Phi_{\delta 1}$ ýaýraýan magnit akymynyň geçýän ýolunyň esasy böleginiň howanyň üstündenligi sebäpli, ol özüniň fazasy boýunça I_0 tok bilen gabat gelýär. Emma transformatoryň magnit geçirijisiniň ýukajyk polat plastinkalardan taýýarlanylýandygyna garamazdan, onda köwlenme toklaryň täsirinde döreýän magnit ýitgileri Φ magnit akymynyň öz fazasy boýunça I_0 tokdan örän ujypsyz δ burça yza galmagyna getirýär.

Transformatoryň sarymlarynda indusirlenýän e_1 we e_2 elektrik hereketlendiriji güýçleriň ululyklarynyň magnit akymynyň üýtgemek tizligine baglydygy sebäpli, E_1 we E_2 öz fazalary boýunça Φ -den 90° yza galýandygy aşakdaky görnüşde subut edilýär:

$$\begin{aligned}
 e_1 &= -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -w_1 \frac{d}{dt} (\Phi_m \sin \omega t) = \\
 &= -w_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f w_1 \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \\
 &= E_{1m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \\
 e_2 &= -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = 2\pi f w_2 \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \\
 &= E_{2m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \tag{1.2}
 \end{aligned}$$

bu ýerde $E_{1m} = 2\pi f w_1 \Phi_m$, $E_{2m} = 2\pi f w_2 \Phi_m$ – degişlilikde transformatoryň birinji we ikinji sarymlarynda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjüň amplituda ululyklarydyr.

Elektrik hereketlendiriji güýçleriň täsir ululyklary deňşilikde:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m; \quad E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m. \quad (1.3)$$

$E_{1\delta}$ elektrik hereketlendiriji güýç bolsa öz gezeginde $\Phi_{1\delta}$ ýaýraýan magnit akymyndan 90° burça yza galýar.

Transformatoryň boş iş düzgüninde ikinji sarymyndan tok geçmeýänligi üçin onuň gysgyçlarynyň arasyndaky U_{20} naprýaženiýe ikinji sarymda indusirlenýän E_2 elektrik hereketlendiriji güýje deňdir.

Kirhgofuň ikinji kanunyna görä, real transformatoryň birinji sarymyna goýlan U_1 naprýaženiýe bu sarymda baş magnit akymy tarapyndan indusirlenen E_1 elektrik hereketlendiriji güýji, ýaýraýan magnit akymy tarapyndan indusirlenen $E_{1\delta}$ elektrik hereketlendiriji güýji we onuň R_1 aktiw garşylygyndaky naprýaženiýäniň peselmegini deňagramlaşdyrýar, ýagny:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 - \underline{E}_{1\delta} + R_1 \underline{I}_0. \quad (1.4)$$

Ýaýraýan magnit akymynyň täsirinde döreýän $E_{1\delta}$ elektrik hereketlendiriji güýji birinji sarymyň x_1 induktiw garşylygyndaky naprýaženiýäniň peselmesi bilen çalşyryp:

$$\underline{E}_{1\delta} = -jx_1 \cdot \underline{I}_0. \quad (1.5)$$

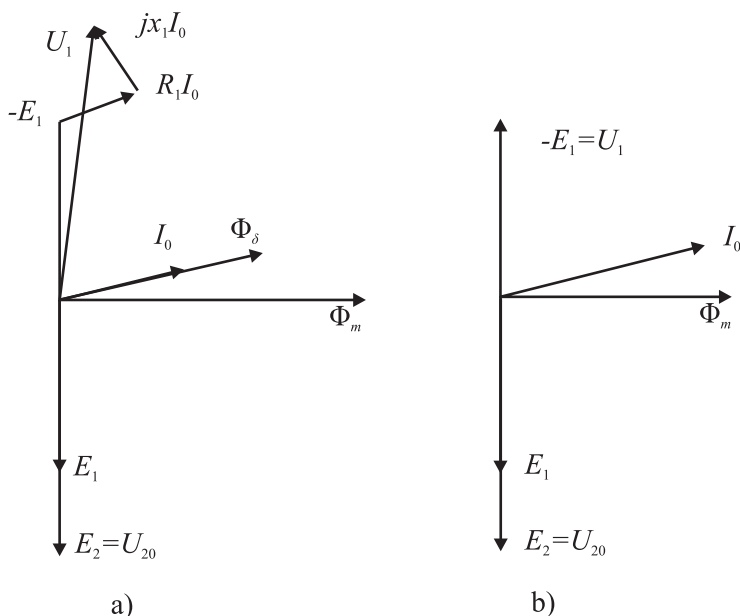
(1.4) deňlemäni aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + jx_1 \cdot \underline{I}_0 + R_1 \underline{I}_0. \quad (1.6)$$

1.4-nji suratdaky diagrammada U_1 naprýaženiýe (1.6) deňlemäniň esasynda gurulýar.

Real transformatorlarda $R_1 I_0$ we $x_1 I_0$ ululyklaryň U_1 naprýaženiýäniň örän ujypsyz bölegini düzýänligi sebäpli, köplenç ýagdaýlarda, $U_1 \approx E_1$ diýip kabul edilýär we önümçilikde transformatoryň transformasiýa koeffisiýenti $K_{12} = U_1 / U_{20}$ görnüşde kesgitlenýär.

Ýokarda aýdylanlary hasaba alyp, transformatoryň boş iş düzgüni üçin gurlan diagramma 1.4-nji *b* suratda görkezilendir.



1.4-nji surat. Transformatoryň boş iş düzgüni üçin gurlan takyk (a) we ýakynlaşan (b) diagrammalar

Transformatoryň boş iş düzgünindäki energiýanyň ýitgileri

Transformatoryň magnit geçirijisindäki ýüze çykýan energiýanyň ýitgilerine magnit ýitgileri diýilýär we olar takmynan transformatoryň nominal kuwwatynyň 0,1÷2 %-ini düzýär. Magnit ýitgileri gisterezis hadysasy we köwlenme toklaryň netijesinde ýüze çykýar. Gisterezis sebäpli ýüze çykýan ýitgileri magnit akymynyň f ýygylgyna we magnit induksiýanyň kwadratyna göni baglydyr ($P_{gis} \rightarrow fB^2$), köwlenme toklary sebäpli ýüze çykýan energiýanyň ýitgileri f ýygylgynyň we magnit induksiýanyň kwadratlaryna ($P_{köw} \rightarrow f^2 B^2$) göni baglydyr. Senagat ýygylgynynda ($f = 50$ Gs) işleýän transformatorlaryň magnit geçirijileriniň aýratyn bölegindäki magnit ýitgiler elektrotehniki poladyň aktiw kese-kesiginiň meýdany (Π), magnit induksiýasy (B) we poladyň massasy (m) arkaly aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$P_{mag} = P_{gist} + P_{köw} = \Sigma \rho_{1,0/50} \cdot B^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} \cdot m,$$

bu aňlatmada $\rho_{1,0}/_{50} - \frac{\text{Wt}}{\text{kg}} -$ elektrotehniki poladyň $f = 50$ Gs ýygylkda we $B = 1$ Tl induksiýadaky udel ýitgisi. Magnit akymynyň we induksiýanyň ululyklarynyň transformatoryň U_{1n} nominal naprýaženiýesine göni baglydygy ($U_{1n} \approx E_1 = 4,44 w_1 f \Phi_m = 4,44 w_1 f B \Pi$) sebäpli, transformatoryň boş iş we nominal iş düzgünlerindäki magnit ýitgiler takmynan özara deňdirler. Transformatoryň I_0 boş iş togunyň onuň nominal tokdan örän kiçiligi ($I_0 = (0,025 \mid 0,1) I_{1n}$) sebäpli, amaly hasaplamalarda boş iş düzgünindäki energiýanyň ýitgileri magnit ýitgilerine deň diýip kabul edilýär. P_m magnit ýitgisi bolan transformator setden $P = U_{1n} \cdot I_{0,a}$ aktiw kuwwaty alýar.

Boş iş toguň aktiw düzüjisi:

$$I_{0,a} = \frac{P_m}{U_{1n}} \quad (1.7)$$

öz fazasy boýunça U_{1n} naprýaženiýe bilen gabat gelýär we ol fiktiw (hakyky däl) R_{12} garşylygyň üsti arkaly aşadaky görnüşde ýazylýar:

$$I_{0,a} = \frac{U_{1n}}{R_{12}}. \quad (1.8)$$

(1.7) we (1.8) aňlatmalary özara deňeşdirip alarys:

$$\frac{P_m}{U_1} = \frac{U_1}{R_{12}} \Rightarrow R_{12} = \frac{U_1^2}{P_m}. \quad (1.9)$$

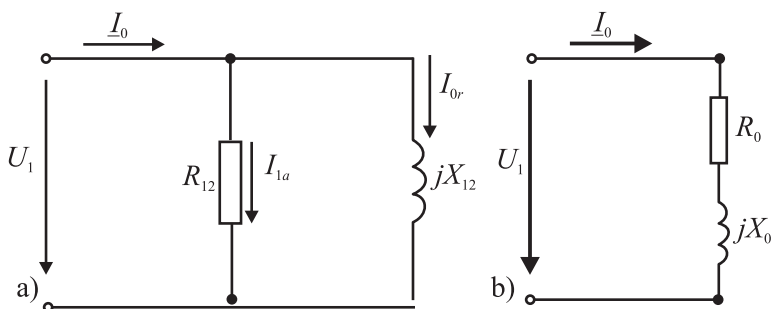
Boş iş düzgüninde transformatoryň setden alýan I_0 togy I_{0a} aktiw we I_{0r} reaktiw düzüjilerden ybaratdyr.

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_{0a} + \underline{I}_{0r} = \frac{U_1}{R_{12}} + \frac{U_1}{jX_{12}} = \underline{Y}_0 \cdot \underline{U}_1. \quad (1.10)$$

(1.10) aňlatmadaky \underline{Y}_0 kompleks geçirijilik özara parallel birikdirilen R_{12} we jX_{12} garşylykly zynjyra degişlidir:

$$\underline{Y}_0 = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{jX_{12}}. \quad (1.11)$$

Transformatoryň boş iş düzgünindäki magnit ýitgileri bilen baglanyşykly prosesleri görkezýän çalşyрма shemasy 1.5-nji suratda görkezilendir.



1.5-nji surat. Transformatoryň boş iş düzgüni üçin çalşyрма shemasy (a) we onuň ýönekeýleşdirilen shemasy (b)

Amaly hasaplamalarda 1.5-nji *a* suratdaky shemanyň ýerine 1.5-nji *b* suratdaky shemany ulanmak has amatlydyr. Bu shemada transformatoryň boş iş düzgünine onuň 1-nji sarymynyň doly garşylygy:

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0. \quad (1.12)$$

Indi 1.5-nji *a* we *b* suratdaky shemalaryň düzümindäki R_{12} , X_{12} we R_0 , X_0 garşylyklaryň arasyndaky baglanyşyklaryň alnyşyna seredeliň:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_0 = R_0 + jX_0 &= \frac{1}{\underline{Y}_0} = \frac{1}{\frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{jX_{12}}} = \frac{1}{\frac{R_{12} + jX_{12}}{R_{12} \cdot jX_{12}}} = \\ &= \frac{R_{12} \cdot jX_{12}}{R_{12} + jX_{12}} = \frac{(R_{12} \cdot jX_{12})(R_{12} - jX_{12})}{(R_{12} + jX_{12})(R_{12} - jX_{12})} = \\ &= \frac{R_{12}^2 \cdot jX_{12} - R_{12} \cdot j^2 X_{12}^2}{R_{12}^2 + R_{12} \cdot jX_{12} - R_{12} \cdot jX_{12} - j^2 X_{12}^2} = \frac{R_{12} \cdot X_{12}^2}{R_{12}^2 + X_{12}^2} + \frac{R_{12}^2 \cdot jX_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2}. \end{aligned}$$

Bu ýerden:

$$R_0 = R_{12} \frac{X_{12}^2}{R_{12}^2 + X_{12}^2}, \quad jX_0 = X_{12} \frac{R_{12}^2}{R_{12}^2 + X_{12}^2}.$$

Transformatoryň boş iş düzgüninde $I_{0a} \ll I_{0r}$ sebäpli $R_{12} \gg X_{12}$ hasaba alyp ýazyp bileris:

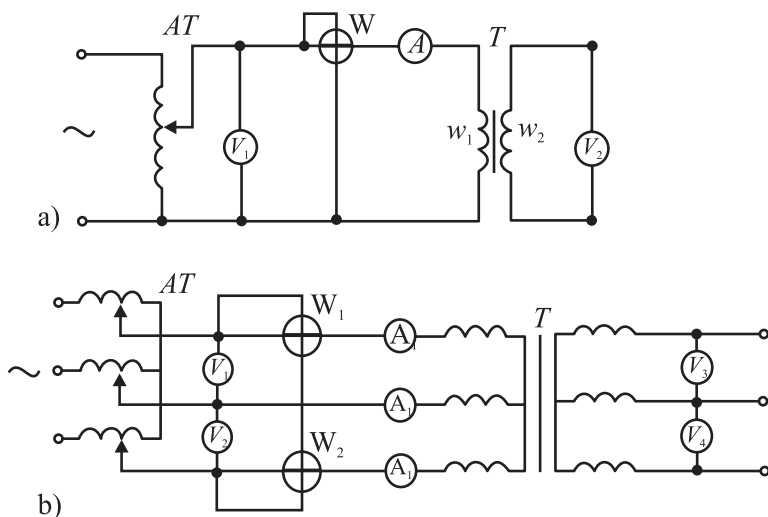
$$R_0 \approx \frac{X_{12}^2}{R_{12}}; \quad X_0 \approx X_{12}. \quad (1.13)$$

X_0 garşylyga transformatoryň 1-nji sarymynyň baş induktiw garşylygy diýilýär. R_0 garşylyk bolsa transformatoryň magnit ýitgilerini görkezýän fiktiw garşylykdyr. 1.5-nji *b* suratdaky çalşyрма shemadan peýdalanyň magnit ýitgileri: $P_m = R_0 \cdot I_0^2$; U_1 naprýaženiýesiniň aktiw we reaktiw düzüjilerini $R_0 \cdot I_0$ we $X_0 \cdot I_0$ görnüşde ýazyp bileris. U_1 naprýaženiýe bilen I_0 toguň arasyndaky baglanyşyk:

$$\underline{U} = -\underline{E}_1 + \underline{Z}_0 \cdot \underline{I}_0. \quad (1.14)$$

Transformatoryň magnit ýitgilerini, transformasiýa koeffisiýentini, çalşyрма shemanyň magnitlendiriji şahasynyň R_0 ; X_0 elementleriniň ululyklaryny kesgitlemek we onuň magnit hem-de boş iş häsiýetnamalaryny derňemek üçin boş iş tejribesi geçirilýär.

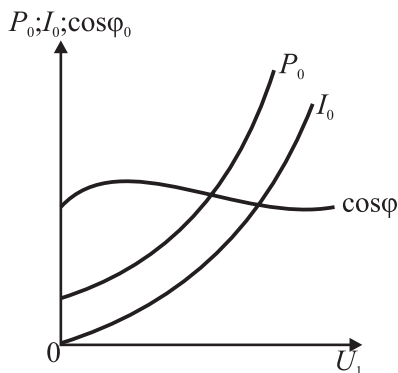
Bir we üçfazly transformatorlarda boş iş tejribeleri geçirmek üçin niýetlenen shemalar 1.6-njy suratlarda görkezilendir.



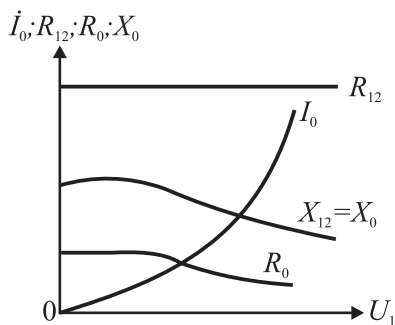
1.6-njy surat. Birfazaly (a) we üçfazly (b) transformatorlaryň boş iş tejribesini geçirmek üçin shemalar

Boş iş tejribäni geçirmek üçin transformatoryň ikinji sarymyna diňe V_2 woltmetr birikdirilýär we AT awtotransformator arkaly onuň birinji sarymyna $U_1 = 0$ -dan başlap tä $U_1 = U_{1n}$ -e çenli naprýaženiýele-

riň dürli ululyklaryna goýulýar. Elektrik ölçeg abzallaryň U_1 naprýaženiýäniň dürli ululyklarynyň degişli görkezmeleri alynýar we olar boýunça transformatoryň $I_0 = f(U)$; $P_0 = f(U_1)$; $\cos \varphi = f(U)$ boş iş häsiýetnamalary düzülýär (1.7-nji surat). $U_1 = U_{1n}$ naprýaženiýede elektrik ölçeg abzallaryň görkezmeleri boýunça transformatoryň çalşyrma shemasynyň magnitlendiriji şahasynyň R_0 we X_0 elementleriniň garşylyklary kesgitlenilýär (1.8-nji surat).



1.7-nji surat.
Transformatoryň
boş iş häsiýetnamalary



1.8-nji surat. Çalşyrma shemasynyň
 R_0 ; X_0 ; R_{12} garşylyklarynyň we I_0
boş iş toguň U_1 naprýaženiýe
baglanyşyklary

Transformatoryň ikinji sarymyna ýük birikdirilmedik wagty ($I_2 = 0$) zynjyryň giriş garşylygy:

Birfazaly transformator üçin: $Z_0 = \frac{U_1}{I_0}$.

Üçfazaly transformator üçin: $Z_0 = \frac{U_{1L}}{\sqrt{3} \cdot I_0}$.

Bu aňlatmada: $I_0 = \frac{I_{A0} + I_{B0} + I_{C0}}{3}$.

Magnitlendiriji şahanyň aktiw garşylygy:

Birfazaly transformator üçin: $R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}$.

Üçfazaly transformator üçin: $R_0 = \frac{P_0}{3I_0^2}$.

Bu aňlatmada: $P_0 = P_1 \pm P_1$, $I_0 = \frac{I_{A0} + I_{B0} + I_{C0}}{3}$.

Şahanyň reaktiw garşylygy: $X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$.

R_0 ; X_0 ; X_{12} ; R_{12} garşylyklaryň we I_0 boş iş toguň U_1 naprýaženiýe baglanyşygynyň grafigi 1.8-nji suratda görkezilendir. Görnüşi ýaly, R_0 we X_0 garşylyklaryň ululyklary U_1 naprýaženiýä baglydyr:

$X_0 = X_{12}$ garşylyklar $\frac{U_1}{I_0}$ gatnaşyga, R_0 garşylyk bolsa $\left(\frac{U_1}{I_0}\right)^2$ gatnaşygyň kwadratyna baglydyr. R_{12} garşylygyň ululygy U_1 naprýaženiýä bagly däl diýen ýalydyr.

Boş iş tejribä transformator çatylan wagtynda onuň magnitgeçirijisiniň taýýarlanylşyna tehniki gözegçilik etmegiň serişdesi hökmünde hem seredilýär. Ýagny I_0 toguň we magnit ýitgileriň ululyklary arkaly transformatoryň magnitgeçirijisi üçin ulanylan materialyň hiline, serdeçnigiň kese-kesiginiň meýdanynyň we transformatoryň birinji sarymynyň sargy sanlarynyň dogry saýlanylyp alnyşyna baha berilýär.

Şeýle-de shemadaky V_1 we V_2 woltmetrlar arkaly transformatoryň transformasiýa koeffisiýenti kesgitlenilýär:

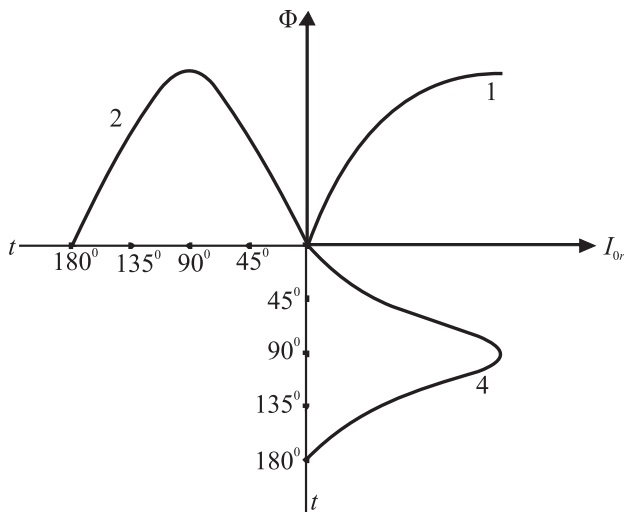
$$k_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Üçfazly transformatoryň boş iş häsiýetnamalaryny gurmak üçin U_1 faza naprýaženiýeleriň we I_0 faza toklaryň ortaça ululyklary alynýar. P_0 kuwwat bolsa W_1 we W_2 wattmetrleriň görkezmeleri boýunça $P_0 = P_1 \pm P_1$ görnüşde hasaplanylýar („+“ alamat wattmetrleriň peýkamjygy saga gyşaran ýagdaýy, „-“ alamat wattmetrleriň peýkamjygynyň biriniň çepi gyşaran ýagdaýy).

Sterženleri bir tekizlikde ýerleşýän üçfazly transformatorlaryň magnit ulgamynyň simmetrik ýagdaýynyň ýoklugy sebäpli, olaryň faza togy özara birdeň bolmaýar. Ýagny transformatoryň aralyk sterženi üçin magnit akymyň hasaplama l_B uzynlygyň çetki sterženleriň l_A we l_C uzynlyklaryndan gysga bolmagy sebäp bolýar. 1.7-nji suratdaky $I_0 = f(U_1)$ baglanyşygyň grafiginden görnüşi ýaly, I_0 tok ilki başda U_1 naprýaženiýä görä gönüçyzykly baglanyşyk boýunça ösýär. Soňra

I_0 tok U_1 naprýaženiýä görä has çalt ösüp başlaýar. Bu hadysa magnit akymynyň U_1 naprýaženiýä göni baglydygy ($U_{1n} \approx E_1 = 4,44 w_1 f \Phi_m$) we magnit akymynyň ululygynyň ösmegi bilen magnit zynjyrynyň magnit taýdan doýgun ýagdaýa barýanlygy bilen düşündirilýär. Ýagny magnit zynjyrynyň doýgun ýagdaýda bolmagy magnit akymyny döretmek üçin gerek bolýan magnitlendiriji toguň has çalt ösmegine getirýär. Kuwwat koeffisiýentiniň $\cos \varphi_0 = f(U_1)$ grafiginden görnüş i ýaly, naprýaženiýäniň ösmegi bilen $\cos \varphi_0$ ululygyň peselmegi I_0 toguň U_1 naprýaženiýeden has çalt ösýänligi bilen düşündirilýär. Magnitgeçirijisi ferromagnit materiallardan taýýarlanylýan transformatorlaryň magnit taýdan doýgun ýagdaýa barmagy, Φ magnit akym bilen boş iş toguň $I_{0,r}$ magnitlendiriji düzüjisiniň arasynda göni baglanyşygyň saklanylmazlygyna getirýär. Bu bolsa öz gezeginde Φ we I_0 ululyklarynyň biriniň wagta görä sinusoidal kanun boýunça üýtgände, beýleki biriniň bu kanun boýunça üýtgemezligine sebäp bolýar.

Goý, birfazaly transformatorlaryň birinji sarymyna sinusoidal U_1 naprýaženiýe goýlan bolsun. Φ magnit akym U_1 naprýaženiýe göni baglydygy sebäpli, ol hem wagta görä sinusoidal kanun boýunça üýtgeýär. I_0 magnitlendiriji toguň $I_{0,r}$ reaktiw düzüjisiniň wagta görä üýtgeýşine düşünmek üçin 1.9-njy suratda görkezilen grafikden peýdalanyň.

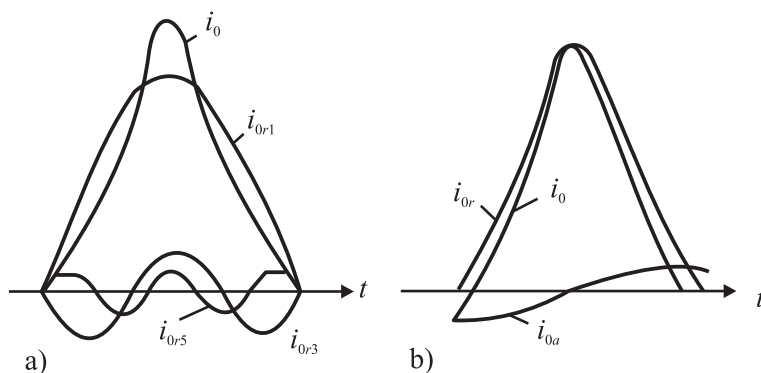


1.9-njy surat. Birfazaly transformatoryň magnit häsiýetnamasy (1), magnit akymynyň (2) we magnitlendiriji toguň (4) wagta görä üýtgeýiş grafikleri

Koordinatalar ulgamynyň 1-nji kwadrantyna Φ magnit akymynyň I_{0r} magnitlendiriji toguň reaktiw düzüjisine bolan baglanyşygyň, 2-nji kwadrantda magnit akymynyň wagta görä ($\Phi = f(t)$) üýtgeýşiniň grafikleri görkezilendir.

I_{0r} toguň wagta görä üýtgeýşini bilmek üçin $\Phi = f(t)$ grafikden Φ magnit akymynyň dürli wagat pursatlaryna degişli ululyklary $\Phi = f(I_{0r})$ baglanyşygy geçirýäris. Soňra şol wagat pursatlaryna degişli I_{0r} toklary 4-nji kwadranta geçirip, $I_{0r} = f(t)$ baglanyşyk alynýar.

Alnan $I_{0r} = f(t)$ baglanyşygyň grafiginden görnüşi ýaly, I_{0r} tok wagta görä sinusoidal kanun boýunça üýtgemeyär. Bu baglanyşyk garmoniki hatarlara dargadylanda onuň düzüminde diňe (1, 3, 5 we ş.m.) jübüt däl düzüjileriň barlygy görünýär (1.10-njy a surat).



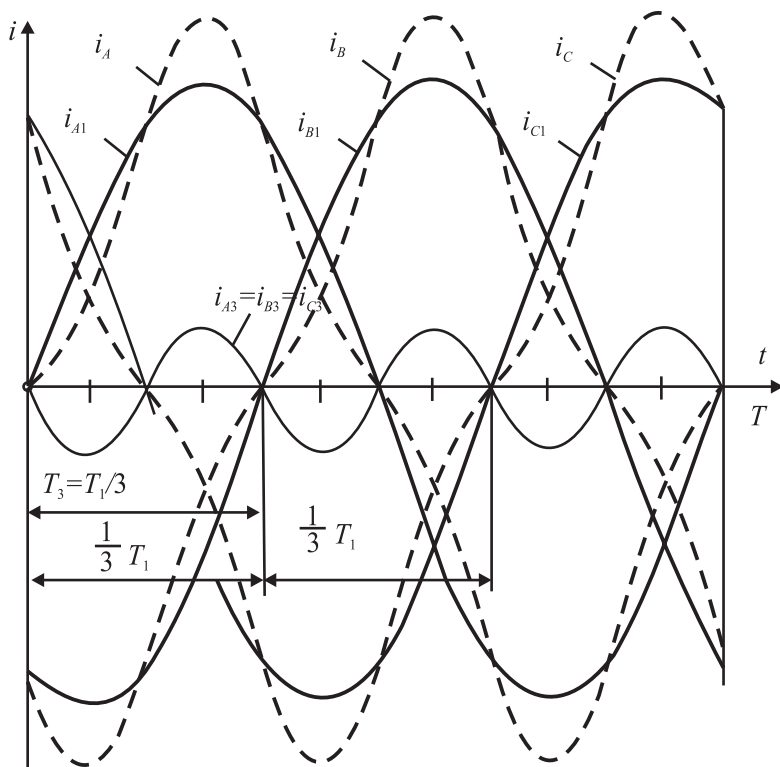
1.10-njy surat. Birfazaly transformatoryň boş iş togunyň reaktiw düzüjisiniň garmoniki hatara dargadylyşy (a) we onuň sinusoidal däl görnüşi (b)

Birfazaly transformatorlarda üçünji i_{0r3} garmonika has aýdyň ýüze çykýar. Kähalatlarda bu garmonikanyň amplituda ululygy birinji i_{0r1} garmonikanyň amplitudasynyň 50%-ne çenli ýetýär. Garmonikalaryň amplitudalarynyň ululyklary magnitgeçirijiniň doýgunlyk derejesine baglydyr. Transformatoryň boş iş togunyň i_{0a} aktiw düzüjisi sinusoidal häsiýete eýedir. Şu sebäpli i_0 tok wertikal oka görä az hem bolsa öz simmetrik ýagdaýyny saklamaýar (1.10-njy b surat).

Üçfazaly transformatorlarda i_{0r} magnitlendiriji toguň we Φ magnit akymynyň düzüminde ýokary garmonikalaryň ýüze çykmagy olaryň 1-nji we 2-nji sarymynyň birikdiriliş shemalaryna we onuň magnitgeçirijileriniň görnüşine baglydyr.

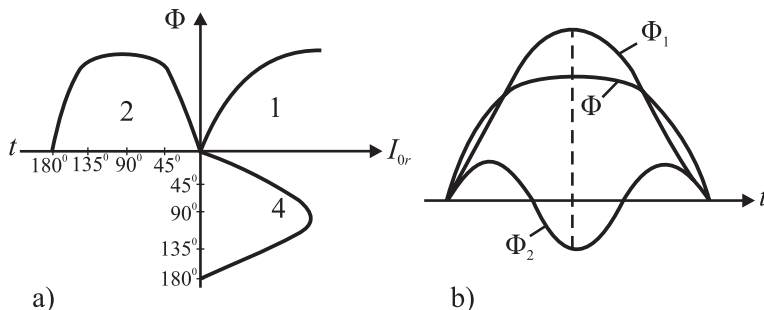
1-nji ýagdaý. Transformatorlaryň sarymlary $Y/Y - 0$ birikdirilen. Goý, transformatoryň boş iş düzgüninde onuň birinji sarymyna, liniýa naprýaženiýeleri wagta görä sinusoidal üýtgeýän sete birikdirilendir diýeliň.

Bu ýagdaýda faza naprýaženiýeler hem wagta görä sinusoidal üýtgeýärler diýip kabul edeliň. Üçfazly transformatorlarda edil bir-fazaly transformatorlarda bolşy ýaly magnitlendiriji toguň düzüminde jübüt däl ýokary garmonikalar ýüze çykýar diýip çaklamak mümkindir. Emma hakykatda bu beýle däldir. Simmetrik üçfazly toklar ulgamynda goňşy fazalaryň birinji garmonikalary biri-birinden fazalary boýunça 120° -a tapawutlanýarlar. Üçünji garmonikalaryň toklary bolsa biri-birinden $3 \cdot 120^\circ = 360^\circ$ tapawutlanýarlar ýa-da başgaça aýdylanda üçünji garmonikanyň toklary fazalary boýunça gabat gelýärler (1.11-nji surat).



1.11-nji surat. 1-nji we 3-nji garmonikanyň wagta görä üýtgeýşiniň grafikleri

Netijede, sterženleri birtokizlikde ýerleşen üçfazly transformatorlaryň sarymlary “Ýyldyz” birikdirilende 3-e kratny bolan garmonikalaryň toklary üçin ýapyk konturyň ýoklugy sebäpli olar ýüze çykyp bilmeýärler. 5-nji we 7-nji garmonikalaryň täsiriniň örän azlygy sebäpli, I_{0r} magnitlendiriji tok sinusoidal toga ýakyndyr. Emma magnitlendiriji toguň şu görnüşinde magnit akym wagta görä sinusoidal däl (ýazgyn) görnüşini alýar (1.12-nji surat).

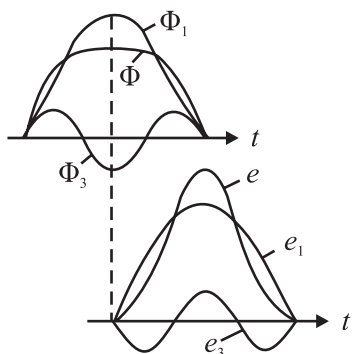


1.12-nji surat. Wagta görä sinusoidal däl üýtgeýän magnit akymynyň garmonikalara dargadylan grafikleri

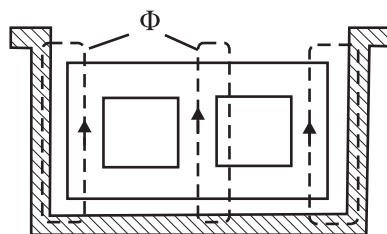
1.12-nji *a* suratda görkezilen Φ magnit akymynyň wagta görä üýtgeýişiniň grafiki aşakdaky usulda alynýar. Koordinat tekizliginiň 1-nji kwadrantynda transformatoryň $\Phi = f(I_{0r})$ magnit häsiýetnamasynyň grafiki ýerleşdirilýär. 4-nji kwadrantda $i_{0r} = f(t)$ baglanyşyk gurylýar. Soňra i_{0r} toguň wagtyň dürli pursatlaryna degişli ululyklaryny $\Phi = f(I_{0r})$ baglanyşygy düzüp, $\Phi = f(t)$ baglanyşygy alýarys.

Magnit akymynyň ýokary ýygylýkly garmonikalary edil onuň birinji garmonikasynyň magnit akymy ýaly transformatoryň birinji we ikinji sarymlarynda elektrik hereketlendiriji güýji indusirleýärler.

Elektrik hereketlendiriji güýçler degişli magnit akymyndan $\frac{\pi}{2}$ burç yza galýarlar. Eger-de 5-nji we 7-nji garmonikalary hasaba almasak, has takygy 1-nji we 3-nji garmonikalary hasaba alsak, onda sarymlarda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýçler 1.13-nji suratdaky görnüşini alarlar.



1.13-nji surat.
Magnit akymynyň
we olara degişli elektrik
hereketlendiriji güýçleriň 1-nji
we 3-nji garmoniki düzüjileri



1.14-nji surat. Sterženleri bir
tekizlikde ýerleşen üçfazaly
transformatorlarda üçünji
garmonikanyň magnit
akymynyň hereket edýän ýoly

1.13-nji suratda görkezilen e elektrik hereketlendiriji güýjüň ýiteldilen görnüşü bolup, onuň amplituda ululygy, adaty, bolmalysyndan uly bolýar. Bu bolsa transformatoryň sarymlarynyň izolýasiýasynda elektrik meýdanynyň dartgynlylygynyň ýokarlanmagyna getirýär. Netijede, ýokary naprýaženiýeli transformatoryň izolýasiýasyny e elektrik hereketlendiriji güýjüň amplituda ululygyna hasaplamaly bolýar. Ol hem öz gezeginde transformatoryň göwrüminiň we agramynyň ýokarlanmagyna getirýär. Emma transformatoryň sarymlary “Ýyldyz” görnüşli birikdirilen shemada liniýa elektrik hereketlendiriji güýçleriň faza elektrik hereketlendiriji güýçleriniň geometriki jemine deňligi sebäpli, üçünji garmonikanyň elektrik hereketlendiriji güýçleri biri-birine deňagramlaşdyrýarlar. Şol sebäpli liniýa elektrik hereketlendiriji güýçleri wagta görä sinusoidal kanun boýunça üýtgeýärler. Emma liniýa elektrik hereketlendiriji güýjüň faza elektrik hereketlendiriji güýjüne bolan gatnaşygy $\sqrt{3}$ -den tapawutlanýar.

Sarymlary Y/Y birikdirilen üçfazaly transformatorlarda magnit akymynyň düzüminde üçünji garmonikanyň bolmagy ýa-da bolmazlygy olaryň görnüşüne we gurluşyna baglydyr. Üçfazaly toklary transformirmek üçin toparlaýyn ulanylýan birlfazaly transformatorlaryň fazalarynyň her biriniň aýratyn ýapyk magnitgeçirijisiniň bar-

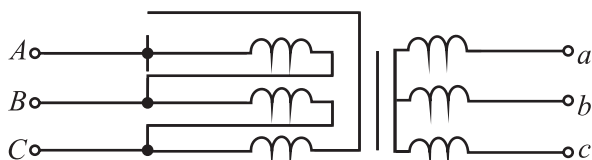
lygy sebäpli, üçünji garmonikanyň magnit akymy edil birinji garmonikanyň magnit akymy ýaly hereket edip bilýär. Edil şeýle ýagdaý bronosterženli transformatorlarda hem ýüze çykyp bilýär.

Sterženleri birtekizlikde ýerleşen üçfazaly transformatorlarda üçünji garmonikanyň magnit akymalarynyň ugurlary boýunça mydama gabat gelyändikleri sebäpli, olar magnit geçirijiler boýunça hereket edip bilmeýärler. Şu sebäpli üçünji garmonikanyň magnit akymalary howanyň, mineral ýaglaryň we transformatoryň konstruktiv elementleriniň üsti boýunça hereket edýärler (*1.14-nji surat*).

Sterženli transformatorlarda üçünji garmonikanyň magnit akymy üçin garşylygyň uly bolany sebäpli, olaryň sarymlarynda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjüň ululygy bronosterženli we birfazaly toparlaýyn birikdirilýän birfazaly transformatorlaryň üçünji garmonikasynyň elektrik hereketlendiriji güýçden has kiçidir.

Eger-de toparlaýyn birikdirilen birfazaly transformatorlaryň magnit geçirijileriniň magnit taýdan doýgun ýagdaýynda üçünji garmonikalaryň elektrik hereketlendiriji güýji birinji garmoniklaryň elektrik hereketlendiriji güýjüniň 40-50%-ni düzýän bolsa, sterženli transformatorlarda bu ululyk 5-7%-e ýetýär. Emma üçünji garmonikanyň magnit akymynyň, transformatoryň metal konstruksiýalarynyň üstünden geçýänligi sebäpli, olarda energiýanyň goşmaça ýitgileriniň döremegine sebäp bolýar. Toparlaýyn birikdirilýän birfazaly transformatorlarda ýokardaky sebäplere görä, olaryň sarymlaryny Y/Y görnüşli birikdirilmeginden gaça durýarlar. Ýagny standart boýunça olarda Y/Y birikdirmek göz önünde tutulmaýar.

2-nji ýagdaý. Transformatorlaryň birinji sarymlary “Üçburçluk” ikinji sarymlary “Ýyldyz” birikdirilen. Goý, birinji sarymlary “Üçburçluk” birikdirilen transformator sinusoidal liniýa naprýaženiýeli sete birikdirilipdir diýeliň. Bu ýagdaýda transformatoryň faza naprýaženiýesiniň liniýa naprýaženiýe deňdigi sebäpli magnit akymlar hem wagta görä sinusoidal görnüşli üýtgeýärler. Emma magnitlendiriji toklaryň düzüminde edil birfazaly transformatorlardaky ýaly jübüt däl ýokary garmonikalar ýüze çykýar. Ähli fazalarda üçünji garmonikanyň toklarynyň islendik wagtda fazalary boýunça gabat gelyändikleri sebäpli, olara “Üçburçlugyň” konturynda aýlanmaga mümkinçilik döreýär.



1.15-nji surat. Birinji sarymlary “Üçburçluk” birikdirilen transformatorlarda üçünji garmonikanyň toklary üçin konturyň emele geliş shemasy

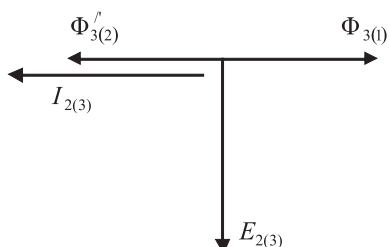
Seredilýän ýagdaýda, liniýa toklaryň, faza toklaryň geometriki tapawudyna deňligi sebäpli ($I_A = I_{AB} - I_{CA}$), olaryň düzüminde üçünji garmonikanyň toklary ýüze çykmaýar. Ýagny üçünji garmonikanyň toklary biri-birini kompensirleýär.

Üçünji garmonikalaryň transformatorlaryň pes naprýaženiýeli ikinji sarymlary neýtral simli “Ýyldyz” birikdirilende olarda üçünji garmonikanyň toklary ýüze çykan wagtynda bu toklar kabuledijileriň we neýtral simleriň emele getirýän konturyň üstünden geçýärler. Bu konturlaryň garşylyklary üçünji garmonikanyň täsiriniň azalmagyna getirýär.

3-nji ýagdaý. Transformatorlaryň birinji sarymlary “Ýyldyz”, ikinji sarymlary “Üçburçluk” birikdirilen.

Transformatorlaryň birinji sarymlary “Ýyldyz” birikdirilende olaryň toklarynyň düzüminde üçünji garmonikalar ýüze çykmaýar. Toklar wagta görä sinusoidal görnüşli üýtgeýärler. Emma magnit akymlaryň düzüminde üçünji garmonikalar ýüze çykýar.

Üçünji garmonikalaryň Φ_3 magnit akymlarynyň amplituda ululyklarynyň özara deňligi we fazalary boýunça gabat gelýänligi sebäpli, olar transformatoryň ikinji sarymlarynda ululyklary özara deň fazalary boýunça gabat gelýän $E_{2(3)}$ elektrik hereketlendiriji güýçleri indusirleýär. $E_{2(3)}$ elektrik hereketlendiriji güýçler transformatory ikinji sarymyň konturynda $I_{2(3)}$ toklary ýüze çykarýar.



1.16-njy surat. Ikinji sarymlary “Üçburçluk” birikdirilen transformatoryň üçünji garmonikalarynyň magnit akymalarynyň, elektrik hereketlendiriji güýçleriniň we toklaryň diagrammalary

Üçeldilen ýygylykly $I_{2(3)}$ toklar $E_{2(3)}$ elektrik hereketlendiriji güýçden takmynan $\varphi = 90^\circ$ yza galýar (induktiv garşylygyň ululygynyň f ýygylyga bagly bolany sebäpli). $I_{2(3)}$ tok $\Phi_{3(2)}$ magnit akymyny emele getirýär. $\Phi_{3(2)}$ magnit akymynyň öz fazasy boýunça $\Phi_{3(1)}$ magnit akymyň garşysyna ugrukdyrylýandygy sebäpli ol $\Phi_{3(1)}$ akymy kompensirlenýär (1.16-njy surat).

Şol sebäpli transformatorlar $Y/\Delta - 11$ topar boýunça birikdirilende olaryň magnit akymlyry wagta görä sinusoidal görnüşli üýtgeýärler. Ýokarda seredilen ýagdaýlardan görnüşi ýaly, transformatorlaryň haýsy hem bolsa bir sarymy “Üçburçluk” birikdirilende magnit akymlyryň, elektrik hereketlendiriji güýçleriň we naprýaženiýeleriň ululyklary wagta görä sinusoidal görnüşli üýtgarlar. Şol sebäpli önümçilikde Y/Δ ýa-da Δ/Y shemalar köpçülikleýin peýdalanylýar.

1.3. Transformatoryň ýükli iş düzgüni

Birinji sarymy U_1 naprýaženiýeli üýtgeýän toguň çeşmesine birikdirilen transformatoryň ikinji sarymyna Z_k ýük birikdirilende E_2 elektrik hereketlendiriji güýjüň täsirinde I_2 tok ýüze çykýar we ol transformatoryň ikinji sarymynda öz magnit meýdanyny döredýär. Şeýlelikde, transformatoryň ýükli iş düzgüninde baş magnit akymy birinji we ikinji sarymlaryň magnitlendiriji $w_1 I_1$; $w_2 I_2$ güýçleri tarapyndan bilelikde döredilýär:

$$w_1 \underline{I}_0 = w_1 \underline{I}_1 + w_2 \underline{I}_2 \text{ ýa-da } w_1 \underline{I}_1 = w_1 \underline{I}_0 + (-w_2 \underline{I}_2). \quad (1.15)$$

Bu deňlemä transformatoryň magnitlendiriji güýçleriniň deňlemesi diýilýär. (1.15) deňlemeden görnüşi ýaly, transformatoryň ýükli iş düzgüninde birinji sarymyň $w_1 I_1$ magnitlendiriji güýji, baş magnit akymyny emele getirýän $w_1 I_0$ we ikinji sarymyň $w_2 I_2$ magnitlendiriji güýçlerini deňagramlaşdyrýar. $w_2 I_2$ magnitlendiriji güýç birinji sarymyň $w_1 I_1$ magnitlendiriji güýjüni magnitsizlendirmäge sarp bolýar. Magnitlendiriji güýçleriň deňlemesi transformatoryň birinji we ikinji sarymlarynyň I_1 we I_2 toklarynyň arasyndaky baglanyşygy ýüze

çykarmaga mümkinçilik döredýär. Bu baglanyşygy almak üçin (1.15) deňlemäniň sag we çep taraplaryny w_1 -e bölmek ýeterlidir:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \left(-\frac{w_2}{w_1} \underline{I}_2\right) = \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2). \quad (1.16)$$

(1.16) deňlemä transformatoryň toklarynyň deňlemesi diýilýär. Bu deňlemede \underline{I}'_2 – ikinji sarymyň \underline{I}_2 togunyň döredýän magnitsizlendiriji täsirini deňagramlaşdyrýan \underline{I}_1 toguň düzüjisi bolup, oňa ikinji sarymyň togunyň birinji sarymyňka getirilen togy hem diýilýär.

(1.16) deňlemeden görnüşi ýaly, \underline{I}_1 tok, \underline{I}_0 we \underline{I}'_2 toklaryň jemine deňdir. Transformatoryň ikinji sarymynyň magnit akymy diňe birinji sarymyň magnit akymyny magnitsizlendirmek bilen çäklenmän, ol ikinji sarymda ýaýraýan $\Phi_{2\sigma}$ magnit akymyny hem döredýär. Bu akym ikinji sarymyň sargylarynda $E_{2\delta}$ elektrik hereketlendiriji güýji indusirleýär. $E_2\delta$ elektrik hereketlendiriji güýji transformatoryň ikinji sarymynyň induktiw garşylygyndaky naprýaženiýäniň peselmese görnüşinde aşakdaky ýaly ýazylyar:

$$\underline{E}_{2\delta} = -jx_2 \underline{I}_2. \quad (1.17)$$

Ýükli işleýän transformatoryň birinji we ikinji sarymlaryndaky naprýaženiýeleriň we toklaryň özara gatnaşyklaryny görkezmek üçin gurulýan diagrammanyň daýanjy hökmünde Φ baş magnit akymy alynýar. Edil transformatoryň boş iş düzgünindäki ýaly \underline{I}_0 tok öz fazasy boýunça Φ -den δ burça öňe düşýär.

Baş magnit akymy tarapyndan birinji we ikinji sarymlarda indusirlenýän \underline{E}_1 we \underline{E}_2 elektrik hereketlendiriji güýçler öz fazalary boýunça Φ -den 90° yza galýar. Transformatoryň ikinji sarymyndaky \underline{I}_2 tok bilen \underline{E}_2 elektrik hereketlendiriji güýjüň arasyndaky ýüze çykyan ψ_2 fazalar tapawudy, transformatordan iýmitlenýän Z_k ýüküň häsiýetine hem baglydyr. Şonuň üçin φ_2 burç aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

$$\varphi_2 = \arctg \frac{x_2 \pm x_k}{R_2 + R_k}. \quad (1.18)$$

Eger-de transformatora birikdirilen Z_k ýüküň aktiw-induktiv häsiýeti bar bolsa, onda x_k reaktiw garşylyk goşmak (+) alamaty bilen

alynýar. Eger-de onuň aktiw-sygym häsiýeti bar bolsa, x_k aýyrmak $(-)$ alamaty bilen alynýar.

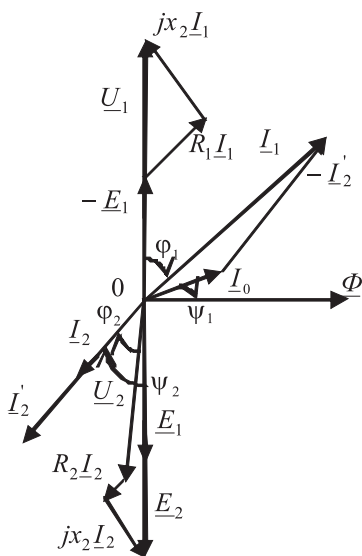
Kirhgofyň ikinji kanunyna görä, transformatoryň ikinji sarymyn-dan Z_k ýüke goýulýan U_2 naprýaženiýe Φ_2 we $\Phi_{2\sigma}$ magnit akymalary tarapyndan indusirlenýän E_2 we $E_{2\sigma}$ elektrik hereketlendiriji güýçleriň jeminden, R_2 aktiw garşylygyndaky naprýaženiýe peselmesiniň aýryl-magyna deňdir:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 + \underline{E}_{2\sigma} - R_2 \underline{I}_2. \quad (1.19)$$

Transformatoryň U_2 naprýaženiýesiniň deňlemesini $E_{2s} = -jx_2 I_2$ hasaba alyp, aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 - jx_2 \underline{I}_2 = \underline{E}_2 - Z_2 \underline{I}_2. \quad (1.20)$$

(1.20) deňlemeden görnüşi ýaly U_2 naprýaženiýäni gurmak üçin E_2 -den $R_2 I_2$ aktiw we $jx_2 I_2$ induktiw naprýaženiýeleri geometriki aýyr-mak ýeterlikdir. E_2 -den $jx_2 I_2$ -ni aýyrmak üçin E_2 -niň gutarýan ýer-in-den I_2 -ä perpendikulýar çyzyk geçirilýär



1.17-nji surat.
Transformatoryň ýükli iş düzgüni üçin gurlan diagramma

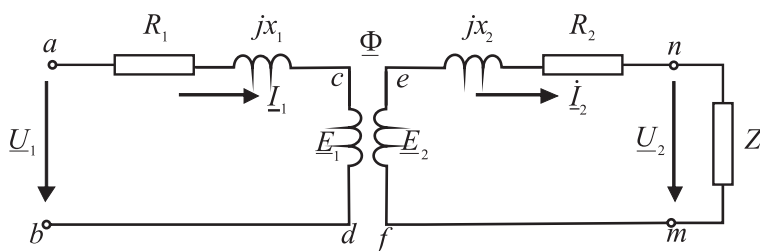
we E_2 -niň ahyryndan şu perpendikulýaryň ugry boýunça $jx_2 I_2$ gurulýar. $jx_2 I_2$ -niň başlanýan nokadyndan I_2 -ä parallel edip, $R_2 I_2$ gurulýar. $R_2 I_2$ -niň başlanýan nokadyny koordinatalar başlangyjy bilen birikdirip, U_2 naprýaženiýe alynýar.

Transformatoryň birinji sarymyn-daki I_1 togy gurmak üçin (1.16) deňlemeden peýdalanylýar. Ýagny I_1 toga I_0 we I_2' toklaryň geometriki jemi hökmünde seredilýär. U_1 -i gurmak üçin $(-E_1)$ -iň üstüne $R_1 I_1$ we $jx_1 I_1$ naprýaženiýeler goşulýar. Şu aýdylanlary hasaba alyp transformatoryň ýükli iş düzgüni üçin gurlan diagramma 1.17-nji suratda görkezilendir.

1.4. Transformatoryň çalşyрма shemasy

Transformatoryň boş we ýükli iş düzgünleri üçin gurlan diagrammalar, transformatorda bolup geçýän fiziki hadysalary häsiýetlendirýän ululyklaryň arasyndaky gatnaşyklary örän aýdyň görkezýär. Emma real transformatoryň birinji we ikinji zynjyrlaryna degişli ululyklaryň E_1 we E_2 ; U_1 we U_2 ; I_1 we I_2 we ş.m. biri-birinden örän uly tapawutlanýandyklary sebäpli, diagrammanyň kömegi arkaly olary kesgitlemek örän çylşyrymly we ol diýilýän takyklygy bermeýär. Şeýle-de, köplenç ýagdaýlarda, transformatoryň birinji sarymyna goýlan U_1 naprýaženiýe arkaly onuň ikinji sarymyna birikdirilýän dürli häsiýetli ýüklere düşýän U_2 naprýaženiýäni kesgitlemek gerek bolýar. Bu meseleleri çözmek üçin önümçilikde transformatoryň çalşyрма shemasy giňden ulanylýar.

Schema transformatoryň birinji we ikinji sarymlarynyň arasyndaky magnit baglanyşygyny elektrik baglanyşygy bilen çalşyrmak arkaly alynýar. Ýagny transformatoryň magnit akymy arkaly özara baglanyşkly iki sany aýratyn elektrik zynjyry (1.18-nji surat) bir elektrik zynjyry bilen çalşyrylýar.



1.18-nji surat. Transformatoryň özara magnit baglanyşkly elektrik shemasy

Şeýle zynjyry almak üçin, adatça, onuň ikinji sarymynyň sargy sany hasaplamak ýoly arkaly birinji sarymyň sargy sanyna deňlenýär. Şeýle ýagdaýda transformatoryň birinji we ikinji sarymlarynda induksirlenýän E_1 we E_2 elektrik hereketlendiriji güýçleriň ululyklarynyň özara deň bolmagy, sarymlarynyň elektrik shemalarynyň degişli “c” we “e” hem-de “d” we “f” nokatlaryna özara elektrik baglanyşygyny bermäge mümkinçilik döredýär.

Şeýlelikde, real transformator transformasiýa koeffisiýenti bire deň bolan transformator bilen çalşyrylýar. Çalşyрма shema alnan wagtynda ikinji sarymyň w_2 sargy sanynyň we onda indusirlenýän E_2 elektrik hereketlendiriji güýjüň ululygynyň üýtgemegi ikinji zynjyryň elektromagnit hadysalaryny häsiýetlendirýän ululyklaryň hem üýtgemegine getirýär. Şonuň üçin çalşyrmaklyk ýerine ýetirilende çalşyrylyp alnan we real transformatorlaryň ikinji zynjyryny häsiýetlendirýän ululyklaryň özara baglanyşyklary kesgitlenilende olaryň energiýa taýdan ekwiwalentliginden (real we çalşyrylan transformatorlaryň aktiw, reaktiw, doly kuwwatlarynyň we naprýaženiýeler bilen toklaryň arasyndaky fazalar tapawudynyň üýtgemän galmagundan) peýdalanylýar:

$$\begin{aligned} E_2 I_2 &= E'_2 I'_2; & U_2 I_2 &= U'_2 I'_2; \\ R_2 I_2^2 &= R'_2 (I'_2)^2; & x_2 I_2^2 &= x'_2 (I'_2)^2. \end{aligned} \quad (1.21)$$

Bu aňlatmalarda E'_2 ; U'_2 ; I'_2 ; R'_2 ; X'_2 – çalşyrylyp alnan transformatoryň ikinji sarymyny häsiýetlendirýän ululyklar we parametrler.

Real transformatoryň transformasiýa koeffisiýentini ($K = E_1 / E_2$) hasaba alyp, onuň çalşyrylýan böleginiň ululyklary we parametrleri aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$E'_2 = E_1 = K \cdot E_2; \quad (2.22)$$

$$I'_2 = \frac{E_2 \cdot I_2}{E'_2} = \frac{E_2 \cdot I_2}{K \cdot E_2} = \frac{I_2}{K}; \quad (2.23)$$

$$U'_2 = \frac{U_2 \cdot I_2}{I'_2} = \frac{K \cdot U_2 \cdot I_2}{I_2} = K \cdot U_2; \quad (2.24)$$

$$R'_2 = \frac{R_2 \cdot I_2^2}{(I'_2)^2} = \frac{K^2 \cdot R_2 \cdot I_2^2}{I_2^2} = K^2 \cdot R_2; \quad (2.25)$$

$$x'_2 = K^2 \cdot x_2; \quad (2.26)$$

$$Z'_2 = K^2 \cdot Z_2; \quad Z'_{g,u} = K^2 \cdot Z_{g,u}. \quad (2.27)$$

Ýokardaky aňlatmalar transformatoryň getirilen ululyklary arkaly onuň hakyky ululyklaryny kesgitlemek üçin hem ulanylýar.

Real transformatory shema bilen çalşyrmak üçin I_1 togy E_1 elektrik hereketlendiriji güýjüň üsti bilen aňladyp alarys:

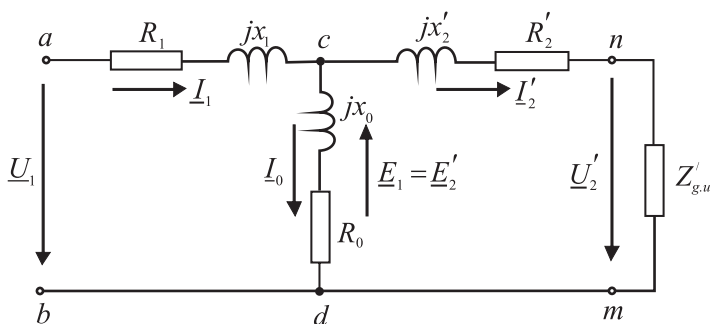
$$I_1 = I_0 - I'_2 = \frac{-E_1}{Z_0} + \frac{-E_1}{Z'_2 + Z'_{g,u}} = -E_1 \left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z'_2 + Z'_{g,u}} \right).$$

Bu ýerden E elektrik hereketlendiriji güýjüň ululygyny:

$$-E_1 = \frac{I_1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z'_2 + Z'_{g,u}}} \text{ görnüşde ýazyp bileris:}$$

$$U_1 = Z_1 I_1 - E_1 = \left(Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z'_2 + Z'_{g,u}}} \right) \cdot I_1 = Z_{ekw} \cdot I_1.$$

Transformatoryň Z_{ekw} ekwiwalent garşylygyna 1.19-njy suratdaky shema degişlidir.



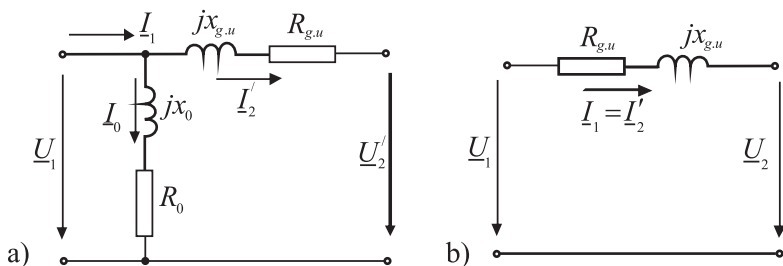
1.19-njy surat. Transformatoryň T-görnüşli çalşyрма shemasy

$$Z_{ekw} = Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z'_2 + Z'_{g,u}}} = Z_1 + \frac{Z_0 \cdot (Z'_2 + Z'_{g,u})}{Z_0 + Z'_2 + Z'_{g,u}}.$$

Çalşyрма shema üç sany elektrik şahasyndan ybaratdyr. Shema-nyň “a-c” bölegine onuň birinji şahasy, “c-d” bölegine magnitlendiriji

şahasy, “c–n” bölegine bolsa ikinji şahasy diýilýär. Birinji şahanyň düzümine girýän R_1 we jx_1 elementler deňişlilikde real transformatoryň birinji sarymynda bölünip çykýan ýylylyk mukdaryny we bu sarymda ýaýraýan magnit akymyny döretmek üçin gerek bolan energiýany häsiýetlendirýär.

Magnitlendiriji şahanyň jx_0 induktiw garşylygy baş magnit akymyny döretmek üçin sarp bolýan energiýany häsiýetlendirýär. Onuň R_0 rezistory bolsa transformatoryň baş magnit akymy tarapyndan transformatoryň magnitgeçirijisinde köwlenme toklarynyň we gisteriz hadysasynyň netijesinde döreýän magnit ýitgilerini hasaba alýar. Shemanyň ikinji şahasynyň R'_2 rezistory transformatoryň ikinji sarymynda bölünip çykýan ýylylyk mukdaryny, jx'_2 induktiw garşylyk bolsa, ikinji sarymyň ýaýraýan magnit akymyny döretmek üçin gerek bolan energiýany häsiýetlendirýär. Transformatoryň T-görnüşli çalşyрма shemasynyň düzümine girýän elementleriň ählisiniň ululygyny eksperimental ýol bilen kesgitläp bolmaýanlygy sebäpli, önümçilikde onuň ýerine Γ -görnüşli çalşyрма shema ulanylýar (1.20-nji surat).



1.20-nji surat. Transformatoryň Γ -görnüşli (a) we ýönekeýleşdirilen (b) çalşyрма shemalary

Transformatoryň magnitlendiriji şahasynyň i_0 togunyň ululygynyň transformatoryň iş düzgünlerine bagly däldegi sebäpli, Γ görnüşli shemada magnitlendiriji şahany göni U_1 naprýaženiýeli sete birikdirilmegine ýol berilýär (1.20-nji a surat). Γ görnüşli shemada $R_{g,u}$ we $x_{g,u}$ garşylyklary deňişlilikde aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

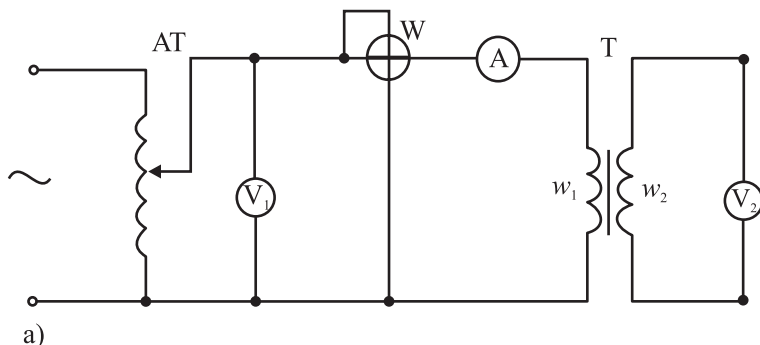
$$R_{g,u} = R_1 + R'_2 ; \quad x_{g,u} = x_1 + x'_2 . \quad (1.28)$$

Shemanyň magnitlendiriji şahasynyň I_0 toguň I'_2 toguň ululygyna görä örän azlygy sebäpli, köplenç ýagdaýlarda, ol hasaba alynmaýar. Ýagny $I_1 \approx I'_2$ diýip kabul edilýär. Bu ýagdaýda transformatoryň çalşyрма shemasy 1.20-nji *b* suratdaky görnüşi alýar. Şeýle shema transformatoryň ýönekeýleşdirilen çalşyрма shemasy diýilýär. 1.19-njy *a* suratda görkezilen çalşyрма shemalaryň düzümine girýän elementleriň garşylyklarynyň ululyklary transformatoryň boş iş we gysga birleşdiriş tejribeleriniň kömegi arkaly kesgitlenýär.

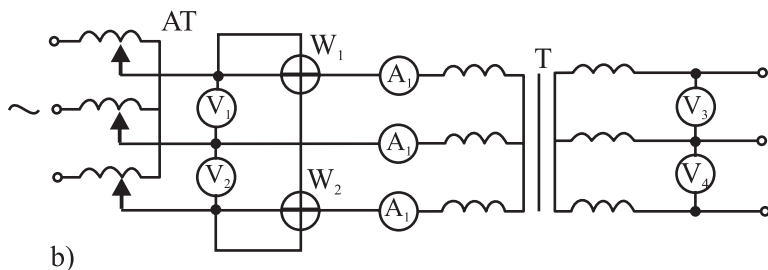
1.5. Transformatoryň gysga birikdiriliş tejribesi

Transformatoryň gysga birikdiriliş tejribesini geçirmek üçin 1.21-nji suratdaky shemalardan peýdalanylýar.

Birfazaly transformatorlar üçin:



Üçfazly transformatorlar üçin:

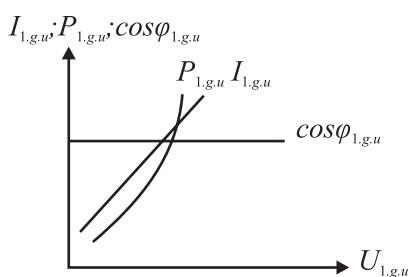


1.21-nji surat. Transformatoryň gysga birikdiriliş tejribesini geçirmek üçin shemalar

Tejribe geçirmezden öň transformatoryň ikinji sarymynyň gysgyçlary özara gysga birleşdirilýär. Soňra awtotransformatoryň (AT) kömegi arkaly transformatoryň birinji sarymyna berilýän U_1 naprýaženiýäni noldan tä birinji sarymdan geçýän tok özüniň nominal ululygyny alyança artdyrylýar we zynjyrdaky elektrik ölçeg abzallaryň görkezýän ululyklary alynýar.

Tejribeden ölçenip alnan ululyklar boýunça $I_{1g.u} = f(U_{1g.u})$; $P_{1g.u} = f(U_{1g.u})$; $\cos \varphi_{g.u} = f(U_{1g.u})$ baglanyşyklar gurulýar (1.22-nji surat).

Bu baglanyşyklara transformatoryň gysga utgaşma häsiýetnamalary diýilýär. Üçfazly transformatorlar üçin bu baglanyşyklar gurlanda faza toklaryň we naprýaženiýeleriň ortaça ululyklary alynýar.



1.22-nji surat.
Transformatoryň gysga
birleşdiriliş
häsiýetnamalary

Transformatoryň ýaýraýan magnit akymalarynyň ýolunyň esasy böleginiň howanyň ýa-da mineral ýagyň üstünden geçýändigigi sebäpli, $x_{g.u} = x_1 + x'_2 = \text{const}$. Şeýle-de R_1 we R'_2 aktiw garşylyklaryň ululyklarynyň magnit akymlara bagly däl-digi üçin $R_{g.u} = R_1 + R'_2 = \text{const}$. Bu bolsa öz gezeginde $z_{g.u} = R_{g.u} + jx_{g.u} = \text{const}$ bolmagyna getirýär. Netijede, $I_{1g.u} = \frac{U_{1g.u}}{z_{g.u}}$

tok bilen $U_{1g.u}$ naprýaženiýäniň arasynda göni baglanyşyk ýüze çykýar. Transformatorlaryň sarymlaryndaky energiýanyň ýitgisi naprýaženiýäniň kwadratyna baglylykda ösýär:

$$P_{g.u} = m_1 \cdot R_{g.u} \cdot I_{1g.u}^2 = m_1 \cdot R_{g.u} \cdot \frac{U_{1g.u}^2}{z_{g.u}^2}.$$

Bu aňlatmada m_1 – fazalaryň sany.

Kuwwat koeffisiýentiniň $U_{1g.u}$ naprýaženiýä bolan baglanyşygynyň $\cos \varphi_{g.u} = \frac{P_{g.u}}{m_1 \cdot U_{1g.u} \cdot I_{1g.u}} \sim \frac{U_{1g.u}^2}{U_{1g.u}^2} = \text{const}$ bolýandygy sebäpli,

onuň grafiki abssissa okuna parallel bolan göni çyzygy berýär: $I_1 = I_{1,n}$ ýagdaýda transformatoryň birinji sarymyna berilýän naprýaženiýä gysga utgaşmanyň naprýaženiýesi diýilýär. Adatça, bu naprýaženiýäni $U_{1,n}$ nominal naprýaženiýäniň görnüşinde aňladylýar:

$$u_{g,u} = \frac{U_{1,g,u}}{U_{1,n}} \cdot 100\%. \quad (1.29)$$

Ýokary naprýaženiýeli transformatorlarda $u_{g,u}$ gysga utgaşma naprýaženiýe $U_{1,n}$ nominal naprýaženiýäniň 5÷10 %-ini, pes naprýaženiýeli transformatorlarda bolsa 2,5÷5 %-ini düzýär. $U_{1,g,u}$ naprýaženiýäniň ululygynyň, transformatorlaryň naprýaženiýelerine görä şeýle tapawutlanmagy olaryň izolýasiýalaryna baglydyr. Transformatoryň naprýaženiýesiniň ýokarlanmagy ýaýraýan magnit akymynyň ýokarlanmagyna getirýär.

$U_{1,g,u}$ naprýaženiýäniň ululygynyň $U_{1,n}$ nominal naprýaženiýeden örän kiçiligi sebäpli, transformatoryň magnitlendiriji I_0 togunyň ululygynyň hasaba alardan az bolmagyna getirýär.

Ol hem öz gezeginde transformatoryň magnit ýitgileriniň örän az bolmagyna getirýär. Şeýlelikde, seredilýän ýagdaýda transformatoryň setden alýan energiýasy diňe onuň sarymlaryny gyzdymaga, ýagny transformatoryň elektrik ýitgileriniň öwezini dolmaga sarp edilýär.

Elektrik ölçeg abzallaryň görkezýän ululyklary arkaly transformatoryň çalşyрма shemasynyň $R_{g,u}$, $X_{g,u}$, $Z_{g,u}$ elementleriniň ululyklary aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$Z_{g,u} = \frac{U_{1,g,u}}{I_{1,n}}; \quad R_{g,u} = \frac{P_{g,u}}{I_{1,n}^2}; \quad X_{g,u} = \sqrt{Z_{g,u}^2 - R_{g,u}^2}. \quad (1.30)$$

Emma transformatoryň doly ýükünde uzak wagtlap işlemegi, onuň sarymlarynyň gyzmagyna we onuň aktiw garşylygynyň ululygynyň ýokarlanmagyna getirýänligi sebäpli, tejribe arkaly alnan $R_{g,u}$ gysga utgaşma garşylygy izolýasiýa klasy A, E, B bolan transformatorlar üçin 75°C getirilýär. Izolýasiýa klasy F, H, C transformatorlarda 115°C getirilýär. Hasaplama üçin aşakdaky aňlatmalar peýdalanylýar:

$$R_{g,u75} = R_{g,u} [1 + 0,004 \cdot (75^\circ - \Theta)];$$

$$R_{115} = R_{g,u} [1 + 0,04 \cdot (115 - \Theta)].$$

Bu aňlatmalarda Θ – tejribe geçirilýän wagtyndaky transformatoryň temperaturasy.

Gysga utgaşmanyň doly garşylygy we kuwwat koeffisiýenti deňişlilikde:

$$Z_{g,u} = \sqrt{R_{g,u}^2 + X_{g,u}^2}; \quad \cos \varphi_{g,u} = \frac{R_{g,u}}{Z_{g,u}}.$$

$u_{g,u}$ naprýaženiýäniň ululygy $Z_{g,u}$ garşylyk ululygy arkaly aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

$$u_{g,u} = \frac{Z_{g,u} \cdot I_{1n}}{U_{1n}} \cdot 100\% = \frac{Z_{g,u} \cdot S_n}{U_{1n}^2} \cdot 100\%. \quad (1.31)$$

$u_{g,u}$ naprýaženiýäniň aktiw we reaktiw bölekleri deňişlilikde:

$$u_{g,u,a} = u_{g,u} \cdot \cos \varphi_{g,u} = \frac{R_{g,u} \cdot I_{1n}}{U_{1n}} \cdot 100\%; \quad (1.32)$$

$$u_{g,u,r} = u_{g,u} \cdot \sin \varphi_{g,u} = \frac{X_{g,u} \cdot I_{1n}}{U_{1n}} \cdot 100\%.$$

Bu ýerde $\varphi_{g,u} - I_{1n}$ tok bilen $U_{1,g,u}$ naprýaženiýäniň arasyndaky fazalar tapawudy.

Transformatorlar üçin ýörite goýberilýän kataloglarda berilýän $u_{g,u,a}$, $u_{g,u,r}$, $u_{g,u}$ naprýaženiýeler çalşyрма shemanyň $R_{g,u}$, $X_{g,u}$, $Z_{g,u}$ elementlerini kesgitlemäge mümkinçilik berilýär. Transformatorlaryň ekspluatasiýasy wagtynda olaryň sarymlarynyň izolýasiýasynyň zaýalanmagy ýa-da ikinji sarymynda gysga utgaşma ýüze çykandaky toklary önünden hasaplamak üçin $Z_{g,u}$ garşylygy peýdalanylýar. Ýönekeýleşdirilen çalşyрма shemasyndan görnüşi ýaly (1.20-nji b surat), transformatorlaryň ikinji sarymy gysga utgaşanda, onuň birinji sarymynyň togy aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$I_{1.g.u} = \frac{U_{1.n}}{Z_{g.u}}. \quad (1.33)$$

(1.31) aňlatmadaky $Z_{g.u}$ garşylygy (1.29) aňlatmadaky $u_{g.u}$ bilen aňladyp, gysga utgaşmanyň kadalaşan ýagdaýynda ýüze çykjak togy aşakdaky görnüşde hem ýazyp bileris:

$$I_{1.g.u} = \frac{100}{u_{g.u} \% } \cdot I_{1.n}. \quad (1.34)$$

Ýokary naprýaženiýeli transformatorlarda $I_{1.g.u}$ tok nominal tokdan $10 \div 20$ esse, pes naprýaženiýeli transformatorlarda bolsa $20 \div 30$ esse uly bolýar. Transformator adaty iş düzgüninden gysga utgaşma ýagdaýyna geçýän wagtynda ýüze çykýan I_{urgy} urgy togy $I_{1.g.u}$ tokdan birnäçe esse uly bolýar we ol aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$I_{urgy} = K_{urgy} \cdot I_{1.g.u} \quad (K_{urgy} \geq 2).$$

Fizika kursundan belli bolşy ýaly, iki sany tokly sargynyň arasyn-da döreýän özara täsir güýç olaryň üstünden geçýän toklaryň kwadratyňa göni baglydyr. Şeýlelikde, transformatoryň ekspluatasiýasy wagtynda döreýän gysga utgaşma toguň, onuň nominal togundan onlarça esse ýokary bolmagy transformatoryň sargylarynyň arasyn-daky döreýän elektromagnit güýçleriniň adatkysyndan münlerçe esse ýokarlanmagyna getirýär. Bu hadysa transformatoryň sarymlarynyň we onuň sargylarynyň ýerinden süýşmegine, şeýle-de olaryň izolýasiýalarynyň zaýalanmagyna hem-de transformatoryň hatardan çykmagyna getirýär.

Transformatorlaryň katalog ululyklary boýunça olaryň çalşyрма shemalarynyň elementleriniň hasaplanlyşy

Transformatorlaryň iş düzgünlerini analiz etmek üçin olary özüne energiýa taýdan ekwiwalent bolan elektrik shemalar bilen çalşyrylýar.

Adatça, bu shemalaryň düzümine girýän elementleriň garşylyklaryny kesgitlemek üçin transformatorlaryň katalog ululyklaryndan peýdalanylýar. Güýç transformatorlar we awtotransformatorlar boýunça ýörite goýberilýän tehniki kataloglarda olaryň nominal S_{nom}

kuwwatlary, U_{1nom} we U_{2nom} naprýaženiýeleri, P_0 magnit we $P_{g.u}$ elektrik ýitgileri, şeýle-de $u_{g.u}\%$ gusga utgşama naprýaženiýäniň hem-de $i_0\%$ boş iş toguň görerimlerdäki ululyklary berilýär.

Katalog ululyklar boýunça transformatoryň çalşyrma shemasy-nyň elementleriniň garşylyklaryny hasaplamak üçin ilki bilen transformatoryň $K_{12} = U_{1nom}/U_{2nom}$ transformasiýa koeffisiýentini we birinji sarymynyň $I_{1nom} = S_{nom}/\sqrt{3}U_{1nom}$ nominal togy kesgitlenýär.

Soňra gysga utgşmanyň $P_{g.u}$ elektrik ýitgilerinden we I_{1nom} tokdan peýdalanyň gysga utgşmanyň $R_{g.u} = P_{g.u}/3I_{1nom}^2$ aktiw garşylygy kesgitlenýär we $R_1 \approx R_2 \approx R_{g.u}/2$ diýip kabul edilýär. Bu ýerde R_1 – transformatoryň birinji sarymynyň, R_2 – ikinji sarymynyň birinji sarymyňka getirilen aktiw garşylyklary.

Gysga utgşmanyň $U_{g.u} = u_{g.u}\% \cdot U_{1nom}/100$ naprýaženiýesinden we I_{1nom} tokdan peýdalanyň, gysga utgşmanyň $Z_{g.u} = U_{g.u}/\sqrt{3} \cdot I_{1nom}$ kompleks garşylygy kesgitlenilýär.

Gysga utgşmanyň induktiw garşylygy $X_{g.u} = \sqrt{Z_{g.u}^2 - R_{g.u}^2}$ görnüşde kesgitlenilýär we $X_1 \approx X_2' \approx X_{g.u}/2$ diýip kabul edilýär. Transformatorlaryň boş iş togy $I_0 = i_0\% \cdot I_{1nom}/100$ görnüşde kesgitlenilýär. P_0 magnit ýitgileriň we I_0 toguň ululyklaryndan peýdalanyň çalşyrma shemanyň magnitlendiriji şahasynyň $R_0 = P_0/3I_0$ aktiw, $Z_0 = U_{1nom}/\sqrt{3}I_0$ kompleks we $X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$ reaktiw garşylyklary kesgitlenilýär.

1.6. Transformatoryň ikinji naprýaženiýesiniň üýtgemegi

Transformatoryň ikinji sarymyna birikdirilen ýüküň garşylygynyň ýa-da onuň häsiýetiniň üýtgemegi, U_2 naprýaženiýäniň ululygynyň transformatoryň boş iş wagtyndaky $U_{2.0}$ naprýaženiýesinden tapawutlanmagyna getirýär we adaty, ol tapawut aşakdaky görnüşde ýazylýar:

$$\Delta U_2 = \frac{U_{2.0} - U_2}{U_{2.0}}. \quad (1.35)$$

Transformatoryň birinji sarymyna goýlan U_1 naprýaženiýäniň ululygynyň üýtgemeyän ýagdaýynda ýüküň häsiýetine we transformatoryň pasport ululyklaryna esaslanyp ΔU_2 -ni aşakdaky görnüşde hem ýazyp bileris:

$$\Delta U_2 = \beta (U_{g,a} \cos \varphi_2 + U_{g,r} \sin \varphi_2), \quad (1.36)$$

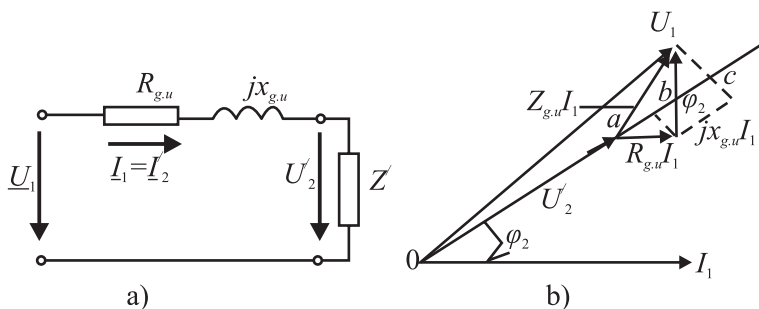
bu ýerde $\beta = \frac{I_2}{I_{2n}} \approx \frac{I_1}{I_{1n}}$ – transformatoryň ýük koeffisiýenti, φ_2 – ýüküň togunyň we naprýaženiýesiniň arasyndaky faza tapawudy.

(1.36) aňlatmany almak üçin, ilki bilen, (1.35) aňlatmanyň sag tarapynyň sanawjysyny we maýdalawjysyny transformatoryň transformasiýa koeffisiýentine köpeldilýär:

$$\Delta U_2 = \frac{k \cdot U_{2o} - k \cdot U_2}{k \cdot U_{2o}} = \frac{U'_{2o} - U'_2}{U'_{2o}}.$$

Ýönekeýleşdirilen çalşyрма shemasyndan görnüşi ýaly (1.20-nji b surat) transformatoryň boş işi wagtynda shemasynyň çykyşyndaky $U_{2.0}$ naprýaženiýe onuň girişindäki U_1 naprýaženiýä deňligi sebäpli ΔU_2 -niň görterimlerdeki üýtgemegini aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\Delta U_2 = \frac{U_{1n} - U'_2}{U_{1n}} \cdot 100\%. \quad (1.37)$$



1.23-nji surat. Ýükli işleýän transformatorlarda ΔU_2 -ni hasaplamak üçin ýönekeýleşdirilen çalşyрма shemasy (a) we onuň diagrammasy (b)

ΔU_2 -iň ululygynyň takyklygy real transformatoryň ýerine alynýan çalşyрма shemanyň takyklygyna baglydyr. Transformatoryň

ýönekeýleşdirilen çalşyрма shemasyna degişli diagrammadan görnüşi ýaly (1.23-nji b surat) U_{1n} we U'_2 naprýaženiýeleriň arasynda ky tapawut olaryň „oc“ kesime bolan proyeksiýalarynyň tapawudyna deň diýen ýalydyr: $U_1 - U'_2 \sim |\overline{oc} - \overline{oa}| = |\overline{ac}|$.

1.23-nji b suratdan görnüşi ýaly:

$$\overline{ac} = \overline{ab} + \overline{bc} = R_{g,u} I_1 \cos \varphi_2 + X_{g,u} I_1 \sin \varphi_2. \quad (1.38)$$

Onda:

$$\Delta U_2 = \left(\frac{R_{g,u} I_1}{U_{1,n}} \cos \varphi_2 + \frac{X_{g,u} I_1}{U_{1,n}} \sin \varphi_2 \right).$$

Soňky deňligiň sag tarapyny $I_{1,n}/I_{1,n}$ -e köpeldip, gözlenilýän aňlatmany alarys:

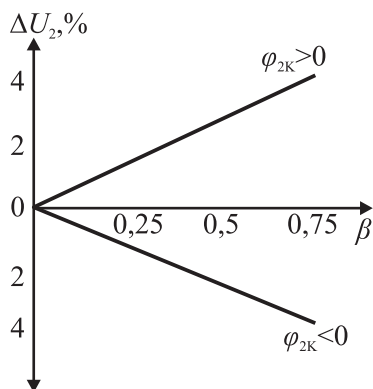
$$\begin{aligned} \Delta U_2 &= \frac{I_{1n}}{I_{1n}} \left(\frac{R_{g,u} I_1}{U_{1n}} \cos \varphi_2 + \frac{X_{g,u} I_1}{U_{1n}} \sin \varphi_2 \right) = \\ &= \beta \left(u_{g,u,a} \cos \varphi_2 + u_{g,u,r} \sin \varphi_2 \right). \end{aligned} \quad (1.39)$$

Şeýlelikde, transformatoryň ikinji sarymyndaky U_2 naprýaženiýäniň üýtgemegi ondan iýmitlenýän ýükün häsiýetiniň üýtgemeyän ýagdaýynda ($\varphi_2 = \text{const}$) diňe transformatoryň β koeffisiýentine baglydyr we ol baglanyşygyň grafigi 1.24-nji suratda görkezilendir.

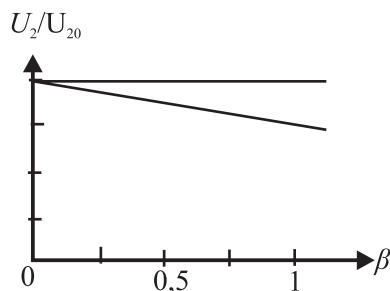
Transformatoryň U_2 naprýaženiýesiniň β -a bolan baglanyşygyna onuň daşky häsiýetnamasy diýilýär. Bu baglanyşygyň grafigi ikinji sarymyna aktiw-induktiv häsiýetli ýük birikdirilen transformator üçin 1.25-nji suratda görkezilendir.

$$(1.35) \text{ aňlatma laýyklykda } \frac{U_2}{U_{2o}} = 1 - \frac{\Delta U_2 \%}{100} \text{ transformatoryň}$$

ýük koeffisiýenti $0 < \beta < 1$ aralykda üýtgände U_2 naprýaženiýe diňe birnäçe göterim üýtgeýär. Bu bolsa ýüke kadaly naprýaženiýe berilmegini üpjün edýär. Ýüke berilýän naprýaženiýäniň ululygynyň üýtgemegi onuň iş düzgünine örän ýaramaz täsir edýär. Şol sebäpli güýç transformatorlar gurnalanda olaryň U_2 naprýaženiýesini ululygyny üýtgetmän saklamak üçin ýokary naprýaženiýeli sarymynyň sargy sanlary belli bir çäkde üýtgedilýär.



1.24-nji surat. ΔU_2 -niň transformatoryň β ýük koeffisiýentine bolan baglanyşygynyň grafiki



1.25-nji surat. Aktiv-induktiv häsiýetli ýüki bolan transformatoryň daşky häsiýetnamasy

1.7. Transformatoryň ikinji naprýaženiýesiniň sazlanlyşy

Ekspluatasiýa döwründe transformatorlaryň özünde ýa-da setde naprýaženiýäniň peselmesi ýüze çykýan wagtynda transformatorlaryň ikinji naprýaženiýelerini belli bir derejede saklamak zerurlygy ýüze çykýar.

Transformatoryň birinji we ikinji sarymlarynyň naprýaženiýeleriniň gatnaşygy transformasiýa koeffisiýentine ýa-da has takygy onuň sarymlarynyň sargy sanlarynyň gatnaşygyna baglydyr:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2} \quad \text{ýa-da} \quad U_2 \approx U_1 \frac{w_2}{w_1}. \quad (1.40)$$

Bu aňlatmadan görnüş i ýaly, transformatoryň ikinji sarymynyň naprýaženiýesiniň ululygyny üýtgetmän saklamak üçin transformatoryň sarymlarynyň haýsy hem bolsa biriniň sargy sanyny üýtgetmek ýeterlikdir.

Transformator $U_1 = \text{const}$ naprýaženiýeli setden iýmitlenýän wagtynda onuň U_2 naprýaženiýesini sazlamak üçin ikinji sarymyň w_2 sargy sanyny üýtgetmek ýeterlikdir. Şeýle edilmegi birinji sarymyň sargy sanynyň hemişelik ululygynda $w_1 = \text{const}$ transformatoryň

magnit akymynyň, magnit ýitgileriň, magnitlendiriji toguň ululyklarynyň $\frac{U_1}{w_1}$ gatnaşyga bagly bolanlygy sebäpli, olar takmynan öňküligine hemişelik galýar.

Eger-de ekspluatasiýa döwründe setiň naprýaženiýesi üýtgeýän ($U_1 = \text{var}$) bolsa, transformatoryň ikinji naprýaženiýesini birinji sarymyň w_1 – sargy sanyny üýtgetmek arkaly sazlanýlýar. Şeýle edilmegi

$\frac{U_1}{w_1}$ gatnaşygyň ululygynyň hemişelik saklanylmagyna mümkinçilik berýär. Şol sebäpli ähli güýç transformatorlar taýýarlanylanda olaryň haýsy şertde ulanyljakdygyna baglylykda birinji ýa-da ikinji sarymlaryndan ýörite şahalar hatary çykarylýar. Şahalaryň kömegi arkaly transformatorlaryň ikinji naprýaženiýesi $\pm 5\%$ aralykda sazlanýlýar. Orta we pes kuwwatly transformatorlarda üç sany şaha (+5; 0; -5), uly kuwwatly transformatorlarda bolsa baş sany şaha (+5; +2,5; 0; -2,5; -5) çykarylýar.

Ekspluatasiýa döwründe transformatorlaryň naprýaženiýeleri sazlanýlanda käbir kynçylyklar ýüze çykýar. Meselem, naprýaženiýäni sazlamak üçin çykarylan bir şahadan ikinji şaha geçilende tok zynjyry üzülmeli däl. Şol bir wagtyň özünde iki şahanyň arasyny gysga utgaşdyrmaly hem däl. Eger-de şeýle gysga utgaşma ýüze çyksa, onda sarymyň şol böleginde uly tok ýüze çykýar we sarymyň hatardan çykmagyna getirýär. Transformatoryň sarymlarynyň sargy sanlaryny üýtgetmeklik olaryň setden doly aýrylan ýa-da aýrylmadyk ýagdaýlarynda ýerine ýetirilýär.

1. Adatça, güýç transformatorlarda naprýaženiýäni sazlamak üçin çykarylýan şahalar ýokary naprýaženiýeli sarymlarynda ýerine ýetirilýär. Birinjiden, ýokary naprýaženiýeli sarymlardaky toklaryň ululyklary pes naprýaženiýeli sarymlardaky toklar bilen deňeşdirilende has kiçidir. Şu sebäpli sarym sanlar üýtgände ýüze çykýan kommutasion prosesler oňositel ýeňil geçýär. Ikinjiden, ýokary naprýaženiýeli sarymyň sargy sany pes naprýaženiýeli sarymyňkydan köp bolýar. Bu bolsa öz gezeginde naprýaženiýäni $\pm 2,5\%$ sazlamagy has takyk ýerine ýetirmäge mümkinçilik berýär. Şeýle-de ýokary naprýaženiýeli sarym transformatoryň sarymlarynyň daşky böleginde ýerleşýär.

Napryázeniýäni sazlamak üçin niýetlenen sarym bölekleri we olardan çykarylan şahalar sarymyň beýikliginiň aralyk böleginde simmetrik edilip ýerleşdirilýär.

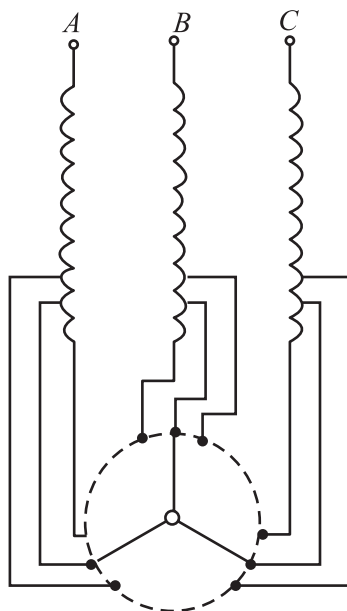
Şeýle edilmegi ýaýraýan magnit akymyň sarymyň oky boýunça deňölçegli bölünmegine we onuň bu ok boýunça döreýän magnit güýçleriniň deňagramlaşmagyna ýardam edýär.

Sarymlaryň sargy sanyny üýtgetmek transformatoryň bakynyň (gabynyň) içinde ýerleşdirilen hereketli we hereketsiz kontaktlary bolan utgaşdyryjy ýerine ýetirilýär. Sarymlardan çykarylan şahalaryň uçlary utgaşdyryjynyň hereket etmeýän nokatlaryna birikdirilýär. Utgaşdyryjynyň gozganýan nokatlary nol nokatly “Ýyldyz” birikdirilýär (1.26-njy surat).

Utgaşdyryjy bir ýagdaýdan ikinji ýagdaýa geçirmek transformatoryň bakynyň gapagynda ýa-da onuň gapdal diwarynda ýerleşdirilen tutawaç arkaly ýerine ýetirilýär.

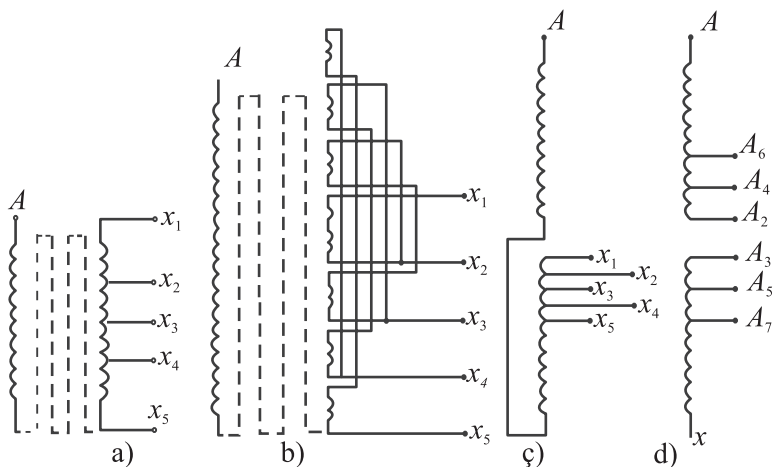
Sarymlardan şahalaryň çykarylyşynyň dürli shemalary 1.27-nji suratda görkezilendir.

Kuwwaty 160 kW·A-e çenli, köp gatly sarymy bolan transformator üçin 1.27-nji a suratdaky shema peýdalanylýar. Kuwwaty 250 kVA we ondan ýokary bolan silindir görnüşli köpgatly sarymly transformatorlar üçin 1.27-nji b suratdaky shema ulanylýar. Nominal napryázeniýesi 35 kW-a çenli, silindir görnüşli sarymy transformatorlaryň napryázeniýelerini sazlamak üçin şahalaryň çykarylyş shemasy 1.27-nji ç suratda görkezilendir. Bu sarymlaryň bir bölegi saga tarap, ikinji bölegi bolsa çep tarap saralýar. Şeýle edilmegi sarymyň iki böleginiň elektrik hereketlendiriji güýçleriniň we magnit hereketlendiriji güýçleriniň goşulmagyny üpjün edýär. Sarymlary şeýle tertipde ýerine ýetirilen, nominal napryá-



1.26-njy surat. Transformatoryň sarymynyň sargy sanyny üýtgetmek üçin niýetlenen utgaşdyryjynyň shemasy

ženiýeleri 220 kW-a çenli bolan transformatorlar üçin 1.27-nji *d* suratdaky shema peýdalanylýar. 1.27-nji *a*, *b*, *ç* suratdaky shemalarda şahalar sarymlaryň ahyryndaky sargylarda ýerleşdirilýär we transformatoryň fazalarynyň birmeňzeş şahalary “Ýyldyz” görnüşli birikdirilýär (1.26-njy surat).



1.27-nji surat. Sarymlardan şahalaryň çykarylşynyň shemalary

Bu ýagdaýda utgaşdyryjynyň goňşy fazalarynyň arasyndaky naprýaženiýe transformatoryň liniýa naprýaženiýesiniň 10 % inden ýokary geçmeýär. Şol sebäpli üç fazanyň naprýaženiýesi bir umumy utgaşdyryjy arkaly sazlanýlýar. Şeýle utgaşdyryjylar gurluşy boýunça ýönekeý we bahasy boýunça arzandyr. 1.27-nji *d* suratdaky shemada goňşy fazalaryň degişli şahalarynyň arasyndaky naprýaženiýe transformatoryň nominal naprýaženiýesiniň takmynan 50 % deňdir. Şu sebäpli şeýle transformatorlaryň naprýaženiýelerini sazlamak üçin fazalaryň her birine aýratyn utgaşdyryjy goýulýar.

2. Transformator setden aýrylmadyk ýagdaýynda onuň ikinji naprýaženiýesi sazlanýlanda naprýaženiýäniň sazlanýş çägi $\pm 9\% \div 16\%$ – deňdir. Sazlamaklyk alty-dokuz basgançakda ýerine ýetirilýär. Bir basgançakdan ikinjisine geçilende tok zynjyryny üzmezlik üçin utgaşdyryjyly gurluşyň kontaktlary goňşy iki şahanyň arasyndaky sarymlary özara gysga utgaşdyrylýar. Sarymlaryň bu böleginde ýüze çykyan gysga utgaşma togunyň ululygyny çäklendirmek üçin öz düzüminde

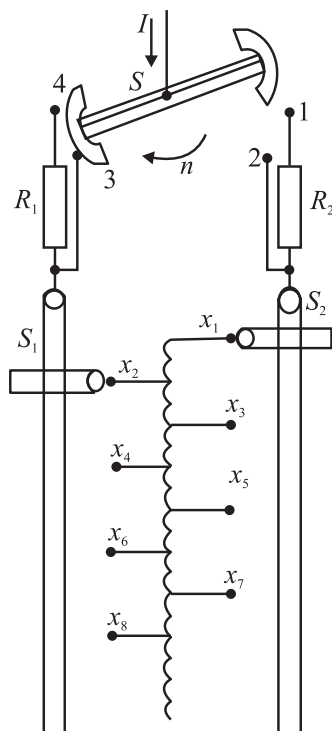
rezistorlar ýa-da reaktorlar (induktiwlik) saklaýan gurluşly utgaşdyryjylar peýdalanylýar.

Gysga utgaşma toguny çäklendiriji rezistor utgaşdyryjynyň prinsipial elektrik shemasy 1.28-nji suratda görkezilendir.

Transformatoryň naprýaženiýesini sazlamaklyk çalt hereket edýän S utgaşdyryjy we adaty S_1 , S_2 utgaşdyryjylarda ýerine ýetirilýär. S utgaşdyryjy R_1 , R_2 rezistorlar bilen bilelikde ýörite ýagly gapda (bakda) ýerleşdirilýär. S_1 we S_2 utgaşdyryjylar bir ýagdaýdan ikinji ýagdaýa tok ýok wagtynda geçirilýär. 1.28-nji suratdaky ýagdaýda transformator X_2 şahada işleýär we ony goňşy X_1 şaha geçmek üçin S_2 utgaşdyryjy X_1 şaha geçirilýär. Soňra S utgaşdyryjy sagat diliniň hereketiniň ugry boýunça öwürilýär. Netijede, 3-nji kontaktdaky tok üzülýär we 4 hem-de 1 kontaktlar özara birikdirilýär. X_2 we X_1 şahalaryň arasynda ýüze çykýan gysga utgaşmanyň togy R_1 , R_2 rezistorlar tarapyndan çäklendirilýär. Utgaşdyryjy ýene-de öwürülende 4-nji kontakt üzülýär we 2-nji hem-de 1-nji kontaktlar özara gysga utgaşdyrylýar. Bu ýagdaýda transformator X_1 şahada işleýär. R_1 rezistor bolsa özara gysga utgaşdyrylýar we onuň üstünden tok geçmeýär. Bir şahadan ikinji şaha geçmeklik prosesi örän çalt, ýagny sekundyň ülüşlerinde bolup geçýär.

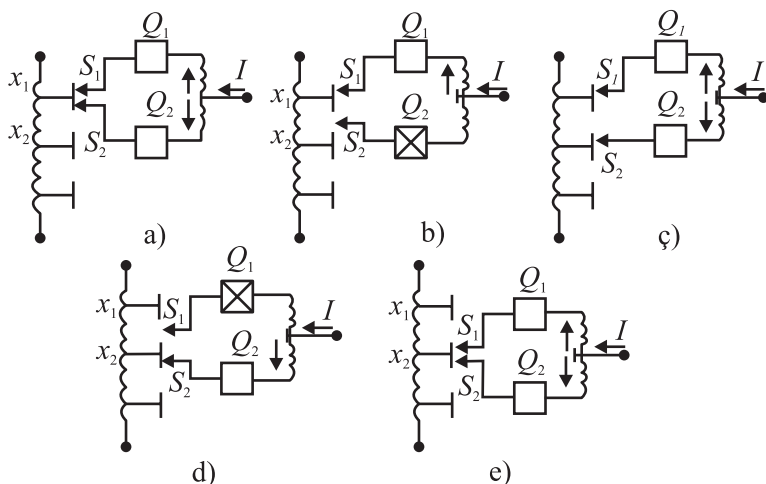
Reaktor arkaly togy çäklendiriji utgaşdyryjynyň elektrik shemasy we naprýaženiýäni sazlamagyň ýerine ýetiriliş yzygiderliligi 1.29-njy suratda görkezilen. Bir şahadan ikinji şaha geçmeklik S_1 , S_2 utgaşdyryjylar we Q_1 , Q_2 öçürijiler arkaly ýerine ýetirilýär. S_1 , S_2 kontaktlary açmazdan öň olar Q_1 , Q_2 öçürijileriň kömegi bilen setden aýrylýar.

S_1 , S_2 utgaşdyryjylar we reaktorlar transformatoryň ýagdan doldurylan bakynyň içinde ýerleşdirilýär. Transformatoryň gabyndaky



1.28-nji surat. Rezistorly utgaşdyryjynyň elektrik shemasy

ýagyň zaýalanmazlygy üçin Q_1 , Q_2 öçürjiler onuň daşynda ýerleşdirilýär. 1.29-njy *a* suratdaky ýagdaýda transformator X_1 şahada, 1.29-njy *e* suratdaky ýagdaýda X_2 şahada, 1.29-njy *b*, *ç*, *d* suratlarda bolsa aralyk ýagdaýda ýerleşýär. Utgaşdyryjylaryň ikisiniň hem işleýän pursatlarynda ýüküň togy reaktoryň iki böleginiň üstünde garşylykly tarapa geçýär. Şol sebäpli bu ýagdaýda reaktoryň induktiw garşylygy ýok diýen ýalydyr. Sarymyň bir böleginiň gysga utgaşan ýagdaýynda gysga utgaşma togy reaktoryň üstünden diňe bir tarapa geçýänligi sebäpli ol reaktoryň induktiw garşylygy tarapyndan çäklendirilýär. Häzirki döwürde transformatoryň naprýaženiýelerini sazlamak üçin awtomatlaşdyrylan kontaktсыз (tiristorly) utgaşdyryjylar has köp ulanylýar.



1.29-njy surat. Reaktoryly utgaşdyryjynyň elektrik shemasy

1.8. Transformatoryň peýdaly täsir koeffisiýenti

Transformatoryň setden kabul edýän P_1 aktiw kuwwaty onuň sarymlaryndaky $\Delta P_{el} = \Delta P_{el1} + \Delta P_{el2}$ elektrik ýitgileriniň hem-de magnitgeçirijidäki P_0 magnit ýitgileriniň we transformatordan ýüke berilýän P_2 aktiw kuwwatynyň jemine deňdir.

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{el} + P_0. \quad (1.41)$$

Gisterezis hadysasy we köwlenme toklary tarapyndan magnit-geçirijidäki ýüze çykýan magnit ýitgileriniň ululyklary, Φ_m baş magnit akymynyň amplitudasyna baglydyr. Şonuň üçin transformatora goýlan U_1 naprýaženiýede $\Phi_m = \text{const}$ bolýandygy sebäpli, bu ýitgileriň ululygy transformatora birikdirilen ýüke bagly däldir. Magnit ýitgiler transformatoryň nominal kuwwatynyň $1 \div 2 \%$ düzýär. Sarymlardaky elektrik ýitgileriniň ýüküň I_2 toguna bagly bolup, olar aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$\Delta P_{el} = \Delta P_{el1} + \Delta P_{el2} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2. \quad (1.42)$$

Transformatoryň peýdaly täsir koeffisiýenti transformatorndan ýüke berilýän P_2 aktiw kuwwatynyň, setden kabul edilýän P_1 aktiw kuwwata bolan gatnaşygy bilen kesgitlenilýär:

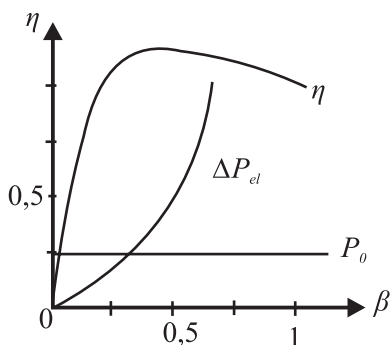
$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \Delta P_m + \Delta P_{el}}. \quad (1.43)$$

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2n}} \approx \frac{I_1}{I_{1n}} \text{ transformatoryň ýük koeffisiýentiniň we boş } (P_0)$$

hem-de gysga birleşdirilen ($\Delta P_{el} = R_g \cdot I_1^2 = \beta^2 \cdot R_g \cdot I_{1n}^2 = \beta^2 \cdot P_{g.n}$) tejribeler tarapyndan kesgitlenen kuwwatlary ulanyp, peýdaly täsir koeffisiýenti aşakdaky görnüşde hem ýazyp bileris:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_n \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{g.u}}. \quad (1.44)$$

Transformatoryň peýdaly täsir koeffisiýentiniň β -a bagly maksimal ululygyny kesgitlemek üçin (1.44) aňlatmadan β -a görä birinji tertipli önüm ($d\eta/d\beta$) alynýar we ony nola deňläp aşakdaky aňlatmany alarys: $\beta_{\max}^2 \cdot P_{g.u} = P_0$, bu aňlatmadan görnüşi ýaly transformatoryň maksimal peýdaly täsir koeffisiýenti magnit we elektrik ýitgileri özara deň bolan ýag-



1.30-njy surat. Transformatoryň elektrik we magnit ýitgileriniň hem-de peýdaly täsir koeffisiýentiniň β görä gurlan baglanyşyklarynyň grafigi

daýynda ýüze çykýar. Şeýlelikde, transformator üçin amatly bolan yük koeffisiýenti $\beta_{\max} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{g,u}}}$ görnüşde kesgitlenýär. Adatça, güýç transformatorlary üçin: $\frac{P_0}{P_{g,u}} = 0,5 \mid 0,25$; ($\beta = 0,7 \mid 0,5$) bolýar.

Güýç transformatorlarda in ýokary peýdaly täsir koeffisiýenti 99,5%-e ýetýär. Peýdaly täsir koeffisiýentiň β -a görä (1.44) aňlatmanyň esasynda gurlan baglanyşygyň grafigi 1.30-njy suratda görkezilendir.

Transformatorlaryň bir ýylyň dowamyndaky peýdaly täsir koeffisiýentini kesgitlemek üçin, onuň ýylyň dowamyndaky ýükli we boş işlän wagtlary (sagatlary) anyklanylýar hem-de ortaça peýdaly täsir koeffisiýenti alynýar:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_n \cos \varphi_2 t_{um}}{\beta \cdot S_n \cos \varphi_2 t_{um} + P_0 (t_{b,iş} + t_{um}) + \beta^2 P_{g,u,um} t_{um}}, \quad (1.45)$$

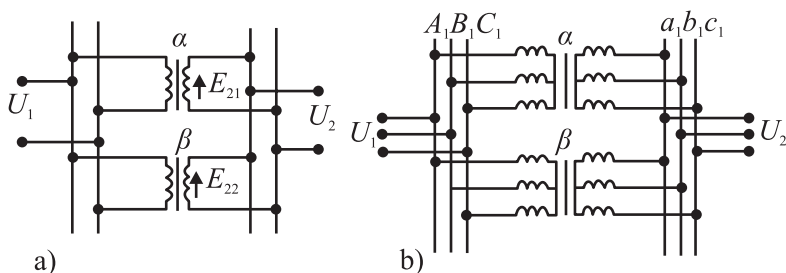
bu ýerde t_{um} we $t_{b,iş}$ degişlilikde transformatoryň bir ýylyň dowamynyndaky ýükli we boş (ýüksüz) işleýän wagtlary.

1.9. Transformatorlary özara parallel işe goýbermegiň şertleri

Elektrik stansiýalarda öndürilýän elektrik energiýasy kabul edijiler tarapyndan ýylyň pasyllary boýunça we gije-gündiziň dowamynda bir deň mukdarda sarp edilmeyär. Şu sebäpli kabul edijileri endigan hem-de ýokary hilli elektrik energiýa bilen üpjün etmek üçin elektrik energiýany aralyga geçirmekde we paýlamakda ulanylýan transformatorlary özara parallel işe goýbermek zerurlygy ýüze çykýar. Şeýle-de transformatorlaryň özara parallel işlemegi elektrik üpjünçiliginde, garaşylmaýan ýagdaýlar ýüze çykanda we abatlaýyş işleri geçirilende energiýany geçirmegiň we paýlamagyň ätiýaçlygyny üpjün etmäge mümkinçilik berýär. Transformatorlaryň parallel birikdirilmegi, olaryň üstinden geçýän energiýanyň mukdarynyň nominal kuwwatyndan has ýokary geçýän ýagdaýlarynda transformatorlaryň nomi-

nal kuwwatyna ýakyn ýüklerde işlemegine we olarda ýüze çykýan energiýanyň ýitgileriniň mukdaryny minimal ýagdaýlarda saklamaga mümkinçilik berýär.

Transformatorlar parallel işe goýberilende, olaryň ikinji sarymlary umumy bir ýüke birikdirilýär. Biriniji sarymlary bolsa bir setden iýmitlenýär. Bir we üçfazly transformatorlaryň özara parallel birikdiriliş shemalary 1.31-nji suratda görkezilendir.



1.31-nji surat. Birfazaly (a) we üçfazly (b) transformatorlaryň özara parallel birikdiriliş shemalary

Transformatorlary özara parallel işe goýbermek üçin aşakdaky şertleri ýerine ýetirmelidir:

Transformatorlaryň bir deň ululykly transformasiýa koeffisiýentleri bolmaly:

$$k_{\alpha} = k_{\beta}.$$

Transformatorlaryň birmeňzeş birikdiriliş toparlary bolmaly:

$$\Delta/Y = \Delta/Y.$$

Transformatorlaryň gysga utgaşma naprýaženiýeleri özara deň bolmaly:

$$U_{g.u.\alpha} = U_{g.u.\beta}.$$

Transformatorlaryň fazalarynyň sete we ýüke birikdiriliş yzygiderliligi bir deň bolmaly:

$$\begin{pmatrix} A \rightarrow B \rightarrow C \\ a \rightarrow b \rightarrow c \end{pmatrix}_{\alpha} = \begin{pmatrix} A \rightarrow B \rightarrow C \\ a \rightarrow b \rightarrow c \end{pmatrix}_{\beta}.$$

1. Parallel işe goýberilen transformatorlaryň bir deň transformasiýa koeffisiýentleri bolmadyk ýagdaýynda, olaryň birinji sarymlarynyň umumy U_1 naprýaženiýeli setden iýmitlenýändigigi sebäpli, ikinji sarymlarynda indusirlenýän E_{21} we E_{22} elektrik hereketlendiriji güýçler ululyklary boýunça biri-birinden $\Delta E = E_{21} - E_{22}$ ululyga tapawutlanýar (1.31-nji a surat). ΔE tapawut bolsa transformatorlaryň ikinji sarymlarynda deňleşdiriji togy ýüze çykýar:

$$I_{2.deňl} = \frac{E_{21} - E_{22}}{Z'_{g.u.\alpha} + Z'_{g.u.\beta}}. \quad (1.46)$$

Deňleşdiriji toguň ululygy deňşilikde transformatorlaryň gysga utgaşmasynyň kompleks garşylyklary $Z_{g.u.\alpha}$ we $Z_{g.u.\beta}$ tarapyndan çäklendirilýär.

Transformatorlaryň ikinji sarymlaryndaky deňleşdiriji tok birinji sarymlara hem transformirlenýär. Transformatorlar $I_{2.deňl}$ deňleşdiriji tok üçin mydama gysga utgaşma iş düzgüninde işleýärler. Transformatoryň $X_{g.u}$ induktiw gysga utgaşma garşylygynyň ululygynyň $R_{g.u}$ aktiw gysga utgaşma garşylygyndan has uludygy ($X_{g.u} \gg R_{g.u}$) sebäpli, $I_{2.deňl}$ deňleşdiriji tok öz fazasy boýunça ΔE elektrik hereketlendiriji güýçden takmynan $\varphi \approx 90^\circ$ yza galýar.

Birmeňzeş kuwwatly transformatorlaryň kompleks gysga utgaşma garşylyklarynyň ($Z'_{g.u.\alpha} = Z'_{g.u.\beta} = Z'_{g.u.2}$) özara deňligi sebäpli, deňleşdiriji tok aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$I_{2.deňl} = \frac{\Delta E}{2Z'_{g.u.}}. \quad (1.47)$$

Transformatorlaryň pasportlarynda görkezilýän gysga utgaşmanyň naprýaženiýesi arkaly deňleşdiriji tok aşakdaky görnüşde ýazylýar:

$$I_{2.deňl} = \frac{\Delta e\%}{2u_{g.u.}} \cdot I_{2.nom}. \quad (1.48)$$

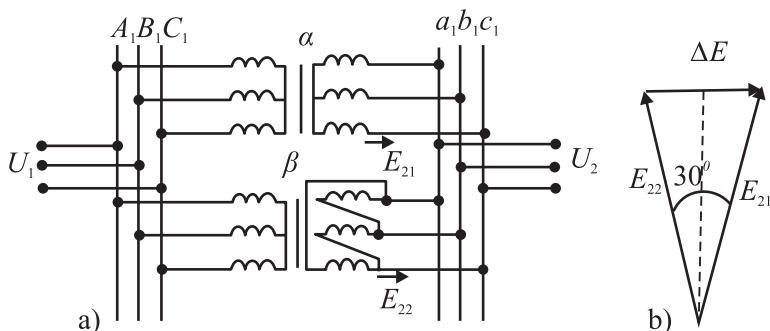
Bu aňlatmany almak üçin (1.47) deňligiň sanawjysyny we maýdalawjysyny $\frac{I_{2.nom}}{U_{2.nom}} \cdot 100$ gatnaşyga köpeltmek ýeterlikdir. Transforma-

siýa koeffisiýentleriň uly bolmadyk tapawutlarynda hem uly deňleşdiriji tok ýüze çykyp bilýär. Meselem: $\Delta e\% = 5\%$; $u_{g.u} = 5\%$ bolanda:

$$I_{2deňl} = \frac{\Delta e\%}{2u_{g.u}} \cdot I_{2nom} = \frac{5}{2 \cdot 5} \cdot I_{2nom} = 0,5 I_{2nom}.$$

Bu aňlatmadan görnüşi ýaly, $I_{2.deňl}$ deňleşdiriji tok $I_{2.nom}$ nominal toguň 50 %-ni düzýär. Şeýlelikde, parallel işleýän transformatorlarda deňleşdiriji toguň ýüze çykmagy olarda goşmaça elektrik energiýanyň ýitgileriniň döremegine getirýär. Şol sebäpli döwlet standartynyň talabyna görä özara parallel işe goýberilýän transformatorlaryň transformasiýa koeffisiýentleriniň tapawudynyň 0,5 %-den ýokary geçmegine rugsat berilmeýär.

2. Goý, birikdiriliş toparlary Y/Δ -11 we Y/Y -0 bolan iki transformator parallel işe goýberilýär diýeliň (1.32-nji a surat).



1.32-nji surat. Birikdiriliş toparlary Y/Δ -11 we Y/Y -0 bolan özara parallel birikdirilen transformatorlaryň elektrik shemasy (a) we diagrammasy (b)

Birinji we ikinji sarymlarynyň nominal naprýaženiýeleri özara deň bolan transformatorlaryň degişli fazalarynda indusirlenýän E_{21} we E_{22} elektrik hereketlendiriji güýçler ululyklary boýunça deň, fazalary boýunça $\varphi = 30^\circ$ tapawutlanýarlar (1.32-nji b surat). Netijede, E_{21} we E_{22} elektrik hereketlendiriji güýçleriň tapawudy:

$$\Delta E_2 = 2E_2 \sin\left(\frac{30}{2}\right) \approx 0,52 \cdot E_2; \Delta E_2 - \text{elektrik hereketlendiriji güý-}$$

jüň täsirinde transformatoryň ikinji sarymlaryndaky ýüze çykýan

$$\text{deňleşdiriji tok: } I_{2deňl} = \frac{\Delta E}{Z_{g.u1} + Z_{g.u2}}.$$

Meselem: Transformatorlaryň gysga utgaşma naprýaženiýeleri $u_{g.u.1} = u_{g.u.2} = 5\%$ – e deň diýeliň. Onda:

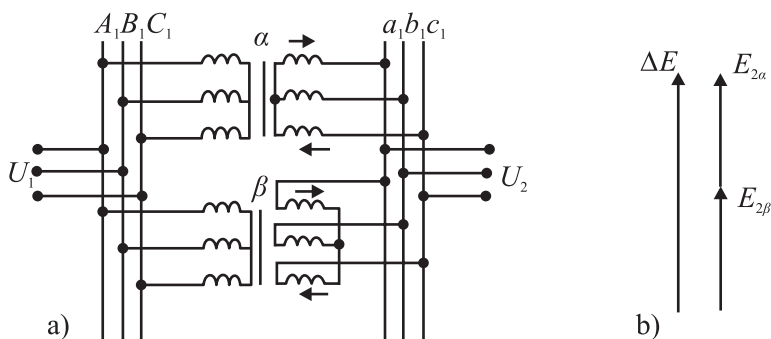
$$I_{2deňl} = \frac{\Delta E}{Z_{g1} + Z_{g2}} = \frac{0,52}{2 \cdot 0,05} I_{2nom} = 5,2 I_{2nom}.$$

Seredilýän ýagdaýda deňleşdiriji tok I_{2nom} nominal tokdan 5,2 esse ýokarydyr. Ýagny deňleşdiriji tok takmynan gysga utgaşmanyň toguna ýakyndyr.

Transformatorlaryň Y/Y-0; Y/Y-6 shema boýunça özara parallel birikdiriliş shemasy we diagrammasy 1.33-nji suratda görkezilendir.

Bu ýagdaýda $\Delta E_2 = 2E_2$ bolýar we $I_{2deňl}$ deňleşdiriji tok bolsa transformatoryň gysga utgaşma naprýaženiýesiniň $u_{g.u} = 50\%$ ululy-

gynda: $I_{2deňl} = \frac{\Delta E_2}{2U_{g.u}} = \frac{2}{2 \cdot 0,05} I_{2nom} = 20 \cdot I_{2nom}$ bolar. Şol sebäpli bir-meñzeş birikdiriliş toparlary bolmadyk transformatorlary özara parallel işe goýbermeklige ýol berilmeýär.



1.33-nji surat. Birikdiriliş toparlary Y/Y-0 we Y/Y-6 bolan özara parallel birikdirilen transformatorlaryň elektrik shemasy (a) we diagrammasy (b)

3. Birmeñzeş birikdiriliş toparly we transformasiýa koeffisiýentli transformatorlar parallel işe goýberilende olaryň gysga utgaşma naprýaženiýeleri biri-birinden tapawutlanýan ýagdaýynda olar transformatorla-

ryň üstinden geçýän energiýalaryň mukdarlarynyň deňsizligi ýüze çykýar. Bu bolsa transformatorlaryň biriniň nominal ýükünden uly ýükde işlemegine, beýlekisiniň bolsa nominal ýükden pes ýükde işlemegine getirýär. Bu ýagdaýa iki sany birlazaly transformatoryň ýönekeýleşdirilen çalşyрма shemasynyň mysalynda seredeliň (1.34-nji surat).

Transformatorlaryň birmeňzeş birikdiriliş toparynyň we transformasiýa koeffisiýentleriniň barlygy sebäpli $Z_{g.u.\alpha}$ we $Z_{g.u.\beta}$ garşylyklary transformatoryň pasport ululyklary arkaly aňladyp, ýazyp bileris:

$$Z_{g.u.\alpha} \cdot I_{1\alpha} = Z_{g.u.\beta} \cdot I_{1\beta} \quad (1.49)$$

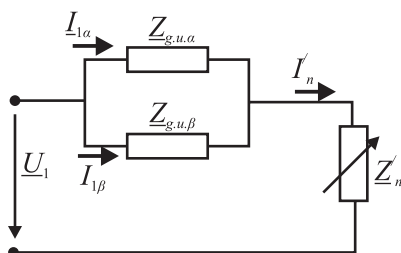
$$Z_{g.u.\alpha} = \frac{U_{g.u.\alpha} \cdot U_n^2}{S_{n.\alpha}} ; \quad Z_{g.u.\beta} = \frac{U_{g.u.\beta} \cdot U_n^2}{S_{n.\beta}} ;$$

$$\frac{I_{1\alpha}}{I_{1\beta}} = \frac{U_{g.u.\beta}}{U_{g.u.\alpha}} \cdot \frac{S_{n.\alpha}}{S_{n.\beta}} \quad (1.50)$$

(1.50) aňlatmadan görnüşi ýaly, transformatorlaryň deň gysga utgaşma naprýaženiýeleri bolan wagtynda, olar öz nominal kuwwatларында işleýärler ýa-da kuwwatlar transformatorlaryň arasynda deň bölünýärler. Eger-de deň nominal kuwwatly transformatorlar gysga utgaşma naprýaženiýeleri boýunça tapawutlansalar, olarda kuwwatlaryň bölüniş deňagramlylygy saklanylmaýar.

Şol sebäpli döwlet standarty boýunça parallel işe goýberilýän transformatorlaryň gysga utgaşma naprýaženiýeleriniň tapawudynyň $\pm 10\%$ ýokary geçmegine rugsat berilýär.

4. Özara parallel işe goýberilýän transformatorlaryň ikinji sarymlarynyň fazalarynyň gezekleşip gelşiniň ýerleri çalşylanda transformatorlarda gysga utgaşma ýagdaýy ýüze çykýar (1.35-nji surat).



1.34-nji surat. Parallel işleýän iki sany transformatoryň çalşyрма shemasy

elektrik ýitgileri $P_{g.u} = 12,3 \text{ kWt}$ diýeliň. 1.36-njy suratda bir, iki we üç transformatorlaryň ýitgileriniň umumy ýüke baglylykda üýtgeýiş grafikleri görkezilendir.

1.36-njy suratdaky grafiklerden görnüşi ýaly, ýük koeffisiýentiniň $\beta < 0,66$ ýagdaýynda bir sany transformatory ulanmak (1), $0,66 < \beta < 1,22$ ýagdaýda iki sany transformatory ulanmak (2), $\beta > 1,22$ ýagdaýda bolsa üç sany transformatory (3) ulanmaklyk has amatlydyr.

1.10. Transformatorlaryň elektrik ululyklarynyň we parametrleriniň otnositel birliklerde aňladylyşy

Transformatorlaryň elektrik ululyklaryny (toklar, naprýaženiýeler, kuwwatlar) we parametrleri (induktiv we aktiw garşylyklar) otnositel birliklerde aňlatmak. Olarda bolup geýän hadysalar üçin ýazylýan deňlemeleri ýönekeýleşdirýär we geçirilýän hasaplamalara gözegçilik etmekligi aňsatlaşdyrýar.

Transformatoryň elektrik ululyklaryny we parametrlerini otnositel birliklerde ýazylanda baza (esas) edilip alnan ululyklaryň bölekleri görnüşinde aňladylýar.

U_{1n} nominal faza naprýaženiýesi; I_{1n} nominal faza togy; $Z_{1n} = U_{1n}/I_{1n}$ nominal iş düzgünindäki birinji zynjyryň garşylygy; $S_{1n} = U_{1n} \cdot I_{1n}$ (bifazaly transformator üçin) $S_{1n} = \sqrt{3} \cdot U_{1n} \cdot I_{1n}$ (üçfazaly transformator üçin) nominal kuwwat alynýar.

Transformatoryň ikinji sarymyna degişli ululyklary otnositel birliklerde aňlatmak üçin baza edilip aşakdakylary alynýar.

Ikinji sarymyň nominal faza naprýaženiýesi: $U_{2n} = U_{1n} \frac{w_2}{w_1}$.

Ikinji sarymyň nominal faza togy: $I_{2n} = I_{1n} \frac{w_1}{w_2}$.

Transformatoryň ikinji zynjyrynyň garşylygy:

$$Z_{2n} = \frac{U_{2n}}{I_{2n}} = Z_{1n} \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2.$$

Transformatoryň nominal kuwwaty: $S_{2n} = S_{1n}$.

Birinji sarymyň ululyklaryny otnositel birliklerde aňlatmak üçin, olaryň ululyklaryny degişli baza ululyklaryna bölünýär:

$$U_{*1} = \frac{U_1}{U_{1n}}; \quad I_{*1} = \frac{I_1}{I_{1n}}; \quad Z_{*0} = \frac{Z_0}{Z_{1n}};$$

$$Z_{*1} = \frac{Z_1}{Z_{1n}}; \quad P_{*1} = \frac{P_1}{S_{1n}} = U_{*1} \cdot I_{*1} \cdot \cos \varphi_1.$$

Aňlatmalardaky (*) bellik olaryň otnositel birliklerde aňladylandygyny görkezýär. Transformatoryň ikinji sarymynyň otnositel ululyklary degişlilikde aşakdaky görnüşde aňladylýar.

$$U_{*2} = \frac{U_2}{U_{2n}}; \quad I_{*2} = \frac{I_2}{I_{2n}}; \quad Z_{*2} = \frac{Z_2}{Z_{2n}}; \quad P_{*2} = \frac{P_2}{S_{2n}} = U_{*2} \cdot I_{*2} \cdot \cos \varphi_2.$$

Transformatoryň ähli deňlemelerini otnositel birliklerde ýazmak üçin onuň düzümine girýän ululyklary degişli baza ululyklara bölmeli. Meselem: naprýaženiýeleriň deňlemesi bolsa baza naprýeženiýesine, toklaryň deňlemesi bolsa baza toguna bölmeli:

$$\underline{U}_{*1} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_{1n}} = \frac{-\underline{E}_1}{\underline{U}_{1n}} + \underline{Z}_1 \cdot \frac{\underline{I}_{1n}}{\underline{I}_{1n}} \cdot \frac{\underline{I}_{1n}}{\underline{U}_{1n}}; \quad \text{ýa-da} \quad \underline{U}_{*1} = -\underline{E}_{*1} + \underline{Z}_{*1} \cdot \underline{I}_{*1};$$

$$\frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_{1n}} + \frac{\underline{I}'_2}{\underline{I}_{1n}} = \frac{\underline{I}_0}{\underline{I}_{1n}}; \quad \text{ýa-da} \quad \underline{I}_{*1} + \underline{I}'_{*2} = \underline{I}_{*0}.$$

Transformatoryň sarymlarynyň parametrlerini we olardaky energiýa ýitgileri otnositel birliklerde aňladylanda olaryň ululyklary kiçi aralyklarda (çäklerde) üýtgeýär hem-de olar, esasan, transformatoryň nominal kuwwatyna bagly bolýarlar. Otnositel birliklerde aňladylan käbir ululyklaryň arasyndaky gatnaşyklara seredeliň.

Özara induktiw garşylyk transformatoryň I_0 boş iş toguna ters baglydyr:

$$x_{*0} = Z_{*0} = \frac{Z_0}{Z_{1n}} = \frac{U_{1n}}{I_0} \cdot \frac{I_{1n}}{U_{1n}} = \frac{I_{1n}}{I_0}.$$

Çalşyrma shemanyň magnitlendiriji şahasynyň aktiw garşylygy I_0 boş iş toguna we magnit ýitgilerine baglydyr:

$$R_{*0} = \frac{R_0}{Z_{1n}} = \frac{P_0 \cdot I_{1n}}{3 \cdot I_0^2 \cdot U_{1n}} = \frac{P_0}{3 \cdot U_{1n} \cdot I_{1n}} \left(\frac{I_{1n}}{I_0} \right)^2 = \frac{P_{*0}}{I_{*0}^2}.$$

Transformatoryň sarymlarynyň aktiw garylyklary otnositel birliklerde aşakdaky görnüşde ýazylýarlar:

$$R_{*1} = \frac{R_1}{Z_{1n}} = \frac{3 \cdot R_1 \cdot I_{1n}^2}{3 \cdot U_{1n} \cdot I_{1n}} = \frac{P_{e1}}{S_{1n}} = P_{*e1};$$

$$R_{*2} = \frac{R_2'}{Z_{1n}} = \frac{3 \cdot R_2' \cdot (I_{2n}')^2}{3 \cdot U_{1n} \cdot I_{1n}} = \frac{P_{e2}}{S_{1n}} = P_{*e2}.$$

Köpçülikleýin goýberilýän kuwwatly ($S = 25 \div 500\,000 \text{ kW} \cdot \text{A}$ bolan) üçfazaly transformatorlaryň tehniki ululyklaryndan peýdalanylýp, olaryň otnositel ululyklarynyň we parametrleriniň üýtgeýiş çäklerini kesgitläp bileris:

$$I_{*0} = 0,03 - 0,003;$$

$$P_{*m} = P_{*0} = 0,005 - 0,0006;$$

$$P_{*el} = P_{*2.el} = P_{*1.el} = 0,025 - 0,0025;$$

$$x_{*1} = x_{*2}' = 0,03 - 0,07;$$

$$Z_{*0} = x_{*0} = 33 - 330;$$

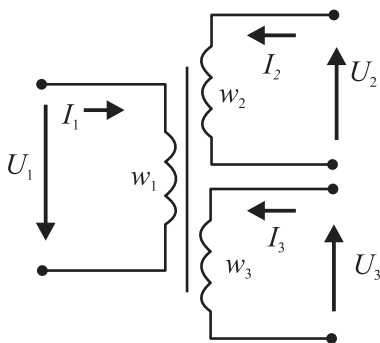
$$R_{*1} = R_{*2}' = 0,0125 - 0,00125;$$

$$R_{*0} = 5,5 - 65.$$

Getirilen sanlardan görnüşi ýaly, kuwwat 20 000 esse üýtgände, otnositel birlikdäki parametrlr 10 esseden köp üýtgemeyär. Şol ýagdaýda olaryň absolýut birlikdäki ululyklary 100 000-lerçe esse üýtgeýär.

1.11. Üçsarymly transformatorlar we awtotransformatorlar

Üçsarymly transformatorlar



1.37-nji surat. Birfazaly üçsarymly transformatoryň elektrik shemasy

Elektroenergetikada güýç transformatorlary hökmünde, esasan, üçsarymly transformatorlar giňden ulanylýar. Üçsarymly transformatorlar özüniň fazasynyň sanyna görä bir we üçfazaly bolýarlar. Adatça, bu transformatorlaryň bir sany birinji sarymy (iň uly kuwwatly sarym) we iki sany ikinji sarymy bolýar (1.37-nji surat).

Transformatorlaryň esasy magnit akymyny döredýän F_0 magnit hereketlendiriji güýji üç sarymyň döredýän magnit hereketlendiriji güýçleriniň jeminde deňdir.

$$\underline{F}_1 + \underline{F}_2 + \underline{F}_3 = w_1 \cdot \underline{I}_1 + w_2 \cdot \underline{I}_2 + w_3 \cdot \underline{I}_3 = \underline{F}_0. \quad (1.51)$$

Transformatoryň islendik iş düzgüninde $U_1 = \text{const}$ ýagdaýda onuň esasy magnit akymy we F_0 magnit hereketlendiriji güýji hemişelik galýar. Şeýlelikde, transformatoryň işçi magnit akymyny emele getirýän tok onuň boş iş düzgünindäki I_0 toga deň diýip kabul edilýär.

$$F_0 = w_1 \cdot I_0 = \text{const}. \quad (1.52)$$

(1.51) aňlatmanyň iki tarapyňy hem birinji sarymyň w_1 sargy sanyna bölüp, toklaryň deňlemesini alarys:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}'_2 + \underline{I}'_3 = \underline{I}_0. \quad (1.53)$$

Bu aňlatmany aşakdaky görnüşde hem ýazyp bileris:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \left(\underline{I}'_2 + \underline{I}'_3 \right). \quad (1.54)$$

(1.53) we (1.54) aňlatmalarda $\underline{I}'_2 = \frac{w_2}{w_1} \cdot \underline{I}_2$ we $\underline{I}'_3 = \frac{w_3}{w_1} \cdot \underline{I}_3$ toklar transformatoryň ikinji hem-de üçünjü sarymlaryndaky toklaryň

onuň birinji sarymyndaky toga getirilen ululyklarydyr. I_1 toguň bir bölegi transformatoryň işçi magnit akymyny döredýär. I_1 toguň beýleki bölegi bolsa $-I'_2$ we $-I'_3$ toklaryň magnitsizlendiriji güýçlerini deňagramlaşdyrýar. I_0 toguň oňnositel azlygy we onuň $I_{1,n}$ nominal toguň $0,3 \div 10\%$ -ini düžýändigigi sebäpli $I_0 = 0$ diýip, (1.54) aňlatmany aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\underline{I}_1 = -(\underline{I}'_2 + \underline{I}'_3). \quad (1.55)$$

(1.55) aňlatmadan görnüşini ýaly $-I'_2$ we $-I'_3$ toklaryň ösmegi bilen I_1 tok hem ösýär. I_1 toguň $-I'_2$ we $-I'_3$ toklaryň geometriki jemine deňdigi sebäpli, $-I'_2$ we $-I'_3$ toklaryň arifmetiki jemi I_1 tokdan uly bolmagy hem mümkindir. Netijede, ikinji we üçünji sarymlaryň doly kuwwatlarynyň ($S_2 + S_3$) jeminiň S_1 doly kuwwatdan uly bolmagy hem mümkindir. Emma oňa seretmezden, transformatoryň aktiw we reaktiw kuwwatlarynyň deňligi saklanylyýandyr.

Ýokardaky aýdylanlary hasaba alyp, transformatoryň birinji sarymynyň kuwwaty ikinji sarymlaryň nominal kuwwatlarynyň arifmetiki jeminden pes ululyga hasaplanylýar. Üçsarymly transformatorlar standart boýunça 1.1-nji tablisada görkezilen nominal kuwwatlarda taýýarlanylýar.

1.1-nji tablica

Sarym-1	Sarym-2	Sarym-3
1	1	1
1	1	2/3
1	2/3	2/3

Üçsarymly transformatorlaryň naprýaženiýeleriniň deňlemesi edil iki sarymly transformatorlaryňky ýaly ýazylyýar:

Birinji sarym üçin:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1. \quad (1.56)$$

Ikinji sarymlar üçin:

$$\underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_2. \quad (1.57)$$

$$\underline{U}'_3 = \underline{E}'_3 - \underline{Z}'_3 \cdot \underline{I}'_3, \quad (1.58)$$

bu aňlatmalarda $Z_1 = R_1 + jx_1$, $Z'_2 = R'_2 + jx'_2$ we $Z'_3 = R'_3 + jx'_3$ – deňişlilikde birinji, ikinji we üçünji sarymlaryň kompleks garşylyklarydyr.

Üçsarymly transformatorlar üçin elektrik hereketlendiriji güýçler:

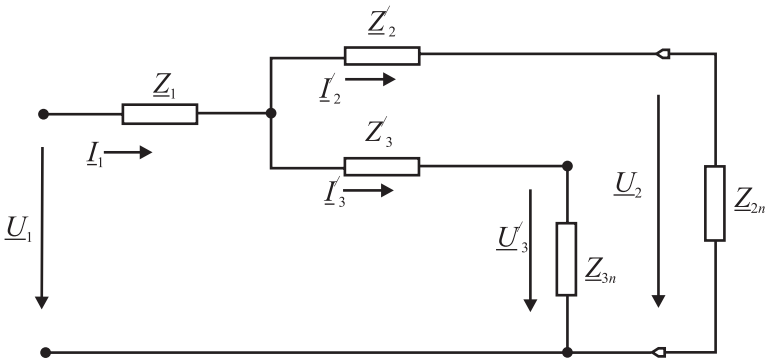
$$-E_1 = -E'_2 = -E'_3. \quad (1.59)$$

(1.56), (1.57) we (1.58) aňlatmalardan E_1 ; E'_2 ; E'_3 elektrik hereketlendiriji güýçleri kesgittläp, aşakdaky deňligi alarys:

$$\underline{U}_1 - \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 = -(\underline{U}'_2 + \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_2) = -(\underline{U}'_3 + \underline{Z}'_3 \cdot \underline{I}'_3). \quad (1.60)$$

Bu ýerde: $\underline{U}'_2 = \underline{Z}'_{2n} \cdot \underline{I}'_2$; $\underline{U}'_3 = \underline{Z}'_{3n} \cdot \underline{I}'_3$.

(1.55) ÷ (1.60) deňlemelere deňişli elektrik shema 1.38-nji suratda görkezilendir.



1.38-nji surat. Üçsarymly transformatoryň çalşyрма shemasy

Hasaplamalar üçin peýdalanylýan çalşyрма shemanyň düzümine girýän elementleriň parametrleri edil iki sarymly transformatoryňky ýaly kesgittlenýär.

Awtotransformatorlar

Birinji we ikinji sarymlarynyň arasynda magnit we elektrik baglanyşygy bolan transformatorlara awtotransformator diýilýär. Awtotransformatorlaryň birinji sarymyndan ikinji sarymyna energiýa diňe magnit akymy arkaly geçirilmän, onuň bir bölegi elektrik bagla-

nyşygy arkaly geçirilýär. Awtotransformatorlarda pes naprýaženiýeli sarym ýokary naprýaženiýeli sarymyň bir bölegi bolup hyzmat edýär. Awtotransformatorlaryň analizinde transformatorlar üçin alnan esasy gatnaşyklar peýdalanylýar.

Meselem.

Naprýaženiýeleriň gatnaşygy:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = K_A. \quad (1.61)$$

Toklaryň gatnaşygy:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{K_A}. \quad (1.62)$$

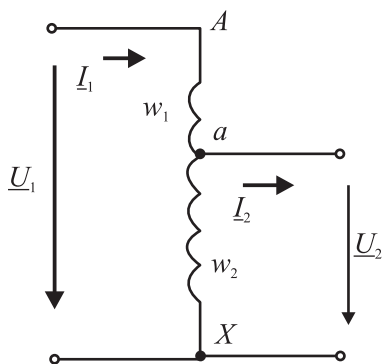
(1.61) we (1.62) aňlatmalarda $w_1 - A$ we X nokatlaryň arasyndaky doly sarymyň sargy sany, $w_2 - a$ we X nokatlaryň arasyndaky sarymyň sargy sany (1.39-njy surat).

Awtotransformatoryň işçi magnit akymy onuň birinji we ikinji sarymlaryň toklary tarapyndan bilelikde döredilýär.

$$w_1 \cdot \underline{I}_1 + w_2 \cdot \underline{I}_2 = w_1 \cdot \underline{I}_0. \quad (1.63)$$

Edil transformatorlarda bolşy ýaly, $U = \text{const}$ we $\underline{U}_1 = \underline{E}_1$ diýip kabul edilen ýagdaýynda I_0 tok we onuň döredýän magnit akymy awtotransformatoryň boş iş düzgüninden ($I_2 = 0$) nominal iş düzgünine çenli aralykda üýtgemän galýar. I_0 togy $I_{1,n}$ nominal tok bilen deňeşdirilende örän kiçidigi sebäpli, ony hasaba almazdan $\underline{I}_2 = -\underline{I}_1 \frac{w_1}{w_2} = -K_A \cdot \underline{I}_1$ diýip ýazyp bileris.

Bu aňlatmadan görnüşi ýaly, I_1 we I_2 toklar biri-biriniň garşysyna tarap ugrukdyrylandyr. Şonuň üçin awtotransformatoryň sarymynyň umumy $a-X$ böleginden (1.39-njy surat) geçýän tok, I_1 we I_2 toklaryň arifmetiki



1.39-njy surat. Birfazaly peseldiji awtotransformatoryň elektrik shemasy

tapawudyna deňdir. Peseldiji awtotransformatorlarda $I_1 < I_2$ bolandygy sebäpli:

$$\Delta I = I_2 - I_1 = K_A \cdot I_1 - I_1 = I_1 \cdot (K_A - 1). \quad (1.64)$$

$K_A < 2$ bolan ýagdaýynda ΔI ululyk I_1 tokdan kiçi bolýandygy sebäpli, sarymyň $a-X$ bölegini inçe simden saramaga mümkinçilik döredýär. Sarymyň $A-a$ we $a-X$ bölekleriniň arasynda özara magnit baglanyşygyň bardygy sebäpli birinji sarymyň ($A-a$) böleginden ikinji saryma ($a-X$) energiýanyň magnit akymy arkaly geçirilýän bölegine awtotransformatoryň hasaplama kuwwaty diýilýär.

$A-a$ bölek üçin:

$$S_{has} = I_1 \cdot (U_1 - U_2) = U_1 \cdot I_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{K_A}\right). \quad (1.65)$$

$a-X$ bölek üçin:

$$S_{has} = \Delta I \cdot U_2 = U_2 \cdot (I_2 - I_1) = I_2 \cdot U_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{K_A}\right). \quad (1.66)$$

Awtotransformatoryň çeşmeden kabul edýän doly kuwwaty: $S_{doly} = U_1 \cdot I_1$.

Ýüke berýän kuwwaty: $S_{yük} = U_2 \cdot I_2$.

Awtotransformatoryň özündäki energiýanyň ýitgilerini hasaba almazdan $S_{doly} = S_{yük}$ ýazyp bileris. Şeýlelikde, awtotransformatoryň kuwwaty iki sany: S_{has} hasaplama we S_{doly} doly kuwwatlara bölünýär. Awtotransformatoryň tutýan göwrümi we massasy hasaplama kuwwatyna görä kesgitlenilýär. S_{doly} doly kuwwat mydama S_{has} hasaplama kuwwatyndan uludyr ($S_{has} < S_{doly}$). Bu kuwwatlaryň tapawudy ($S_{doly} - S_{has}$) awtotransformatoryň birinji elektrik zynjyryndan onuň ikinjisine elektrik kontakty arkaly geçirilýär. Awtotransformatoryň nominal kuwwaty hökmünde onuň doly kuwwaty kabul edilýär.

Birdeň kuwwatdaky awtotransformatoryň tutýan göwrümi we onuň agramy iki sarymly güýç transformatoryň tutýan göwrümi hem-de agramy bilen deňeşdirilende degişlilikde kiçi we ýeňil bolýar. Bu

ýagdaý transformatoryň ähli kuwwatynyň onuň birinji zynjyryndan ikinjisine diňe magnit akymy arkaly geçirilmeýändigini bilen düşündirilýär. Awtotransformatorlar proyektirlenende onuň göwrümi we agramy hasaplama kuwwatyna görä hasaplanylýar. Awtotransformatoryň we transformatoryň hasaplama kuwwatlaryny özara deňeşdirip alarys:

$$\frac{S_{has}}{S_n} = \frac{I_n \cdot U_n \cdot \left(1 - \frac{1}{K_A}\right)}{I_n \cdot U_n} = 1 - \frac{1}{K_A}. \quad (1.67)$$

Bu aňlatmadan görnüşini ýaly, K_A transformasiýa koeffisiýenti 2-ä ýakyn boldugyça, bu gatnaşyk has-da tapawutlanýar. Şol sebäpli awtotransformatorlaryň transformasiýa koeffisiýentleri $K \leq 2,5$ -e ýakyn edip taýýarlanylýar.

Awtotransformatorlaryň göwrümi we agramy sarymlara saralýan simleriň hem-de magnitgeçirijini taýýarlamak üçin gerek bolan poladyň hasabyna azaldylýar. Ýokary we pes naprýaženiýeli sarymlary birikdirmegi we iki sarym üçin umumy bolan böleginiň inçe simden saralýandygy, sarymlary saramak üçin gerek bolan simiň azlygy bilen düşündirilýär. Sarymlary saramak üçin gerek bolan simiň mukdarynyň azalmagy onuň göwrüminiň kiçelmegine, transformatoryň oknosynyň daralmagyna we sarymyň boýunyň peselmegine getirýär. Bu hem öz gezeginde magnitgeçirijini taýýarlamak üçin gerek bolan materiallaryň azalmagyna alyp barýar. Netijede, magnit we elektrik ýitgileriň mukdarynyň peselmegi awtotransformatoryň peýdaly täsir koeffisiýentiniň meňzeş kuwwatly güýç transformatorlaryň peýdaly täsir koeffisiýentinden ýokary bolmagyna getirýär.

Awtotransformatoryň kemçiliklerine onuň ikinji zynjyrynyň birinji zynjyr bilen galwaniki baglanyşygynyň barlygy üçin ikinji sarymynyň izolýasiýasyny ýokary naprýaženiýe üçin taýýarlanmaly bolýar. Awtotransformatoryň ikinji kemçiligi onuň uly gysga utgaşma togunyň bolmagydyr. Gysga utgaşmanyň togy transformatoryň doly garşylygy bilen çäklendirilmän, diňe onuň ($A-a$) böleginiň garşylygy bilen çäklendirilýär. Ýagny ikinji sarymda gysga utgaşma ýüze çykan wagtynda birinji sarymyň ($a-X$) bölegi hem gysga utgaşýar.

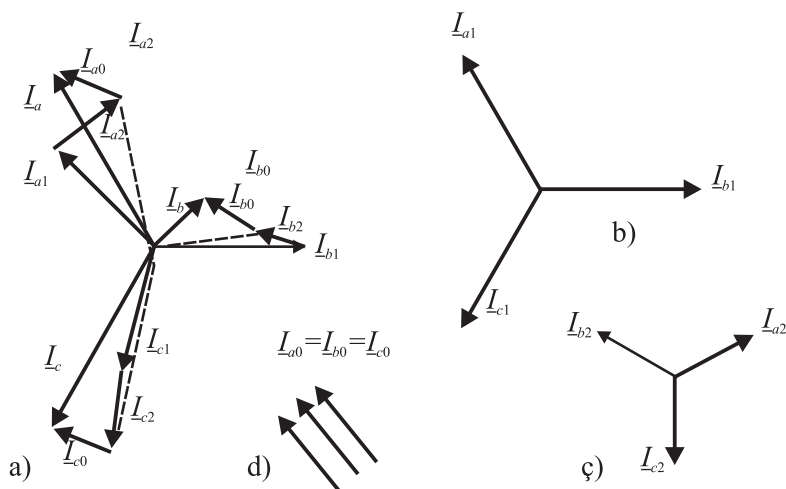
Bu bolsa gysga utgaşma wagtynda awtotransformatoryň magnitgeçirijisiniň doýgun ýagdaýyna barmagyna, onuň hem öz gezeginde magnitlendiriji toguň nominal tokdan birnäçe esse uly bolmagyna getirýär. Magnitlendiriji toguň ösmegi netijesinde gysga utgaşma togy has hem ýokary ululyklara barmaga mejbur bolýar. Elektroenergetikada awtotransformatörler naprýaženiýäni peseltmek we ýokary götermek üçin transformasiýa koeffisiýenti $K \leq 2,5$ -e ýakyn bolan ýagdaýlarda ulanylýar, (110 kW→220 kW; 220 kW→500 kW; 500 kW→750 kW; 750 kW→1150 kW). Şeýle-de awtotransformatörler uly kuwwatly üýtgeýän toguň hereketlendirijilerini işe goýbermekde hem giňden ulanylýar.

1.12. Üçfazly transformatorlaryň simmetrik däl iş düzgünleriniň hasaplanylşy

Elektroenergetika ulgamlarda ulanylýan üçfazly transformatorlaryň ýükleri, adatça, simmetrik däl häsiýete eýedir. Bu ýagdaý üçfazly setden iýmitlenýän birfazly ýükleriň kuwwatlarynyň we olaryň häsiýetleriniň biri-birinden tapawutlanmagy, kähalatlarda geçiriji liniýalarda gysga utgaşma hadysasynyň ýüze çykmagy sebäp bolýar. Şeýle ýagdaýyň ýüze çykmagy simmetrik däl setden iýmitlenýän üçfazly asinhron hereketlendirijiniň kuwwatynyň we energetiki görkezijileriniň peselmegine, sinhron generatorlarda goşmaça ýitgileriň döremegine, elektrik ýşyklandyryjy çyralarda kadaly iş düzgüniniň saklanmazlygyna getirýär. Transformatorlaryň ekspluatasiýasy döwründe onuň ýüküniň ýa-da oňa berilýän liniýa naprýaženiýeleriniň simmetrik ýagdaýynyň bozulmagy netijesinde onuň toklarynyň we naprýaženiýeleriniň näderejede üýtgejekdigine, olaryň haýsy ululyklarynyň göni maksatlar üçin ýol bererlikli dældigini hasaplamak zerurlygy ýüze çykýar.

Transformatorlaryň simmetrik däl iş düzgünlerinde olaryň toklaryny we naprýaženiýelerini hasaplamak üçin simmetrik düzüjilere dargatmak usuly giňden ulanylýar. Bu usul boýunça islendik simmetrik däl üçfazly toklar, naprýaženiýeler ýa-da magnit akymlar ulgamy, üç sany simmetrik: göni, ters we nol yzygiderlilikler ulgamyna

dargadylýar. Mysal hökmünde I_a , I_b , I_c simmetrik däl toklar ulgamy (a) we onuň simmetrik göni (b), ters (ç) we nol (d) yzygiderlilikde dargadylyşy 1.40-njy suratda görkezilendir.



1.40-njy surat. Simmetrik däl toklar ulgamy (a) we onuň simmetrik toklara (b – göni, ç – ters, d – nol) dargadylyşy

Simmetrik göni yzygiderliliğiň toklary $I_{a1} \rightarrow I_{b1} \rightarrow I_{c1}$, simmetrik ters yzygiderliliğiň toklary $I_{a2} \rightarrow I_{c2} \rightarrow I_{b2}$ tertipde gezekleşip gelýärler. Nol yzygiderliliğiň toklarynyň modullary özara deň bolup ($I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$), fazalary boýunça gabat gelýärler. Şeýlelikde, I_a , I_b , I_c simmetrik däl toklar ulgamy, toklaryň simmetrik göni, ters we nol düzüjileriň jemi görnüşde ýazylýar:

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= \underline{I}_{a1} + \underline{I}_{a2} + \underline{I}_{a0}; \\ \underline{I}_b &= \underline{I}_{b1} + \underline{I}_{b2} + \underline{I}_{b0}; \\ \underline{I}_c &= \underline{I}_{c1} + \underline{I}_{c2} + \underline{I}_{c0}. \end{aligned} \quad (1.68)$$

Hasaplamlarda simmetrik ulgamlaryň her biri aýratynlykda hasaplanyp, üsti-üstüne goýmak usuly arkaly goşulyp, jemleýji toklar, naprýaženiýeler we magnit akymalary kesgitlenilýär. Hasaplamlar ýerine ýetirilende transformatoryň magnit ulgamy doýgun däl ýagdaýda diýip kabul edilýär. Transformatoryň ikinji sarymlarynyň simmetrik däl liniýa toklarynyň ulgamy simmetrik düzüjilere dargadylanda nol

zyygiderliligiň toklarynyň bolmagy ýa-da bolmazlygy bu sarymlaryň birikdiriliş toparlaryna baglydyr. Ýagny nol zyygiderliligiň togunyň ýüze çykmagy üçin hökman bu toklar geçer ýaly ýapyk konturyň bolmagy zerurdyr. Nol zyygiderliligiň toklarynyň ululyklarynyň we fazalarynyň biri-birine deňligi sebäpli bu düzüji transformatoryň ikinji sarymlary neýtral simli “Ýyldyz” görnüşli birikdirilen ýagdaýynda ýüze çykýar. Ýagny bu ýagdaýda nol zyygiderliligiň togy neýtral simiň üstünden ýapyk zynjyry emele getirýär. Neýtral simdäki tok nol zyygiderliligiň togunyň üçeldilen ululygyna deňdir. Ikinji sarymlaryň beýleki birikdiriliş toparlarynda nol zyygiderliligiň toklary ýüze çykmaýar. Ýagny simmetrik däl toklar ulgamynyň düzümine diňe göni we ters zyygiderliligiň toklary girýärler.

Transformatoryň iş prosesleriniň onuň fazalarynyň gezekleşip gelşine bagly dældigi sebäpli, göni we ters zyygiderliligiň toklary birinji sarymdan ikinji saryma deň derejede transformirlenýärler. Transformatoryň sarymlarynyň kompleks garşylyklary bolsa bu toklaryň ikisi üçin hem deňdir. Bu bolsa hasaplamalar wagtynda göni we ters zyygiderliligiň toklaryna bilelikde seretmäge mümkinçilik berýär. Emma nol zyygiderliligiň togunyň häsiýetiniň göni we ters zyygiderliligiň toklaryndan tapawutlydygy sebäpli, transformatoryň sarymlarynyň bu toga görkezýän garşylyklary hem tapawutlydyr.

Simmetrik däl ýükli transformatorlaryň sarymlarynyň dürli birikdiriliş toparlarynda hasaplamalar ýerine ýetirilende birinji sarymlaryň liniýa naprýaženiýeleri we ikinji sarymlaryň liniýa toklary berlen diýip kabul edilýär. Şeýle-de hasaplamalary ýeňilleşdirmek maksady bilen transformatoryň magnitlendiriji togunyň onuň nominal togundan örän kiçiligi sebäpli, ol hasaba alynmaýar ($I = 0$).

1.12.1. Ikinji sarymlary neýtral simli “Ýyldyz” görnüşli birikdirilen transformatorlaryň toklarynyň simmetrik däl ýükde hasaplanylyşy

Transformatorlaryň ikinji sarymlary “Ýyldyz” görnüşli birikdirilende $\underline{I}_{aL}, \underline{I}_{bL}, \underline{I}_{cL}$ liniýa toklar, $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$ faza toklara deňdir, $[\underline{I}_a = \underline{I}_{aL}; \underline{I}_b = \underline{I}_{bL}; \underline{I}_c = \underline{I}_{cL}]$.

İkinji sarymyň faza toklarynyň göni yzygiderliliginiň düzüjisi:

$$\underline{I}_{a1} = \left(\frac{\underline{I}_a + a \cdot \underline{I}_b + a^2 \cdot \underline{I}_c}{3} \right); \quad \underline{I}_b = a^2 \cdot \underline{I}_{a1}; \quad \underline{I}_{c1} = a \cdot \underline{I}_{a1}. \quad (1.69)$$

Ters yzygiderliligiň düzüjisi:

$$\underline{I}_{a2} = \frac{(\underline{I}_a + a^2 \cdot \underline{I}_b + a \cdot \underline{I}_c)}{3}; \quad \underline{I}_{b2} = a \cdot \underline{I}_{a2}; \quad \underline{I}_{c2} = a^2 \cdot \underline{I}_{a2}. \quad (1.70)$$

Nol yzygiderliligiň düzüjisi:

$$\underline{I}_{a0} = \underline{I}_{b0} = \underline{I}_{c0} = \frac{\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c}{3}. \quad (1.71)$$

Bu aňlatmalarda:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Neýtral simdäki tok:

$$\underline{I}_n = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 3 \cdot \underline{I}_{a0}. \quad (1.72)$$

Ýokarda bellenilişi ýaly, kuwwatly güýç transformatorlarda \underline{I}_0 magnitlendiriji toguň ululygynyň onuň nominal tokdan has kiçiligini göz önünde tutup, şeýle ýazyp bileris:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}'_2 = -\underline{I}'_2. \quad (1.73)$$

Onda:

$$\underline{I}_{A1} = -\underline{I}'_{a1}; \quad \underline{I}_{A2} = -\underline{I}'_{a2}; \quad (1.74)$$

$$\underline{I}_{B1} = -\underline{I}'_{b1}; \quad \underline{I}_{B2} = -\underline{I}'_{b2}; \quad (1.75)$$

$$\underline{I}_{C1} = -\underline{I}'_{c1}; \quad \underline{I}_{C2} = -\underline{I}'_{c2}. \quad (1.76)$$

Nol yzygiderliligiň toklary üçin şeýle gatnaşygy diňe birinji sarymlary “Üçburçluk” ýa-da neýtral simli “Ýyldyz” görnüşli birikdirilen ýagdaýda ýazmak mümkindir:

$$\underline{I}_{A0} = -\underline{I}'_{a0} = \underline{I}_{B0} = -\underline{I}'_{b0} = \underline{I}_{C0} = -\underline{I}'_{c0}. \quad (1.77)$$

a) Transformatoryň birinji sarymlary neýtral simli “Ýyldyz” görnüşli birikdirilende onuň faza toklary ikinji sarymyň degişli faza toklaryna deňdir. Onda seredilýän ýagdaý üçin:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0} = -\left(\underline{I}'_{a1} + \underline{I}'_{a2} + \underline{I}_{a0}\right) = -\underline{I}'_a. \quad (1.78)$$

Neýtral simdäki nol yzygiderliligiň togy:

$$\underline{I}_N = 3 \cdot \underline{I}_{A0} = 3 \cdot \underline{I}'_{a0} = -\underline{I}'_n.$$

b) Transformatorlaryň birinji sarymlary “Üçburçluk” görnüşli birikdirilende onuň faza toklary ikinji sarymyň degişli faza toklaryna deňdir. Emma onuň liniýa toklary öz düzüminde nol yzygiderliligiň toklaryny saklamaýarlar. Ýagny bu ýagdaýda nol yzygiderliligiň toklary sarymlaryň emele getirýän üçburçlugynyň kontury boýunça aýlanýandygy sebäpli, olar liniýa simlerine düşmeýärler. Şeýlelikde, birinji sarymyň liniýa toklary:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{AB} &= \underline{I}_A - \underline{I}_B = (\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0}) - (\underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{B0}) = \\ &= (\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2}) - (\underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2}) = -\left(\underline{I}'_{a1} + \underline{I}'_{a2}\right) + \left(\underline{I}'_{b1} + \underline{I}'_{b2}\right). \end{aligned}$$

ç) Transformatorlaryň birinji sarymlary neýtral simsiz “Ýyldyz” görnüşli birikdirilende, bu zynjyrdan nol yzygiderliligiň togy üçin ýapyk konturyň ýoklugy sebäpli, birinji sarymlara nol yzygiderliligiň togy transformirlenmeýär:

$$\underline{I}_{A0} = \frac{1}{3} \cdot \underline{I}_N = \frac{(\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C)}{3} = 0.$$

Bu ýagdaýda transformatoryň birinji sarymyň fazalaryndan diňe göni we ters yzygiderliligiň toklary geçýärler:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{(A)} = (\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2}) = -\left(\underline{I}'_{a1} + \underline{I}'_{a2}\right) = -\underline{I}'_{(a)} = -\left(\underline{I}'_a - \underline{I}'_{a0}\right); \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{(B)} = (\underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2}) = -\left(\underline{I}'_{b1} + \underline{I}'_{b2}\right) = -\underline{I}'_{(b)} = -\left(\underline{I}'_b - \underline{I}'_{b0}\right); \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{(C)} = (\underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2}) = -\left(\underline{I}'_{c1} + \underline{I}'_{c2}\right) = -\underline{I}'_{(c)} = -\left(\underline{I}'_c - \underline{I}'_{c0}\right). \end{aligned} \quad (1.79)$$

Ýokarda seredilen ýagdaýlardan görnüşi ýaly, birinji sarymlaryň birikdirilişiniň ähli görnüşlerinde ikinji sarymlarynyň göni we ters yzygiderliligiň toklary birinji sarymlara deň derejede transformirlenýär. Bu bolsa transformatoryň doly toklaryny diňe göni we ters yzygiderliligiň toklarynyň jemine hem-de nol yzygiderliliginiň toguna bölmäge mümkinçilik berýär: $\underline{I}_a = \underline{I}_{(a)} + \underline{I}_{a(0)}$, bu ýerde $\underline{I}_{(a)} = \underline{I}_{a1} + \underline{I}_{a2}$ göni we ters yzygiderliligiň toklarynyň jemidir. 1.40-njy suratda $I_{(a)}$, $I_{(b)}$, $I_{(c)}$ toklar punktir çyzyklar bilen görkezilendir.

1.12.2. Ikinji sarymlary “Üçburçluk” görnüşli birikdirilen transformatorlaryň toklarynyň simmetrik däl ýükde hasaplanylşy

Transformatoryň ikinji sarymlary “Üçburçluk” görnüşli birikdirilende, onuň liniýa toklarynyň jemi mydama nola deňdir: $\underline{I}_{aL} + \underline{I}_{bL} + \underline{I}_{cL} = 0$.

Liniýa toklarynyň faza toklarynyň tapawudyna deňligi:

$$\underline{I}_{aL} = \underline{I}_a - \underline{I}_b; \quad \underline{I}_{bL} = \underline{I}_b - \underline{I}_c; \quad \underline{I}_{cL} = \underline{I}_c - \underline{I}_a, \quad (1.80)$$

şeýle-de faza toklarynyň öz düzüminde nol yzygiderliligiň toguny saklamaýanlygy hem-de olaryň jeminiň nola deňligi:

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0 \quad (1.81)$$

sebäpli, faza toklary liniýa toklaryň üsti arkaly aşakdaky görnüşde ýazmak mümkin:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{I}_{aL} - \underline{I}_{cL}}{3}; \quad \underline{I}_b = \frac{\underline{I}_{bL} - \underline{I}_{aL}}{3}; \quad \underline{I}_c = \frac{\underline{I}_{cL} - \underline{I}_{bL}}{3};$$

$$\underline{I}_{aL} - \underline{I}_{cL} = (\underline{I}_a - \underline{I}_b - \underline{I}_c + \underline{I}_a) = 2 \cdot \underline{I}_a - (\underline{I}_b + \underline{I}_c) = 2 \cdot \underline{I}_a + \underline{I}_a = 3 \cdot \underline{I}_a.$$

Transformatoryň ikinji sarymlaryny “Üçburçluk” görnüşli birikdirilende onuň faza we liniýa toklarynyň öz düzüminde nol yzygiderliligiň toguny saklamaýanlygy sebäpli, bu toklar tutuşlygyna birinji sarymlara transformirlenýär. Bu ýagdaý birinji sarymlaryň islendik birikdiriliş toparyna degişlidir. $I_A = -I'_a$; $I_B = -I'_b$; $I_C = -I'_c$. Trans-

formatoryň birinji sarymlary neýtral simli “Ýyldyz” görnüşli birikdirilende: $\underline{I}_N = 3 \cdot \underline{I}_{A0} = -3 \cdot \underline{I}'_{a0} = 0$.

1.12.3. Transformatoryň birinji sarymlarynyň faza naprýaženiýeleriniň simmetrik däl ýükde hasaplanylşy

Hasaplamalarda U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} liniýa naprýaženiýeler ululyklary berlen diýip kabul edilýär. Simmetrik däl ýükde transformatoryň birinji sarymlarynyň U_A , U_B , U_C faza naprýaženiýeleriniň deňlemesi edil simmetrik ýükdäki ýaly ($\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1$) görnüşde ýazylýar:

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= -\underline{E}_{(A)} - \underline{E}_{A0} + \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_A; \\ \underline{U}_B &= -\underline{E}_{(B)} - \underline{E}_{B0} + \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_B; \\ \underline{U}_C &= -\underline{E}_{(C)} - \underline{E}_{C0} + \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_C.\end{aligned}\tag{1.82}$$

Ýöne bu deňlemelerde E_1 elektrik hereketlendiriji güýjüň ýerine göni, ters we nol yzygiderliligiň elektrik hereketlendiriji güýçleriniň jemi girýär. Bu deňliklerde $E_{A0} = E_{B0} = E_{C0}$ elektrik hereketlendiriji güýçler özara deňdirler.

a) Transformatoryň birinji sarymlary “Üçburçluk” görnüşli birikdirilende onuň faza naprýaženiýeleriniň liniýa naprýaženiýelerine özara deňligi sebäpli, olary hasaplamak zerurlygy ýüze çykmaýar. Sarymlaryň emele getirýän üçburçlugynda nol yzygiderliligiň toklarynyň döredýän magnit akymynyň transformatoryň ikinji sarymlarynyň nol yzygiderliliginiň magnit akymyny deňagramlaşýandygy sebäpli $E_{A0} = 0$ bolýar.

b) Transformatoryň birinji sarymlary neýtral simsiz “Ýyldyz” görnüşli birikdirilende onuň faza naprýaženiýeleri berlen liniýa naprýaženiýeleri arkaly aşakdaky görnüşde kesgitlenýändigini we sarymyň elektrik hereketlendiriji güýçleriniň hem-de toklarynyň düzüminde nol yzygiderliligiň E_0 , I_0 düzüjileriniň ýoklugyny hasaba alyp:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B; \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C.\end{aligned}\tag{1.83}$$

hem-de:

$$\underline{E}_{(A)} + \underline{E}_{(B)} + \underline{E}_{(C)} = (\underline{E}_{A1} + \underline{E}_{B1} + \underline{E}_{C1}) + (\underline{E}_{A2} + \underline{E}_{B2} + \underline{E}_{C2}) = 0;$$

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = (\underline{I}_{A1} + \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{C1}) + (\underline{I}_{A2} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{C2}) = 0$$

deňlikleri göz öňünde tutup, (1.82) deňlemeler ulgamyndan aşakdaky deňligi ýazyp bileris:

$$\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = -3 \cdot \underline{E}_{A0} = 3 \cdot \underline{Z}'_0 \cdot \underline{I}'_{a0}, \quad (1.84)$$

bu ýerde \underline{Z}'_0 – nol yzygiderliligiň garşylygynyň getirilen ululygy; \underline{I}'_{a0} – ikinji sarymyň nol yzygiderliliginiň togunyň birinji sarymyň toguna getirilen ululygy.

(1.83) deňlemeler ulgamynyň birinji deňliginden ikinjisini aýryp we (1.84) deňlemäni hasaba alyp ýazarys:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B - (\underline{U}_C - \underline{U}_A) = \underline{U}_A - \underline{U}_B - \underline{U}_C + \underline{U}_A + \underline{U}_A + \underline{U}_A = \\ &= (\underline{U}_A - \underline{U}_A - \underline{U}_A) - (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C) = 3\underline{U}_A + 3\underline{E}_{0A}. \end{aligned}$$

Bu ýerden:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \frac{\underline{U}_{AB} - \underline{U}_{CA}}{3} - \underline{E}_{A0}; \\ \underline{U}_B &= \frac{\underline{U}_{BC} - \underline{U}_{AB}}{3} - \underline{E}_{A0}; \\ \underline{U}_C &= \frac{\underline{U}_{CA} - \underline{U}_{BC}}{3} - \underline{E}_{A0}. \end{aligned} \quad (1.85)$$

Bu deňlemelerde $\underline{U}_{(A)}$, $\underline{U}_{(B)}$ we $\underline{U}_{(C)}$ ikinji sarymlarda nol yzygiderliligiň togunyň ýok wagtyndaky faza naprýaženiýeleri. Has takygy ($\underline{I}_{a0} = 0$) we ($\underline{E}_{A0} = -\underline{Z}'_0 \cdot \underline{I}_{a0} = 0$).

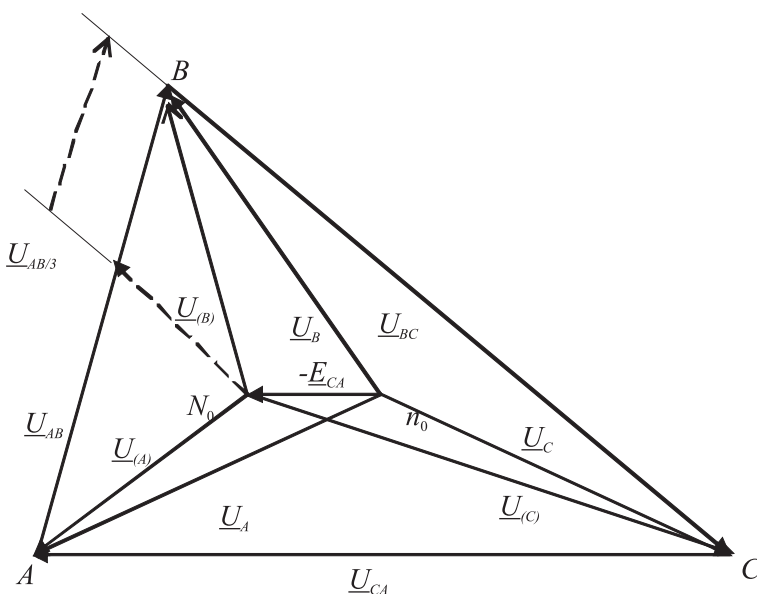
Nol yzygiderliligiň togunyň ýok wagtynda ($\underline{I}_{a0} = 0$) liniýa naprýaženiýeleriň simmetrik ýagdaýynda faza naprýaženiýeleriň simmetrik ýagdaýy saklanýar:

$$\underline{U}_{(A)} = \underline{U}_{(B)} = \underline{U}_{(C)} = \underline{U}_A = \underline{U}_B = \underline{U}_C.$$

Nol yzygiderliligiň togunyň ýüze çykmagy ($\underline{I}_{a0} \neq 0$) naprýaženiýeleriň üçburçlugynyň merkeziniň E_0 aralyga üýtgemegine getirýär

(N_0 -dan n_0 -a süýşýär) we faza naprýaženiýeleriniň simmetrik ýagdaýy saklanmaýar (1.41-nji surat): $\underline{U}_A \neq \underline{U}_B \neq \underline{U}_C$.

Transformatoryň faza naprýaženiýeleriniň simmetrik ýagdaýynyň saklanmazlygy sterženli transformatorlarda bronosterženli transformatorlaryňka görä has az bolýar. Sebäbi sterženli transformatorlarda nol yzygiderliligiň togunyň döredýän magnit akymy üçin magnit garşylygy bronosterženli ýa-da birfazaly toparlaýyn transformatorlaryňkydan has uly bolýar. (1.85) deňlemenden görnüşi ýaly, faza naprýaženiýeleriniň simmetrik ýagdaýynyň saklanmazlygy liniýa naprýaženiýeleriniň simmetrik däldegi netijesinde hem ýüze çykmagy mümkindir. Faza naprýaženiýeleriniň simmetrik ýagdaýyny saklamak üçin transformatoryň birinji sarymlary “Üçburçluk” görnüşli birikdirilýär. Bu ýagdaýda ikinji sarymlarda nol yzygiderliligiň togy ýüze çykan wagtynda-da birinji sarymlaryň faza naprýaženiýesiniň simmetrik ýagdaýy saklanýlyar.



1.41-nji surat. Transformatoryň birinji sarymlarynyň naprýaženiýesiniň simmetrik däl ýükdäki diagrammasy

1.12.4. Simmetrik däl ýükde transformatoryň ikinji sarymlarynyň naprýaženiýeleriniň hasaplanylşy

Transformatoryň ikinji sarymlarynyň faza naprýaženiýeleriniň deňlemesini onuň simmetrik ýükli ýagdaýyndaky deňlemesine meňzeşlikde: $-\underline{U}'_a = -\underline{E}'_{(a)} - \underline{E}'_{a0} + \underline{Z}'_a \cdot \underline{I}'_a$ aňlatmany ýazyp bileris. $-\left(\underline{E}'_{(a)} + \underline{E}_{a0}\right) = -\left(\underline{E}_{(A)} + \underline{E}_{(A0)}\right)$ deňligi hasaba alyp, bu aňlatmany aşakdaky görnüşe getirýäris:

$$\begin{aligned} -\underline{U}'_a &= -\underline{E}_{(A)} - \underline{E}_{A0} + \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_a; \\ -\underline{U}'_b &= -\underline{E}_{(B)} - \underline{E}_{B0} + \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_b; \\ -\underline{U}'_c &= -\underline{E}_{(C)} - \underline{E}_{C0} + \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_c. \end{aligned} \quad (1.86)$$

Bu deňlemeleriň düzüminden (1.82) deňlemeleriň kömegi arkaly elektrik hereketlendiriji güýçleri aýryp, ikinji sarymlaryň faza naprýaženiýelerini birinji sarymlaryň faza naprýaženiýeleriniň üsti arkaly aňladyp bileris:

$$\begin{aligned} -\underline{U}'_a &= \underline{U}_A - \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_A + \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_a = \underline{U}_A + \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_a + \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_a = \underline{U}_A + \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_a; \\ -\underline{U}'_b &= \underline{U}_B - \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_B + \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_b = \underline{U}_B + \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_b + \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_b = \underline{U}_B + \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_b; \\ -\underline{U}'_c &= \underline{U}_C - \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_C + \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_c = \underline{U}_C + \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_c + \underline{Z}'_2 \cdot \underline{I}'_c = \underline{U}_C + \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_c. \end{aligned} \quad (1.87)$$

Umumy ýagdaý üçin ýazylan (1.87) deňlemeler ulgamy birinji we ikinji sarymlaryň islendik birikdiriliş toparlary üçin ulanarlyklydyr.

a) Transformatoryň birinji sarymlary “Üçburçluk” görnüşli, ikinji sarymlary neýtral simli “Ýyldyz” görnüşli birikdirilende ikinji sarymlaryň nol yzygiderlilikiniň togunyň döredýän magnit akymy birinji sarymyň üçburçlugynyň konturyndan nol yzygiderliliğiň togunyň döredýän magnit akymy tarapyndan deňagramlaşdyrylýar. Netijede, nol yzygiderliliğiň toguny döredýän magnit akymynyň kompensirlenýändigini $(\Phi_0) = 0$ sebäpli, birinji sarymlaryň toklary ikinji sarymlaryň birinjinikiň getirilen toklaryna deňdir:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A0} = -\underline{I}'_{a1} - \underline{I}'_{a2} - \underline{I}'_{a0} = -\underline{I}'_a; \\ \underline{I}_B &= -\underline{I}'_b; \quad \underline{I}_C = -\underline{I}'_c.\end{aligned}$$

Seredilen ýagdaýda ikinji sarymlaryň birinjiňkä getirilen faza naprýaženiýeleri birinji sarymlaryň faza naprýaženiýelerinden ululyklary boýunça az tapawutlanýarlar. Bu tapawut gysga utgaşmanyň garşylygyndaky naprýaženiýäniň peselmegine deňdir:

$$\begin{aligned}-\underline{U}'_a &= \underline{U}_A + \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_a; \\ -\underline{U}'_b &= \underline{U}_B + \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_b; \\ -\underline{U}'_c &= \underline{U}_C + \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_c.\end{aligned}\tag{1.88}$$

Bu aňlatmalarda: $\underline{Z}_{g,u} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2$ – gysga utgaşmanyň kompleks garşylygy.

Şeýlelikde, seredilýän ýagdaýda birinji sarymlaryň simmetrik faza naprýaženiýelerinde ikinji sarymlaryň faza naprýaženiýeleri hem öz simmetrik ýagdaýyny saklaýarlar. Ýagny ikinji sarymlarda toklaryň simmetrik ýagdaýynyň saklanylmazlygy ikinji sarymlaryň faza naprýaženiýeleriniň simmetrik ýagdaýyna örän az tasir edýär.

b) Transformatoryň birinji sarymlary “Ýyldyz” ikinji sarymlary “Üçburçluk” görnüşli birikdirilende ikinji we birinji sarymlaryň nol yzygiderliliginiň toklarynyň $\underline{I}_{A0} = \underline{I}_{a0} = 0$ deňligi sebäpli (1.88) deňlemeler ulgamyny ikinji sarymlaryň faza naprýaženiýelerini ululyklaryny hasaplamak üçin ulanmak mümkin. Bu ýagdaýda birinji we ikinji sarymlaryň toklary biri-birini deňagramlaşdyrýar:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} = -\underline{I}'_{a1} - \underline{I}'_{a2} = -\underline{I}'_a; \quad \underline{I}_B = -\underline{I}'_b; \quad \underline{I}_C = -\underline{I}'_c.$$

Nol yzygiderliligiň togunyň döredýän magnit akymynyň we onuň indusirleýän elektrik hereketlendiriji güýjüň nola deňligi ($\Phi_0 = 0$, $E_0 = 0$) sebäpli, birinji sarymlaryň faza naprýaženiýeleri degişli liniýa naprýaženiýeleriniň emele getirýän üçburçlugynyň agyrylyk merkezinde kesişýärler.

$$\underline{U}_A = \underline{U}_{(A)}; \quad \underline{U}_B = \underline{U}_{(B)}; \quad \underline{U}_C = \underline{U}_{(C)}.$$

Ýagny simmetrik liniýa naprýaženiýelerde faza naprýaženiler öz simmetrik ýagdaýyny saklaýarlar.

ç) Transformatoryň birinji sarymlary “Ýyldyz”, ikinji sarymlary neýtral simli “Ýyldyz” birikdirilende ikinji sarymda nol yzygiderliligiň togunyň ýüze çykmagy ikinji we birinji sarymlaryň faza naprýaženiýeleriniň simmetrik ýagdaýynyň has uly saklanylmazlygyna getirýär. Bu ýagdaýda birinji sarymlarda nol yzygiderliligiň togy ýüze çykmaýanlygy üçin:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A = \underline{I}_{(A)} &= \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} = -\underline{I}'_{a1} - \underline{I}'_{a2} = -\underline{I}'_{(a)}; \\ \underline{I}'_a &= \underline{I}'_{a1} + \underline{I}'_{a2} + \underline{I}'_{a0} = \underline{I}'_{(a)} + \underline{I}'_{a0}.\end{aligned}$$

(1.86) we (1.87) deňlemeler ulgamyny hasaba alyp: (1.88) deňlemäni aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\begin{aligned}-\underline{U}'_a &= \left(\underline{U}_{(A)} + \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_{a1} \right) + \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_{a2} + \underline{Z}'_n \cdot \underline{I}'_{a0}; \\ -\underline{U}'_b &= \left(\underline{U}_{(B)} + \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_{b1} \right) + \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_{b2} + \underline{Z}'_n \cdot \underline{I}'_{a0}; \\ -\underline{U}'_c &= \left(\underline{U}_{(C)} + \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_{c1} \right) + \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_{c2} + \underline{Z}'_n \cdot \underline{I}'_{a0}.\end{aligned}\tag{1.89}$$

bu ýerde $\underline{Z}_n = \underline{Z}'_0 + \underline{Z}'_2$ – ikinji sarymlaryň birinjiniňkä getirilen nol yzygiderliligiň garşylygy.

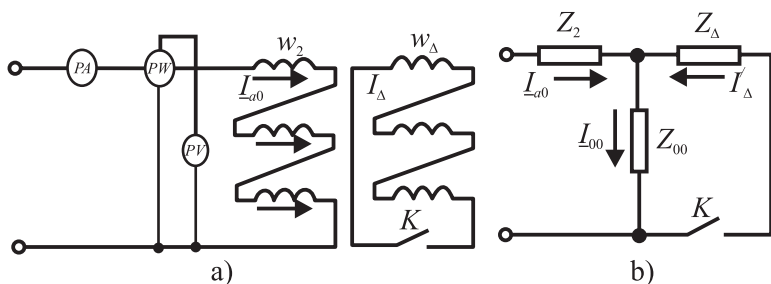
Birinji sarymlaryň liniýa naprýaženiýeleriniň simmetrik ýagdaýynda $\underline{U}_{(A)}$, $\underline{U}_{(B)}$, $\underline{U}_{(C)}$ faza naprýaženiýeler hem öz simmetrik ýagdaýyny saklaýarlar. Ikinji sarymlaryň faza naprýaženiýeleriniň simmetrik dældigi ters we nol yzygiderliligiň toklaryndan emele gelýän $\left(\underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_{a2}; \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_{b2}; \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_{c2}; \right)$ we $\left(\underline{Z}'_n \cdot \underline{I}_{a0} \right)$ naprýaženiýeleriň hasabyna ýüze çykýar. U_a , U_b we U_c faza naprýaženiýeleriň saklanylmazlygynyň esasy bölegini nol yzygiderliligiň togunyň döredýän naprýaženiýesi ýüze çykýar (*1.41-nji surata seret*). Şol sebäpli Y/Y_n görnüşli birikdiriliş topary toparlaýyn birikdirilýän birfazaly transformatorlarda peýdalanylmaýar. Faza naprýaženiýeleriniň simmetrik dældiginiň önüni almak maksady bilen neýtral simden geçýän toguň ululygy ikinji sarymlaryň nominal togunyň 25%-inden ýokary geçmez ýaly edilýär. Şeýle ýagdaýda nol yzygiderliligiň to-

gunyň ululygy $25/3 = 8,9\%$ den ýokary geçmeýär. Toparlaýyn birikdirilýän birfazaly bronosterženli we uly kuwwatly transformatorlar Y/Y_n görnüşli birikdirilende olaryň ikinji sarymlarynyň faza naprýaženiýeleriniň simmetrik ýagdaýynyň saklanmazlygynyň önüni almak maksady bilen bu transformatorlarda goşmaça kompensirleýji üçünji sarymlar ulanylýar we ol sarymlar “Üçburçluk” görnüşli birikdirilýär. Üçburçlugyň konturynda emele gelen nol yzygiderliligiň togy ikinji sarymyň nol yzygiderliliginiň toguny kompensirleýär. Netijede, ikinji sarymlaryň faza naprýaženiýeleriniň simmetrik dældigi peselýär. “Üçburçluk” görnüşli birikdirilen sarym kähalatda transformatordan ýüke energiýa bermek üçin hem ulanylýar. Nol yzygiderliligiň togy ikinji sarymlaryň liniýa naprýaženiýelerine täsir etmeýär. Ikinji sarymlaryň liniýa naprýaženiýeleriniň simmetrik ýagdaýynyň saklanmazlygyna diňe ters yzygiderliligiň toklarynyň täsir edýändigini (1.88) deňlemäniň birinji deňliginden ikinjisini aýryp göz ýetirmek mümkindir:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_b - \underline{U}_a = \underline{U}_{(A)} - \underline{U}_{(B)} + (\underline{I}'_{a1} - \underline{I}'_{b1}) \cdot \underline{Z}_{g,u} + (\underline{I}'_{a2} - \underline{I}'_{b2}) \cdot \underline{Z}_{g,u}.$$

1.12.5. Transformatorlaryň ikinji sarymlarynyň nol yzygiderliliginiň garşylygynyň eksperimental kesgitlenilişi

Tejribe arkaly transformatoryň ikinji sarymlarynyň garşylygy nol yzygiderliligiň togy üçin kesgitlenende sarymlardaky toklar öz fazalary we ululyklary boýunça deň geler ýaly şert döredilýär. Şeýle şerti döretmek üçin transformatoryň ikinji sarymlaryny 1.42-nji a suratdaky ýaly görnüşde birikdirmek ýeterlikdir.



1.42-nji surat. Nol yzygiderliligiň garşylygyny eksperimental kesgitlemek üçin shema (a) we onuň çasyрма shemasy (b)

Zynjyryň togunyň aktiw kuwwatyny we naprýaženiýesini ölçäp, nol yzygiderliligiň garşylygyny aşakdaky görnüşde kesgitleýärler:

$$Z_{yzg} = \frac{U}{3 \cdot I} ; \quad R_{yzg} = \frac{P}{3 \cdot I^2} ; \quad X_{yzg} = \sqrt{Z_{yzg}^2 - R_{yzg}^2} . \quad (1.90)$$

Nol yzygiderliligiň kompleks garşylygynyň reaktiw düzüjisi nol yzygiderliligiň X_0 we ikinji sarymyň X_2 induktiv garşylyklarynyň jeminden ybaratdyr: $X_{yzg} = X_0 + X_2$.

Nol yzygiderliligiň kompleks garşylygynyň aktiw düzüjisi R_0 özara induksiýa garşylygynyň we ikinji sarymyň R_2 aktiw garşylygynyň jeminden ybaratdyr: $R_{yzg} = R_0 + R_2$.

Eger-de transformator Y/Y_0 görnüşli birikdirilen sarymlardan başga “Üçburçluk” görnüşli birikdirilen üçünji sarymlar hem bar bolsa, onda ol nol yzygiderliligiň elektrik hereketlendiriji güýjüne görä gysga birikdirilen diýip kabul etmeli. Bu sarymda emele gelen I_Δ tok nol yzygiderliligiň toguny we onuň garşylygyny ep-esli derejede peseldýär, ýagny kompensirleýär. Bu ýagdaý üçin nol yzygiderliligiň garşylygy kesgitlenende shemadaky K açar ýapyk (birikdirilen) ýagdaýa geçirilýär (1.42-nji a surat). Nol yzygiderliligiň garşylygy aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

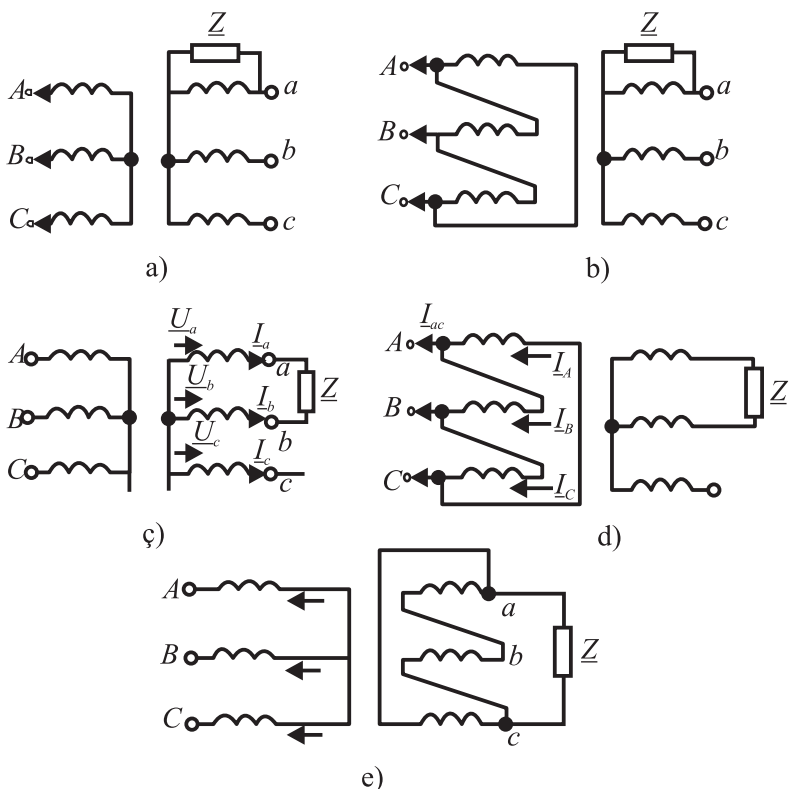
$$Z_{yzg.\Delta} = Z_2 + \frac{Z'_\Delta \cdot Z_0}{Z'_\Delta + Z_0} \approx Z_2 + Z'_\Delta \ll Z_{yzg} . \quad (1.91)$$

1.12.6. Transformatoryň ikinji sarymlarynyň diňe bir fazasyna ýa-da iki fazasynyň arasyna ýük birikdirilende ýüze çyjak toklaryň hasaplanylşy

Sarymlary Y/Y_0 ýa-da Δ/Y_0 görnüşli birikdirilen transformatoryň ikinji sarymynyň diňe bir fazasyna ýük birikdirilen ýagdaýynda olaryň toklarynyň hasaplanylşy.

Hasaplamalarda transformatoryň $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L$ liniýa naprýaženiýeleriniň we ýüküň Z garşylygynyň ululyklary berlen diýip kabul edilýär. Transformatoryň bir fazasyna ýük birikdirilen ýagdaýlary üçin shemalar 1.43-nji a we b suratlarda görkezilendir.

a) Sarymlary Y/Y_0 birikdirilen transformatoryň bir fazasyna ýük birikdirilen ýagdaýynda ýüze çykJak toklaryň hasaplanylşy (1.43-nji a surat).



1.43-nji surat

Seredilýän ýagdaýda \underline{I}_a faza togy Z garşylykly ýüküň üsti arkaly geçýär. Beýleki fazalaryň toklary $I_b = I_c = 0$ deň. Nol yzygiderliligiň togy: $\underline{I}_{a0} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c) = \frac{\underline{I}_a}{3}$.

„a“ fazadaky göni we ters yzygiderliligiň toklarynyň jemi:

$$\underline{I}_{(a)} = \underline{I}_{a1} + \underline{I}_{a2} = \underline{I}_a - \underline{I}_{a0} = \frac{2 \cdot \underline{I}_a}{3}.$$

Transformatoryň birinji sarymlaryndaky toklar degişlilikde:

$$\underline{I}_A = -\underline{I}'_{(a)} = \frac{2 \cdot \underline{I}'_a}{3} ; \quad \underline{I}_B = -\underline{I}'_{(b)} = \underline{I}'_b - \underline{I}'_{a0} = -\frac{\underline{I}'_a}{3} = \underline{I}_c.$$

„a“ fazadaky we Z ýükdäki naprýaženiýe:

$$-\underline{U}'_a = \underline{U}_A + \left(\underline{I}'_{a1} + \underline{I}'_{a2} \right) \cdot \underline{Z}_{g,u} + \underline{Z}_{yzg} \cdot \underline{I}_{a0} = -\underline{Z}' \cdot \underline{I}'_a.$$

Bu ýerde:

$$\underline{U}_A = \frac{\underline{U}_L}{\sqrt{3}} ; \quad -\underline{U}_a = \underline{U}_A + \left(\frac{2 \cdot \underline{I}'_a}{3} \right) \cdot \underline{Z}'_{g,u} + \underline{Z}'_{yzg} \cdot \left(\frac{\underline{I}'_a}{3} \right) = -\underline{Z}' \cdot \underline{I}'_a ;$$

$$3 \cdot \underline{U}_A + 2 \cdot \underline{I}'_a \cdot \underline{Z}_{g,u} + \underline{Z}_{yzg} \cdot \underline{I}'_a = -3 \cdot \underline{Z}' \cdot \underline{I}'_a ;$$

$$-3 \cdot \underline{U}_A = \left(2 \cdot \underline{Z}_{g,u} + \underline{Z}'_{yzg} + 3 \cdot \underline{Z}' \right) \cdot \underline{I}'_a.$$

Toklaryň arasyndaky gatnaşyklary hasaba alyp, ýüküň üstünden geçýän tok aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$\underline{I}'_a = \frac{-3 \cdot \underline{U}_A}{2 \cdot \underline{Z}'_{g,u} + \underline{Z}'_{yzg} + 3 \cdot \underline{Z}'} ; \quad \underline{I}'_a = \frac{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_L}{\left[2 \cdot \underline{Z}'_{g,u} + \underline{Z}'_{yzg} + 3 \cdot \underline{Z}' \right]}. \quad (1.92)$$

(1.92) deňlemede $Z = 0$ diýip transformatoryň bir fazasynyň gysga utgaşmasy wagtynda ýüze çykjak togy kesgitläp bileris:

$$\underline{I}_{a,g,u} = \frac{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_L}{\left[2 \cdot \underline{Z}'_{g,u} + \underline{Z}'_{yzg} \right]}.$$

b) Sarylary Δ/Y_0 birikdirilen (1.43-nji b surat) transformatoryň diňe bir fazasyna ýük birikdirilen wagtyndaky ýüze çykjak toguň hasaplanylşy. Hasaplamalarda transformatoryň naprýaženiýeleri we ýüküň Z garşylygy berlen diýip kabul edilýär:

$$\underline{U}_A = \underline{U}_{CA} ; \quad \underline{U}_B = \underline{U}_{AB} ; \quad \underline{U}_C = \underline{U}_{BC}.$$

Transformatoryň birinji sarylarynyň toklary deňşilikde:

$$\underline{I}_A = -\underline{I}'_a ; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_C = 0.$$

Ýüküň naprýaženiýesi: $-\underline{U}'_a = \underline{U}_A + \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_a = -\underline{Z}' \cdot \underline{I}'_a$.

Bu ýerden:

$$\underline{I}'_a = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_{g,u} + \underline{Z}} \quad \text{ýa-da} \quad \underline{I}'_a = \frac{\underline{U}_{1L}}{\left[\underline{Z}_{g,u} + \underline{Z}' \right]}. \quad (1.93)$$

(1.93) deňlemede $\underline{Z}' = 0$ diýip, transformatoryň fazasynyň gysga utgaşma togy üçin aňlatmany alarys: $\underline{I}_{a,g,u} = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_{g,u}}$.

ç) Sarymlary Y/Y birikdirilen transformatorlaryň iki fazasynyň arasyna ýük birikdirilende ýüze çykJak toklaryň hasaplanylşy (1.43-nji ç surat). Hasaplamalarda $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{BC} = \underline{U}_{CA}$ liniýa naprýaženiýeleri we ýüküň \underline{Z} garşylygy berlen diýip kabul edilýär.

Seredilýän ýagdaýda transformatoryň „a“ we „b“ fazalarynyň üstünden ýüküň $\underline{I}_b = -\underline{I}_a$ togy geçýär. „c“ fazanyň togy bolsa $\underline{I}_c = 0$. Ýüküň naprýaženiýesi \underline{U}_{ab} liniýa naprýaženiýesine deňdir:

$$\underline{U}'_{ab} = \underline{U}'_b - \underline{U}'_a = \underline{U}_A - \underline{U}_B + \underline{Z}_{g,u} \cdot (\underline{I}'_a - \underline{I}'_b) = \underline{Z} \cdot \underline{I}'_b;$$

$$(\underline{I}'_a - \underline{I}'_b) = -2 \cdot \underline{I}_b;$$

$$\underline{U}'_{ab} = \underline{U}'_b - \underline{U}'_a - \underline{Z}_{g,u} \cdot 2\underline{I}'_b = \underline{Z} \cdot \underline{I}'_b.$$

Onda ýüküň togy:

$$\underline{I}'_b = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_B}{2 \cdot \underline{Z}_{g,u} + \underline{Z}} = \frac{-\underline{U}_{AB}}{2 \cdot \underline{Z}_{g,u} + \underline{Z}}, \quad (1.94)$$

ýa-da:

$$\underline{I}'_{b,g,u} = \frac{\underline{U}_{1L}}{\left[2 \cdot \underline{Z}_{g,u} + \underline{Z}' \right]}.$$

Seredilýän ýagdaý üçin ($\underline{Z} = 0$) gysga utgaşmanyň toguny alarys:

$$\underline{I}'_{b,g,u} = \frac{\underline{U}_{1L}}{2 \cdot \underline{Z}_{g,u}}.$$

d) Sarymlary Δ/Y birikdirilen transformatoryň iki fazasynyň arasyna ýük birikdirilende ýüze çykjak toklaryň hasaplanylşy (*1.43-nji d surat*). Transformatoryň birinji sarymlarynyň «Üçburçluk» görnüşli birikdirilendigi sebäpli, $U_A = U_B = U_{1L}$ we $|\underline{U}_A - \underline{U}_B| = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{1L}$ hasaba alyp ýüküň toguny kesgitlep bileris:

$$\underline{I}'_b = \frac{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_{1L}}{2 \cdot \underline{Z}_{g,u} + \underline{Z}'}. \quad (1.95)$$

$Z' = 0$ diýip gysga utgaşmanyň togy üçin aňlatmany alarys:

$$\underline{I}'_b = \frac{\sqrt{3} \cdot \underline{U}_{1L}}{2 \cdot \underline{Z}_{g,u}}.$$

e) Y/Δ görnüşli birikdiriliş toparynda transformatoryň ikinji sarymynyň iki fazasynyň arasyna ýük birikdirilen ýagdaýda ýüze çykjak toguň hasaplanylşy (*1.43-nji e surat*). Bu ýagdaýda $\underline{I}_{aL} = -\underline{I}_{cL}$, $\underline{I}_{bL} = 0$ ikinji sarymyň faza toklary:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{I}_{aL} - \underline{I}_{cL}}{3} = \frac{2}{3} \cdot \underline{I}_{aL}; \quad \underline{I}_b = -\frac{1}{3} \cdot \underline{I}_{aL}; \quad \underline{I}_c = -\frac{1}{3} \cdot \underline{I}_{aL}.$$

Ýüke düşýän naprýaženiýe \underline{U}_{ca} liniýa naprýaženiýesine deňdir:

$$-\underline{U}'_a = -\underline{U}'_{ca} = \underline{U}_A + \underline{Z}_{g,u} \cdot \underline{I}'_a = -\underline{Z} \cdot \underline{I}_{aL}.$$

Ýüküň togy: $\underline{I}_{aL} = -\frac{\underline{U}_A}{\frac{2 \cdot \underline{Z}_{g,u}}{3} + \underline{Z}'}$ ýa-da:

$$\underline{I}_{aL} = \frac{\underline{U}_{1L}}{\sqrt{3} \cdot \left[\frac{2 \cdot \underline{Z}_{g,u}}{3} + \underline{Z}' \right]}. \quad (1.96)$$

$Z = 0$ diýip gysga utgaşmanyň togy üçin aňlatmany alyp bileris:

$$\underline{I}_{aL} = \frac{\underline{U}_{1L}}{\sqrt{3} \cdot \frac{2 \cdot \underline{Z}_{g,u}}{3}} = \frac{\underline{U}_A}{\frac{2 \cdot \underline{Z}_{g,u}}{\sqrt{3}}}. \quad (1.97)$$

1.13. Ýörite niýetlenen transformatorlar

1.13.1. Ölçeg transformatorlary

Ölçeg transformatorlary ýokary naprýaženiýeli üýtgeýän toguň zynjyrlarynda ulanylýan elektrik ölçeg abzallaryň ölçeg çäklerini giňeltmek we ölçeg geçirilýän wagtynda olary ýokary naprýaženiýeden izolirlmek üçin ulanylýar. Şeýle-de ölçeg transformatorlary rele gorgagy we awtomatiki dolandyrylyş üçin zerur bolan informasiýalary hem-de signallary almak üçin peýdalanylýar.

Ölçeg transformatorlary fazalarynyň sanyna görä, bir we üçfazly bolýarlar. Ýokary naprýaženiýeli zynjyrlarda ulanylýan ölçeg transformatorlarynyň ikinji sarymyna birikdirilen ölçeg abzallaryna gözegçilik edýän adamlaryň howpsuzlygyny üpjün etmek we transformatoryň sarymlarynyň izolýasiýalary zaýаланan wagtynda ölçeg abzallary bilen ýeriň arasynda potensiallar tapawudy emele gelmezligi üçin, transformatoryň korpussy we onuň ikinji sarymynyň bir gysgyjy ýere birikdirilýär. Ölçeg transformatorlaryna toguň we naprýaženiýäniň transformatorlary degişlidir.

Naprýaženiýe ölçeyän transformatorlar

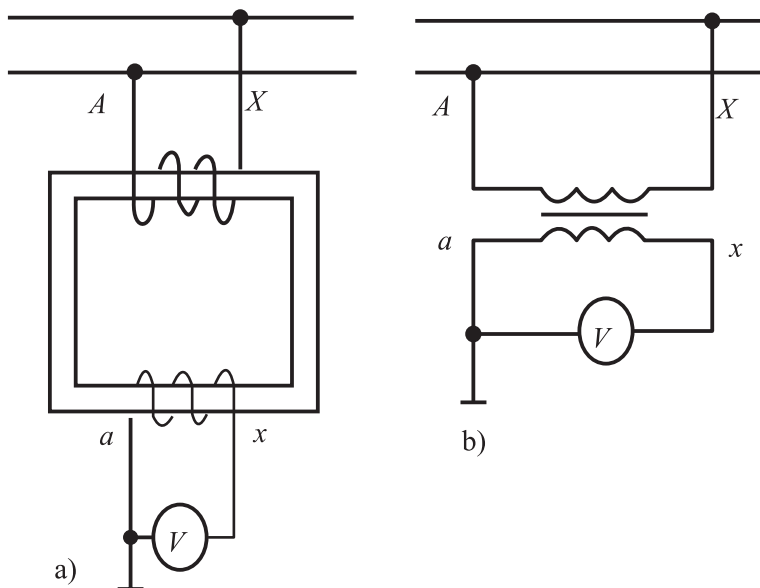
Naprýaženiýe ölçeyän transformatorlar woltmetrleriň, ýygylýk ölçeyjileriň we fazometrleriň, energiýany hasaplaýjylaryň parallel sarymlaryny ýokary naprýaženiýeli zynjyrlara birikdirmek we olaryň ölçeg çägin giňeltmek üçin peýdalanylýar. Onuň birikdiriliş shemasy we şertli belgilenilişi 1.44-nji suratda görkezilendir.

Naprýaženiýe ölçeyän transformator özüniň gurluşy boýunça pes kuwwatly güýç transformatorlaryna meňzeş bolany sebäpli, olaryň ýokary we pes naprýaženiýeli sarymlarynyň uçlary degişlilikde A , X we a , x harplar bilen belgilenilýär. Onuň w_1 sargyly birinji sarymy, naprýaženiýesi ölçenilýän ýokary woltly zynjyra parallel, w_2 sargyly ikinji sarymy, elektrik ölçeg abzalyna birikdirilýär.

Bu transformatorlar üçin $w_1 \gg w_2$. Naprýaženiýe ölçeyän transformatoryň $U_{1,n}$ nominal naprýaženiýesi ýüküň nominal naprýaženiýesine, onuň $U_{2,n}$ nominal naprýaženiýesi bolsa, adatça, 100 W-a

deňdir. Naprýaženiýe ölçeyän transformatoryň transformasiýa koeffi-
siýenti aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

$$K_{N.T} = \frac{U_{1.n}}{U_{2.n}} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.98)$$



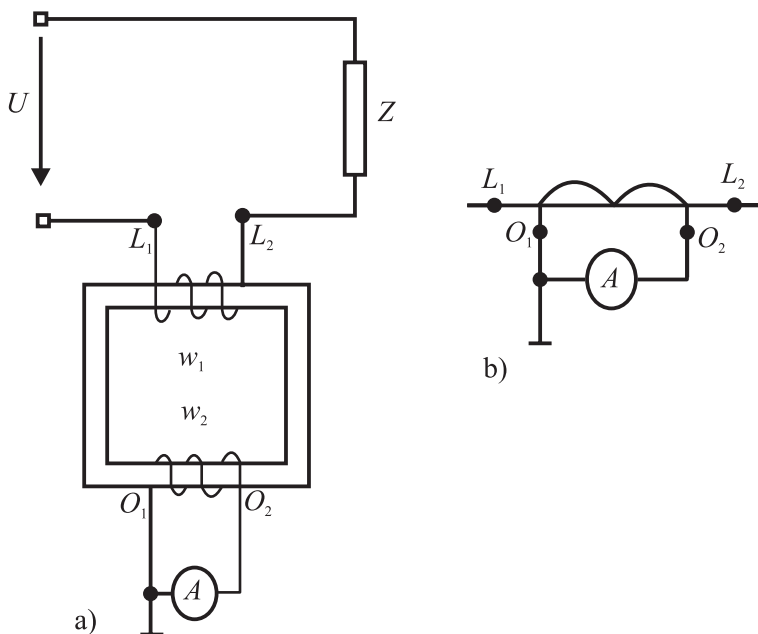
**1.44-nji surat. Naprýaženiýe ölçeyän transformatorlaryň birikdiriliş
shemasy (a) we onuň şertli belgilenilişi (b)**

Ýokary woltly zynjyryň naprýaženiýesiniň hakyky ululygyny kesgitlemek üçin, woltmetriň görkezýän ululygyny transformatoryň transformasiýa koeffisiýentine köpeltmek ýeterlikdir. Transformatorlaryň kömegi arkaly, ýokary woltly zynjyrlaryň naprýaženiýesi ölçenende transformatorlaryň sarymlaryndaky naprýaženiýeleriň peselmegi, onuň transformasiýa koeffisiýentiniň üýtgemegine getirýär. Bu bolsa zynjyryň naprýaženiýesiniň ölçenilip alynýan ululygyndan onuň hakyky ululygynyň tapawutlanmagyna getirýär. Şonuň üçin transformatoryň ikinji sarymyňa özara parallel birikdirilýän ölçeg abzallaryň sany mümkin boldugyça çäklendirilýär, ýagny transformator boş iş düzgünine ýakyn ýagdaýda işledilýär. Eger-de bu şert kanagatlandy-

rylmasa, onda woltmetriň kömegi arkaly ölçenilýän naprýaženiýäniň, energiýany ölçeýjileriň we fazometriň ölçenilýän ululyklarynyň takyklygy peselýär.

Tok ölçeýän transformatorlar

Tok transformatorlar ýokary we pes naprýaženiýely zynjyrlarda ampermetrleriň we beýleki ölçeg abzallaryň (yzygider sarymlarynyň) ölçeg çäklerini giňeltmek üçin peýdalanylýar. Tok transformatoryň birikdiriliş shemasy we onuň şertli belgilenilişi 1.45-nji suratda görkezilendir.



1.45-nji surat. Tok ölçeýän transformatoryň birikdiriliş shemasy (a) we onuň şertli belgilenilişi (b)

Tok transformatoryň togy ölçenilýän ýüke görä yzygider birikdirilýän sarymynyň uçlary L_1 we L_2 harplar, ölçeg abzalyna birikdirilýän sarymynyň uçlary bolsa O_1 we O_2 harplar bilen belgilenilýär. Ampermetriň we beýleki ölçeg abzallaryň togy ölçenilýän sarymlarynyň ählisiniň üstünden birdeň tok akyp geçär ýaly, olar özara yzygider birikdirilýär. Tok transformatoryň ikinji sarymynyň w_2 sargy sany

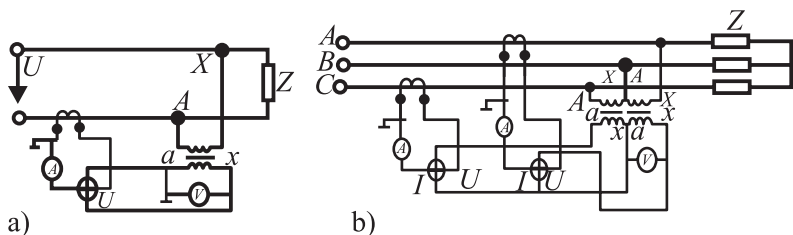
onuň birinji sarymynyň w_1 sargy sanyndan birnäçe esse uludyr. Tok transformatoryň transformasiýa koeffisiýenti, onuň birinji sarymynyň $I_{1.n}$ nominal togunyň ikinji sarymynyň $I_{2.n}$ nominal toguna bolan gatnaşygy ýa-da w_2 -niň w_1 -e bolan gatnaşygy bilen kesgitlenýär:

$$K_{T.T} = \frac{I_{1.n}}{I_{2.n}} = \frac{w_2}{w_1}. \quad (1.99)$$

Togy ölçeyän zynjyryň togunyň ululygyny kesgitlemek üçin transformatoryň ikinji sarymyna birikdirilen ampermetriň görkezýän ululygyny (adatça, transformatoryň ikinji sarymyna ölçeg çägi 1 A ýa-da 5 A bolan ampermetr birikdirilýär) transformatoryň transformasiýa koeffisiýentine köpeltmek ýeterlikdir. Ampermetriň we beýleki ölçeg abzallaryň sarymlarynyň jemleýji garşylyklarynyň örän azlygy sebäpli, (1 Om-dan az) tok transformatorlar gysga utgaşma iş düzgünine ýakyn ýagdaýda işleýärler. Şeýlelikde, transformator işleýän wagtynda, onuň ikinji sarymynyň üzülmegi, I_2 toguň nola deň bolmagyna, ol bolsa öz gezeginde birinji sarymyň $w_1 I_1$ magnitlendiriji güýjüni magnitsizlendirýän $w_2 I_2$ magnitlendiriji güýjüniň ýok bolmagyna getirýär. Emma $w_1 I_1$ magnitlendiriji güýjüň ululygy boýunça üýtgemän galýanlygy sebäpli, transformatoryň magnitgeçiriji serdeçniginden geçýän Φ baş magnit akymynyň ululygyny birnäçe esse ýokarlandyrýar. Bu bolsa serdeçnigiň aşa gyzmagyna getirýär.

Şeýle-de Φ magnit akymynyň ululygynyň ýokarlanmagy, transformatoryň ikinji sarymynde örän uly elektrik hereketlendiriji güýjüň döremegine sebäp bolýar we onuň sargylarynyň izolýasiýalarynyň zaýalanmagyna hem-de transformatora gözegçilik edýän adamlar üçin howpuň döremegine getirýär. Şol sebäpli işläp duran tok transformatoryň ikinji sarymyny üzmek gadagandyr. Eger-de oňa birikdirilen ölçeg abzallar aýryljak ýa-da çalşyryljak ýagdaýynda, ilki bilen, ikinji sarym özara gysga birleşdirilýär we soňra ol işler ýerine ýetirilýär.

Birfazaly (a) we üçfazaly (b) toguň zynjyrlaryna tok hem-de napryaženiye ölçeyän transformatorlaryň we olara elektrik ölçeg abzallaryň birikdiriliş shemalary 1.46-njy suratda görkezilendir.



1.46-njy surat. Birfazaly (a) we üçfazaly (b) toguň zynjyrlaryna tok hem-de naprýaženiýe ölçeyän transformatorlaryň we olara elektrik ölçeg abzallaryň birikdiriliş shemalary

1.13.2. Üýtgeýän toguň fazalarynyň sanyny özgertmek üçin niýetlenen transformatorlar

Üçfazaly toklar ulgamyny ikifazaly toklar ulgamyna öwürmek üçin dürli transformasiýa koeffisiýenti bolan iki sany birfazaly transformatorlaryň birikdiriliş shemasy (a) we naprýaženiýeleriň diagrammasy (b) 1.47-nji suratda görkezilendir.

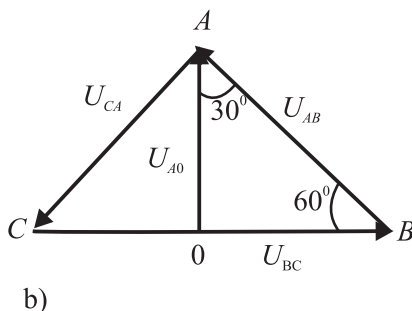
Birfazaly T_1 transformatoryň birinji sarymy üçfazaly ulgamyň B we C fazalarynyň arasyna birikdirilýär. T_2 transformatoryň birinji sarymynyň bir uýy A faza, beýleki uýy bolsa T_1 transformatoryň birinji sarymynyň aralyk nokadyna birikdirilýär. Şeýle ýagdaýda U_{0A} naprýaženiýe öz fazasy boýunça U_{BC} naprýaženiýeden $\pi/2$ burça tapawutlanýar (1.47-nji b surat).

Edil şeýle burç boýunça T_1 we T_2 transformatorlaryň ikinji sarymlarynyň U_{21} we U_{22} naprýaženiýeler hem tapawutlanýarlar, (1.47-nji b surat). Naprýaženiýeleriň diagrammasyndan görnüşi ýaly, U_{0A} naprýaženiýe öz ululygy boýunça U_{BC} naprýaženiýeden

$$\sqrt{3}/2 \text{ esse tapawutlanýar: } U_{0A} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_{BC}.$$

T_1 we T_2 transformatorlaryň ikinji sarymlarynda deň ululykly U_{21} we U_{22} naprýaženiýeleri almak üçin T_1 transformatoryň birinji sary-

The diagram shows a transformer with primary turns T_1 and secondary turns T_2 . The primary winding is connected to a three-phase supply with lines A, B, and C, and a neutral point 0. A series impedance Z_1 is connected in series with the primary winding. The secondary winding is connected to a shunt load impedance Z_2 . The voltage across the secondary winding is U_{21} and the voltage across the load Z_2 is U_{22} . The diagram is labeled 'a)'.



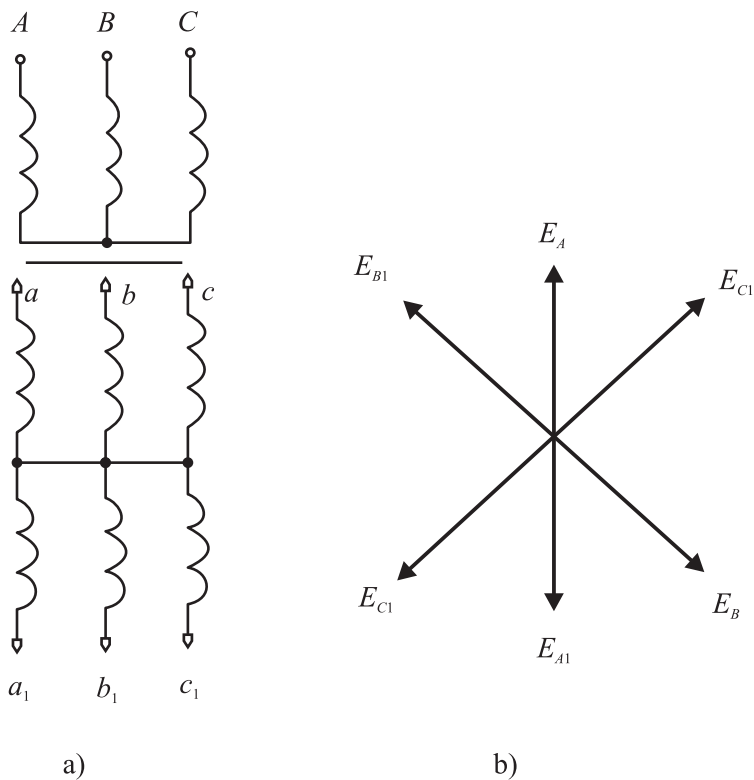
1.47-nji surat. Üçfazly toklar ulgamyny ikifazly toklar ulgamyna özgertmek üçin shema (a) we naprýaženiýeleriň diagrammasy (b)

1.13.3. Üçfazlı toklar ulgamyny altyfazly toklar ulgamyna öwürmek üçin niýetlenen transformatorlar

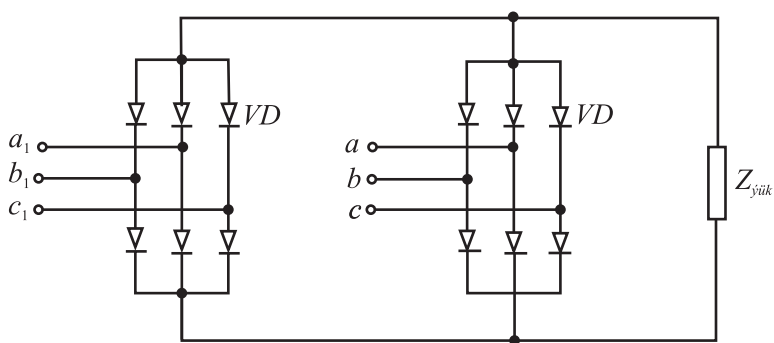
Üçfazly toklar ulgamyny altyfazly toklar ulgamyna öwürmek üçin üçfazly transformatoryň ikinji sarymlarynyň aralyk nokatlary özara gysga birikdirilýär. Bu ýagdaýda sarymlar “Ýyldyz” görnüşli birikdirilen altyfazly toklar ulgamyny emele getirýär (*1.48-nji a surat*).

1.48-nji b suratda transformatoryň ikinji sarymlarynda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjüň diagrammalary görkezilendir.

Altyfazaly toklar ulgamy üçfazaly togy hemişelik toga öwürýän göneldijilerde toguň pulsasiýasyny peseltmek üçin ulanylýar. Şeýle göneldijiniň elektrik shemasy 1.49-njy suratda görkezilendir.



1.48-nji surat. Altyfazaly toklar ulgamyny almak üçin niýetlenen transformatoryň shemasy (a) we onuň elektrik hereketlendiriji güýjüniň diagrammasy (b)

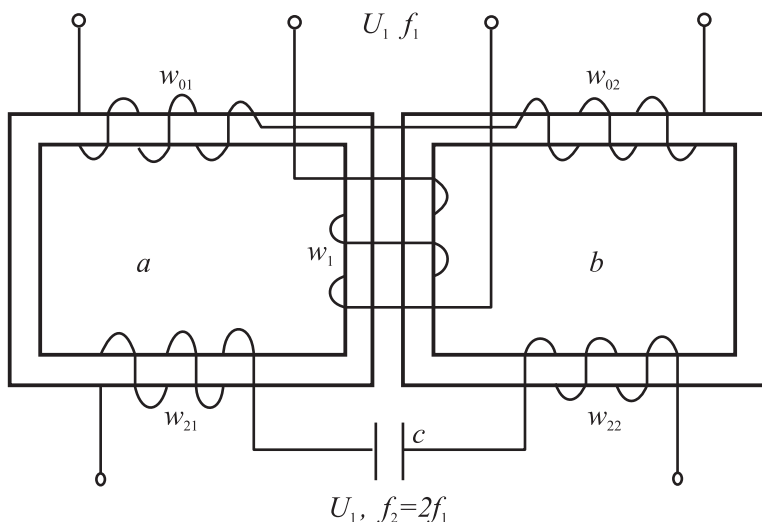


1.49-njy surat. Altyfazaly göneldijiniň elektrik shemasy

1.13.4. Üýtgeýän toguň ýygylgyny özgertmek üçin niýetlenen transformatorlar

Üýtgeýän toguň ýygylgyny iki esse ýokarlandyrmak üçin niýetlenen transformator

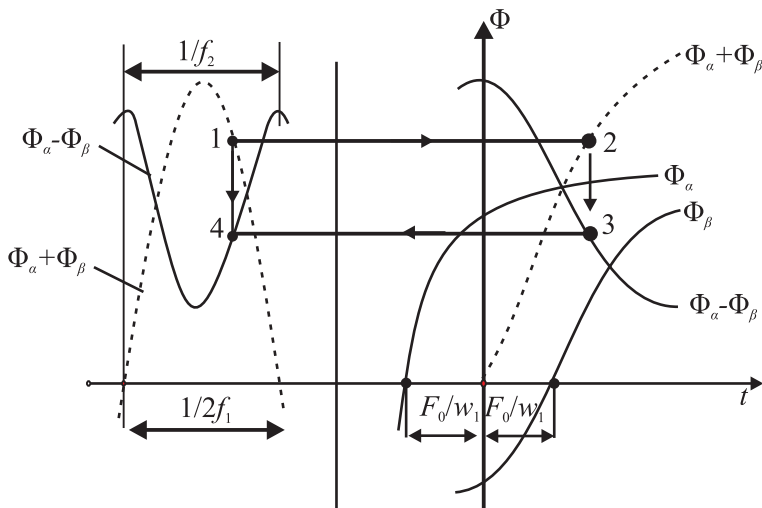
Üýtgeýän toguň ýygylgyny iki esse ýokarlandyrmak üçin ulanylýan transformatoryň magnitgeçirijisi iki sany birmeňzeş a we b magnitgeçirijiden ybaratdyr (1.50-nji surat).



1.50-nji surat. Üýtgeýän toguň ýygylgyny iki esse ýokarlandyryýan transformatoryň elektrik shemasy

Transformatoryň w_1 sarymly sargysy a we b magnitgeçirijileriň ikisiniň daşyna bilelikde saralýar we f_1 ýygylkly U_1 naprýaženiýeli sete birikdirilýär. Transformatoryň magnitgeçiriji serdeçnigini hemişelik tok arkaly magnitlendirmek üçin a we b magnitgeçirijileriň her birinde aýratyn w_{01} we w_{02} sarymlar ýerleşdirilýär hem-de olar özara yzygider birikdirilýärler. w_{01} we w_{02} sarymlar öz sargy sanlary hem-de döredýän magnit akymalary boýunça deňdirler. Netijede, hemişelik tok tarapyndan döredilýän Φ_0 magnit akymy bilen üýtgeýän toguň döredýän Φ_1 magnit akymyna täsir etmäge mümkinçilik döreýär. Transformatoryň magnitgeçirijisi magnit akymlar goşulan

ýagdaýynda magnit taýdan doýgun ýagdaýda bolar ýaly, bu akymalaryň ugurlary garşylykly tarapa ugrukdyrylanda bolsa magnit taýdan doýgun däl ýagdaýda bolar ýaly edilip saýlanylýar. Magnit akymalarynyň we ikinji sarymda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýçleriň wagta görä üýtgeýiş grafigi 1.51-nji suratda görkezilendir.

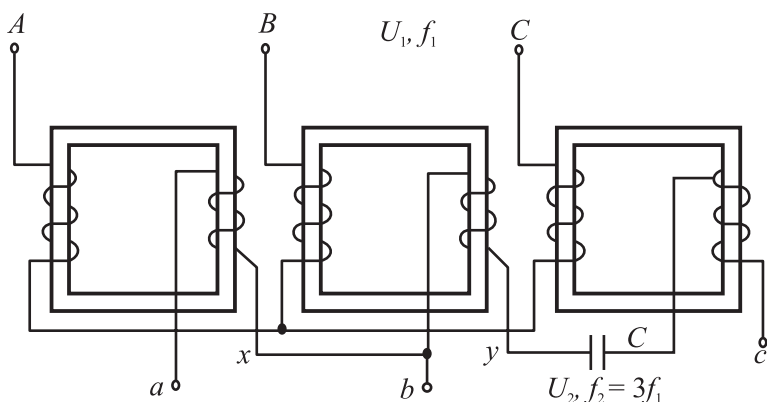


1.51-nji surat. Ýygylgyny iki esse ýokarlandyrýan transformatoryň magnit akymynyň we elektrik hereketlendiriji güýjüniň wagta görä üýtgeýiş grafigi

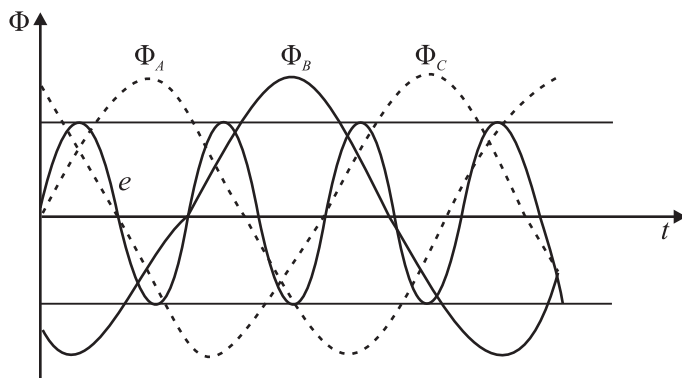
Jemleýji magnit akym transformatoryň ikinji sarymynda $f_2 = 2 \cdot f_1$ ýygylkly elektrik hereketlendiriji güýji indusirleýär. Transformatoryň ikinji sarymlarynda naprýaženiýäniň peselmegini azaltmak maksady bilen w_{21} we w_{22} sarymlaryň arasyna C sygymly kondensator birikdirilýär. Kondensatoryň sygymy zynjyrdaky $X_L = X_C$ deň bolar ýaly edilip saýlanylýar. 1.51-nji suratdaky grafikten görnüşi ýaly, ikinji sarymlarda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýji Φ_α we Φ_β magnit akymalaryň tapawudy bilen döredilýär.

Üýtgeýän toguň ýygylgyny üç esse ýokarlandyrýan transformatorlar

Üýtgeýän toguň ýygylgyny üç esse ýokarlandyrmak üçin egrişykly magnit häsiýetnamasy bolan üç sany birmeňzeş birlazaly transformator ulanylýar (1.52-nji surat).



1.52-nji surat. Üýtgeýän toguň ýygylgyny üç esse ýokarlandyryýan transformatoryň elektrik shemasy



1.53-nji surat. Ýygylgy üç esse ýokarlandyryýan transformatoryň magnit akymynyň we elektrik hereketlendiriji güýjüniň wagta görä üýtgeýiş grafigi

Birfazaly transformatorlaryň birinji sarymlary “Ýyldyz” görnüşli birikdirilýär we f_1 ýygylgylky hem-de U_1 naprýaženiýeli üçfazaly toguň setine birikdirilýär. Transformatorlaryň ikinji sarymlary özara yzygider birikdirilýär. Ikinji zynjyrdan naprýaženiýäniň peselmesini azaltmak maksady bilen bu sarymlara yzygider C sygymly kondensator birikdirilýär. Birinji sarymyň togunyň ösmegi bilen onuň döredýän magnit akymy transformatoryň magnitgeçirijisi magnit taýdan doýgun hala barýança ösýär we transformatoryň sarymlarynda elektrik hereketlendiriji güýji indusirlenýär. Magnit akymynyň wagta görä

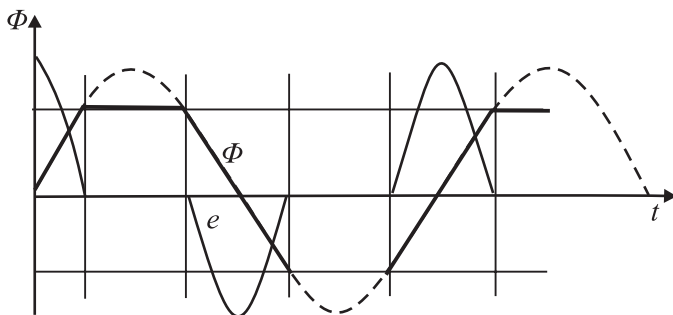
üýtgemek tizligi nola deň bolan ýagdaýynda (magnitgeçiriji doýgun ýagdaýynda) transformatoryň sarymlarynda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýçler hem nola deňdir. Sebäbi $e = -w \cdot d\Phi/dt = 0$.

Transformatoryň ikinji sarymlarynda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjüň wagta görä üýtgeýişiniň grafigi 1.53-nji suratda görkezilendir.

1.53-nji suratdan görnüşi ýaly, f_1 ýygylýkly üýtgeýän toguň bir periodynyň dowamynda ikinji sarymda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýji wagta görä $f_2 = 3 \cdot f_1$ ýygylýk bilen üýtgeýär.

Pik transformatorlary (impuls transformatorlary)

Elektron tehnikada tranzistorlary, tiristorlary, simistorlary dolandyrmak üçin giňden ulanylýan pik transformatorlary birinji sarymyna berilýän sinusoidal naprýaženiýäni ikinji sarymynda impuls görnüşli signallara öwürmek üçin niýetlenendir. Ikinji sarymynda pik şekilli impuls almak üçin egri çyzykly magnit häsiýetnamasy bolan transformatorlar peýdalanylýar. Ýagny transformatoryň birinji sarymyndan geçýän tok wagta görä sinusoidal üýtgände transformatoryň magnitgeçiriji serdeçniginde döredýän magnit akymynyň wagta görä üýtgeýişiniň grafigi 1.54-nji suratda görkezilendir.

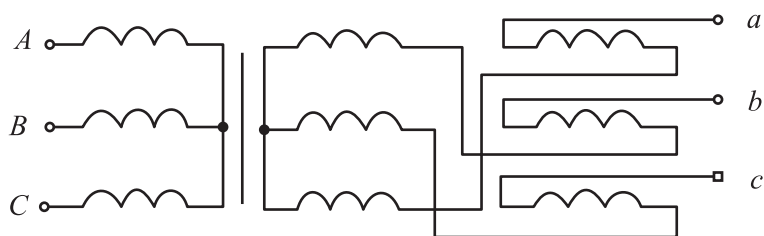


1.54-nji surat. Pik transformatoryň magnit akymynyň we elektrik hereketlendiriji güýjüň wagta görä üýtgeýiş grafigi

Serdeçnikde magnit akymynyň wagta görä şeýle görnüşde üýtgemegi ikinji sarymda impuls görnüşli naprýaženiýäniň ýüze çykmagyna getirýär.

Göneldijiler üçin niýetlenen transformatorlar

Üýtgeýän togy hemişelik toga öwürmek, şeýle-de hemişelik togy üýtgeýän toga öwürmek üçin niýetlenen gurluşlar, adatyça, transformatorlaryň ikinji sarymlaryna yzygider birikdirilýär. Göneldijileriň üstünden geçýän toklaryň wagta görä belli bir aralyklarda geçmeýänligi sebäpli, zynjyrdak sinusoidal toklar ýüze çykýar. Bu bolsa transformatoryň sarymlaryndaky toklaryň düzüminde ýokary ýygylýkly (garmonikaly) toklaryň, şeýle-de transformatoryň ikinji sarymynda hemişelik toguň ýüze çykmagyna getirýär. Toguň hemişelik düzüjisi transformatoryň serdeçniginiň magnitlenmegine, ýokary garmoniki düzüjiler bolsa transformatorda goşmaça energiýanyň ýitgileriniň ýüze çykmagyna getirýär.



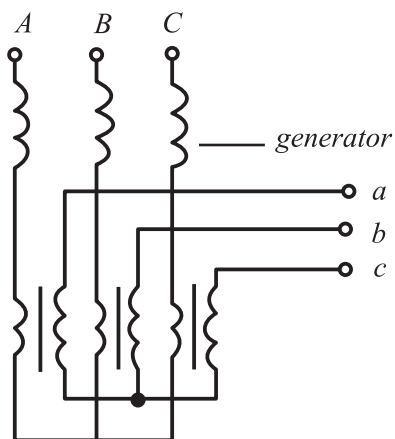
1.55-nji surat. Göneldiji transformatoryň elektrik shemasy

Üçfazly göneldiji transformatorlarda ýüze çykýan toguň hemişelik düzüjisiniň täsirini onuň ikinji sarymyny «Zigzag» görnüşli birikdirmek arkaly peseldilýär (1.55-nji surat).

Göneldiji transformatoryň kadaly işlemegi üçin onuň ölçegleri adaty deň kuwwatly güýç transformatorlaryna görä uly edilip alynýar.

Yzygider transformatorlar

Yzygider transformatorlar energoulgamda gysga utgaşma ýüze çykan wagtynda ulgamyň naprýaženiýesiniň nominaldan aşak

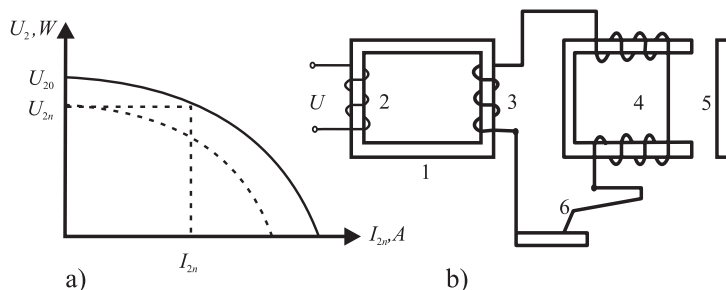


1.56-nji surat. Yzygider transformatoryň elektrik shemasy

düşmeginiň öňüni almak üçin turbogeneratore berilýän oýandyryjy togy ýokarlandyrmak üçin niýetlenendir. Yzygider transformatoryň parametrleri generatoryň oýandyryjy ulgamynyň toguny iki esse ýokarlandyrmak üçin saýlanyp alynýar. Bu transformatorlar howa bilen sowadylýan (gury) görnüşde taýýarlanylýar. Yzygider transformatoryň iki sany ikinji sarymy bolup, olar göneldijileri iýmitlendirmek üçin peýdalanylýar. Yzygider transformatorlar sinhron generatoryň stator sarymyna, onuň neýtral nokady tarapynda yzygider birikdirilýär (1.56-njy surat).

Kebşirleýji transformatorlar

Kebşirleýji transformatorlar metallary ýokary hilli kebşirmek üçin niýetlenendir. Metal bilen elektrodyň arasyndaky duganyň endigan ýanmagyny üpjün etmek üçin duganyň üstünden geçýän toguň ululygyny üýtgetmän (hemişelik) saklamak zerurdyr. Şonuň üçin transformator boş işleýän wagtynda onuň ikinji sarymynyň naprýaženiýesi $60 \div 70 \text{ W}$ töweregi, transformator ýükli işleýän wagty bolsa 30 W bolar ýaly edilýär. Kebşirleýji transformatoryň daşky häsiýetnamasy (a) we onuň elektrik shemasy (b) 1.57-nji suratlarda görkezilendir.



1.57-nji surat. Kebşirleýji transformatoryň daşky häsiýetnamasy (a) we elektrik shemasy (b)

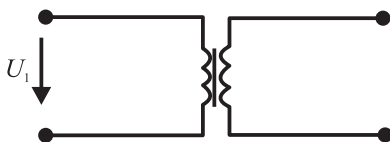
Kebşirleýji transformatoryň ýaýraýan magnit akymyny ýokarlandyrmak maksady bilen, onuň birinji (2) we ikinji (3) sarymlary magnitgeçirijiniň (1) sterženlerinde aýratynlykda ýerleşdirilýär. Elektrod (6) bilen, kebşirlenýän (7) metalyň üstinden geçýän toguň ululygyny, drossel (4) bilen ýakoryň (5) arasyny ýakynlaşdyrmak we daşlaşdyrmak arkaly üýtgedilýär.

1.14. Transformatorlarda geçiş prosesleri

Transformatorlar duýdansyz kadalaşan bir iş düzgüninden, beýleki iş düzgünine geçen ýagdaýynda olarda geçiş prosesleri ýüze çykýar. Adatça, transformatorlarda geçiş prosesleriň örän az wagt dowam edýänligine seretmezden, olaryň sarymlarynda uly toklar we elektromagnit güýçleri ýüze çykýar. Şol sebäpden transformatorlar taslananda we ekspluatasiýa edilende bu prosesleri hasaba almak zerurlygy ýüze çykýar. Transformatorlarda ýüze çykýan geçiş proseslere degişli birnäçe ýagdaýlara seredeliň.

Ikinji sarymyna ýük birikdirilmedik transformator elektrik setine birikdirilen pursatynda ýüze çykýan geçiş prosesi

Ikinji sarymyna ýük birikdirilmedik transformatoryň kadalaşan iş düzgüninde birinji sarymdaky I_0 tok onuň nominal togunyň birnäçe görterimini düzýär. Emma kähalatlarda ikinji sarymy açyk transformator nominal naprýaženiýeli elektrik sete birikdirilen pursatynda, geçiş prosesiniň netijesinde ýüze çykýan toklar nominal tokdan birnäçe esse uly bolýar. Transformatorlar sete birikdirilen pursatynda uly toklaryň ýüze çykmagynyň sebäplerine düşünmek üçin ikinji sarymy açyk birfazaly transformatoryň mysalynda seredeliň (1.58-nji surat).



1.58-nji surat. Ikinji sarymyna ýük birikdirilmedik birfazaly transformatoryň shemasy

Bu ýagdaý üçin naprýaženiýeleriň differensial deňlemesi aşakdaky görnüşde ýazylýar:

$$u_1 = R_1 i_0 + W_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.100)$$

Transformatorlaryň Φ magnit akymynyň i_0 toga proporsional dälidi sebäpli, (1.100) deňleme egriçyzykly differensial deňlemedir. Emma deňlemäniň çözülişini ýönekeýleşdirmek üçin Φ magnit akymy bilen i_0 toguň arasynda göni baglanyşyk bar diýip kabul edilýär we aşakdaky deňlik ýazylýar:

$$L_{11} \cdot i_0 = W_1 \Phi. \quad (1.101)$$

Bu deňlikde L_{11} – transformatoryň birinji sarymynyň induktiwligi.

(1.101) deňlikden $i_0 = \frac{W_1 \Phi}{L_{11}}$ togy kesgitläp we ony (1.100) deňlemä goýup alarys:

$$u_1 = R_1 \frac{W_1 \Phi}{L_{11}} + W_1 \frac{d\Phi}{dt} = U_{1.\max} \sin(\omega t + \alpha_0).$$

Deňligiň iki tarapyny W_1 -e bölüp, aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\frac{R_1}{L_{11}} \Phi + \frac{d\Phi}{dt} = \frac{U_{1.\max}}{W_1} \sin(\omega t + \alpha_0). \quad (1.102)$$

(1.102) deňlikde α_0 -transformator işe goýberilen pursatynda ($i_0 = 0$) naprýaženiýäniň pursat ululygyny kesgitleýän faza burçy.

Gönüçyzykly differensial deňlemäniň çözülişi aşakdaky görnüşde berilýär:

$$\Phi = \Phi_y + \Phi_c. \quad (1.103)$$

Bu ýerde:

Φ_y – transformatoryň kadalaşan iş düzgünine degişli magnit akymyň periodiki düzüjisi;

Φ_c – transformatoryň geçiş döwrüne degişli magnit akymyň aperioidiki düzüjisi;

Φ_y – magnit akymyň öz fazasy boýunça naprýaženiýeden takmynan $\pi/2$ burç yza galýandygy sebäpli onuň kadalaşan düzüjisi.

$$\Phi_y = \Phi_{\max} \cdot \sin(\omega t + \alpha_0 - \frac{\pi}{2}) = -\Phi_{\max} \cdot \cos(\omega t + \alpha_0). \quad (1.104)$$

Magnit akymyň erkin düzüjisi:

$$\Phi_c = C \cdot e^{-\frac{t}{T_0}}. \quad (1.105)$$

Bu aňlatmada:

$T_0 = \frac{L_{11}}{R_1}$ – magnit akymynyň erkin düzüjisiniň sönmeginiň wagt hemişeligi;

C – başlangyç şertler bilen kesgitlenýän integral hemişeligi.

Transformator sete birikdirilen pursarynda ($t = 0$) magnit akymynyň ululygy nola ýa-da transformatoryň magnit ulgamynda saklanyp galan Φ_{gal} galyndy magnit akyma deňdir.

Φ_{gal} galyndy magnit akymyň alamaty geçiş prosesinden öňki magnitleşmäniň ugruna baglydyr. $t = 0$ ýagdaý üçin (1.103) we (1.104) deňlemeleri aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\Phi_y + \Phi_c = -\Phi_{\max} \cos \alpha_0 + C = \pm \Phi_{gal}.$$

Bu ýerden: $C = \Phi_{\max} \cdot \cos 20 \pm \Phi_{gal}$ onda (6) deňlemäni aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\Phi_c = (\Phi_{\max} \cos \alpha_0 \pm \Phi_{gal}) \cdot e^{-\frac{t}{T_0}}. \quad (1.106)$$

(1.103) deňlige Φ_y we Φ_c -niň ululyklaryny goýup, geçiş prosesine deňişli magnit akymy üçin aňlatmany alýarys:

$$\Phi = -\Phi_{\max} \cos(\omega t + \alpha_0) + (\Phi_{\max} \cos \alpha \pm \Phi_{gal}) \cdot e^{-\frac{t}{T_0}}. \quad (1.107)$$

(1.107) aňlatmadan görnüşi ýaly, transformatoryň sete birikdirilen pursatynda (a_0) burça bagly geçiş prosesi döwründäki magnit akymynyň ululygy onuň kadalaşan ýagdaýyndakydan tapawutlanýar:

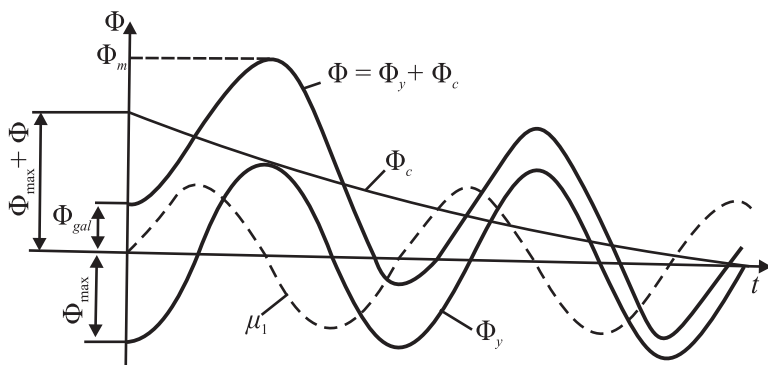
a) Eger-de transformator sete U_1 naprýazeniýäniň maksimal ululygynda ($\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$) we galyndy magnit akymyň $\Phi_{gal} = 0$ nola deň ýagdaýynda birikdirilen bolsa, magnit akymynyň ululygy $\Phi = -\Phi_{\max} \cdot \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \Phi_{\max} \sin \omega t$ kadalaşan magnit akymyna deň bolýar.

Bu ýagdaýda geçiş prosesi döwründe hiç hili goşmaça magnit akymy döremeýär.

b) Eger-de transformator sete $a_0 = 0$, $u_1 = 0$ we Φ_{gal} magnit akymynyň alamaty Φ_y kadalaşan akymyň alamaty ters bolan ýagdaýda birikdirilende ýüze çykýan magnit akymyň ululygy

$$\Phi = -\Phi_{\max} \cdot \cos \omega t + (\Phi_{\max} + \Phi_{gal}) \cdot e^{-\frac{t}{T_0}}. \quad (1.108)$$

Magnit akymalaryň (1.108) deňlemä degişli wagta görä üýtgeýişleriniň grafikleri 1.59-njy suratda görkezilendir.

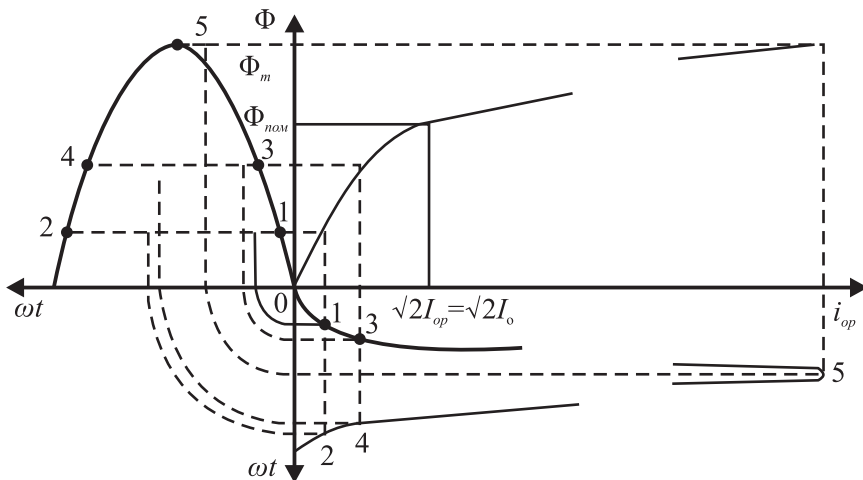


1.59-njy surat. Φ_{gal} ; Φ_y ; Φ_c we $(\Phi_{gal} + \Phi_c + \Phi_y) = \Phi_j$ magnit akymalaryň wagta görä üýtgeýiş grafigi

1.59-njy suratdan görnüşi ýaly, seredilýän ýagdaýda Φ magnit akymynyň özüniň iň uly ýagdaýyny transformator sete birikdirilen pursatyndan takmynan ýarym period soňra alýar ($\omega t \approx \pi$). Kähalatlar-da transformatorlarda Φ_{gal} – magnit akymynyň ululygy $\Phi_{gal} \approx 0,5\Phi_{\max}$ bolup bilýär. Eger-de $\Phi_{gal} \approx 0,5\Phi_{\max}$, magnit akymyň erkin düzüjisi-niň sönmek koeffisiýenti bire ($e^{-\frac{t}{T_0}} = e^{-\frac{\pi}{\omega_0 T}} \approx 1$) deň diýip kabul etsek, onda magnit akymynyň ululygy $\Phi_{gal} \approx 2,5\Phi_{\max}$ bolar. Netijede, geçiş prosesi döwründe transformatoryň magnit akymynyň ululygy onuň kadalaşan iş düzgünindäki magnit akymynyň amplituda ululygyndan takmynan 2,5 essä çenli uly bolmagyna getirýär.

Geçiş prosesi döwründe transformatory magnit akymynyň ulal-magy onuň magnitlendiriji togunyň hem ýokarlanmagyna getirýär. 1.60-njy suratdan görnüşi ýaly, magnitlendiriji toguň ululygy trans-formatoryň kadalaşan boş iş düzgünine degişli i_0 togundan takmynan 100–200 esse uly bolýar ýa-da ol transformatoryň birinji sarymynyň nominal togundan 2–5 esse uly bolýar.

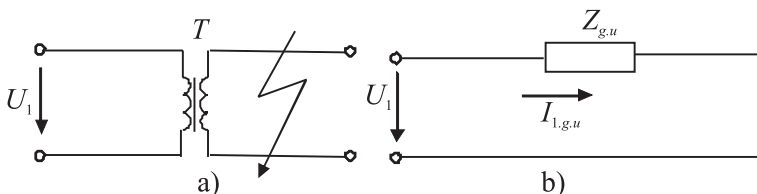
Transformatorlarda geçiş prosesiniň örän çalt geçýänligi sebäpli, olar ikinji sarymlary açyk ýagdaýda işe goýberilende hiç hili howply ýagdaý döretmeýär. Emma transformatoryň boş iş togunyň onuň nominal togundan has uly bolmagy iýmitlendiriji setde gysga wagtlaýyn naprýaženiýäniň peselmegine, transformatoryň gorag enjamlary sazlanýlanda olaryň selektiw işlemegini üpjün etmek zerurlygy döreýär.



1.60-njy surat.
Transformator sete birikdirilen pursatynda
magnitlendiriji i_0 toguň wagta görä üýtgeýşiniň grafigi

Ikinji sarymy duýdansyz gysga utgaşan transformatorlarda ýüze çykan geçiş prosesi

Dürli näsazlyklar netijesinde ikinji sarymlarynda gysga utgaşmanyň ýüze çykmagy transformatorlarda howply iş düzgüniň emele gelmegine getirýär. Şeýle iş düzgünde transformatoryň sarymlarynda ýüze çykýan toklar öz nominal toklaryndan onlarça esse uly bolýar we olar transformatoryň hatardan çykmagyna örän uly howp salýar. Ikinji sarymy duýdansyz gysga utgaşan ýagdaýynda transformatorlarda ýüze çykýan toklaryň kesgitlenişine birfazaly transformatoryň mysalynda seredeliň (1.61-nji surat).



**1.61-nji surat. Transformatoryň gysga utgaşma shemasy
(a) we onuň çalşyrma shemasy**

Transformatoryň i_0 – magnitlendiriji togunyň ululygynyň onuň nominal togundan otnositel kiçiligi sebäpli ony hasaba almazdan we transformatoryň çalşyrma shemasyndan peýdalanyňp, geçiş prosesi üçin deňlemäni aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$R_{g,u} \cdot i_{1,g,u} + L \frac{di_{g,u}}{dt} = U_1 = \sqrt{2} U_{1n} \sin(\omega t + \alpha_{g,u}). \quad (1.109)$$

Bu deňlemede:

$$R_{g,u} = R_1 + R_2^1; \quad L_{g,u} = \frac{(X_1 + X_2)}{\omega},$$

$\alpha_{g,u}$ – gysga utgaşmada naprýaženiýäniň pursat ululygyny kesgitleýän faza burçy.

(1.109) deňleme göni çyzykly bolany sebäpli onuň çözüdi:

$$i_{1,g,u} = i_{1,g,u,y} + i_{1,g,u,c}.$$

Bu ýerde $i_{1,g,u}$ – gysga utgaşmanyň kadalaşan iş düzgünine degişli toguň periodiki düzüjisi:

$$i_{1,g,u,y} = I_{1,g,u(\max)} \sin(\omega t + \alpha_{g,u} - \varphi_{g,u}).$$

Bu aňlatmada:

$$I_{1,g,u} = \frac{\sqrt{2} U_{1nom}}{\sqrt{R_{g,u}^2 + X_{g,u}^2}} = \frac{\sqrt{2} U_{1nom}}{Z_{g,u}}.$$

$\varphi_{g,u}$ – gysga utgaşma $i_{1,g,u}$ toguň U_{1nom} naprýaženiýeden fazasy boýunça yza galýan burçy.

Gysga utgaşma toguň periodiki düzüjisi:

$$i_{1.g.u.c} = C_{g.u} \cdot e^{-\frac{t}{T_{g.u}}}.$$

Bu aňlatmada: $T_{g.u} = \frac{L_{g.u}}{R_{g.u}}$ – gysga utgaşmanyň wagt hemişeligi.

$C_{g.u}$ – geçiş prosesiniň başlangyç şertler bilen ($t=0$; $i_{1.g.u(0)}=0$) kesgitlenýän integral hemişelik.

$$i_{1.g.u(0)} = I_{1g.u(max)} \sin(\alpha_{g.u} - \varphi_{g.u}) + C_{g.u} = 0.$$

Bu ýerden:

$$C_{g.u} = -I_{1g.u(max)} \sin(\alpha_{g.u} - \varphi_{g.u}).$$

Gysga utgaşma wagtyndaky doly tok:

$$i_{1.g.u} = I_{1g.u(max)} \left[\begin{array}{l} \sin(\omega t + \alpha_{g.u} - \varphi_{g.u}) - \\ -\sin(\alpha_{g.u} - \varphi_{g.u}) \cdot e^{-\frac{t}{T_{g.u}}} \end{array} \right]. \quad (1.110)$$

(1.110) deňlemenden görnüşini ýaly, geçiş prosesindäki toguň ululygy gysga utgaşma pursatyndaky u_1 naprýaženiýäniň $\alpha_{g.u}$ faza burçuna baglydyr.

Eger-de gysga utgaşma pursatynda $\alpha_{g.u} = \varphi_{g.u}$ bolsa, onda transformatorada kadalaşan iş düzgüni ýüze çykýar. Ýagny $\sin(\alpha_{g.u} - \varphi_{g.u}) = 0$ bolany sebäpli toguň $i_{1.g.u.c}$ düzüjisi ýüze çykmaýar.

$i_{1.g.u}$ gysga utgaşma togy özüniň iň ýokary ululygyny $\alpha_{g.u} = \frac{\pi}{2} + \varphi_{g.u}$ deň bolan ýagdaýda, gysga utgaşma başlanan pursatyndan takmynan ýarym period $\omega t = \pi$ soň alýar (1.62-nji surat).

Bu ýagdaýa degişli tok aşakdaky görnüşde ýazylýar:

$$i_{1g.u(max)} = I_{1g.u(max)} \left(1 + e^{-\frac{\pi}{\omega T_{g.u}}} \right). \quad (1.111)$$

$i_{1g.u(max)}$ – toga urgy togy diýilýär.

(1.111) aňlatmanyň ýaýyň içindäki bölegine urgy toguň koeffisiýenti diýilýär. Bu koeffisiýent urgy toguň kadalaşan gysga utgaşma

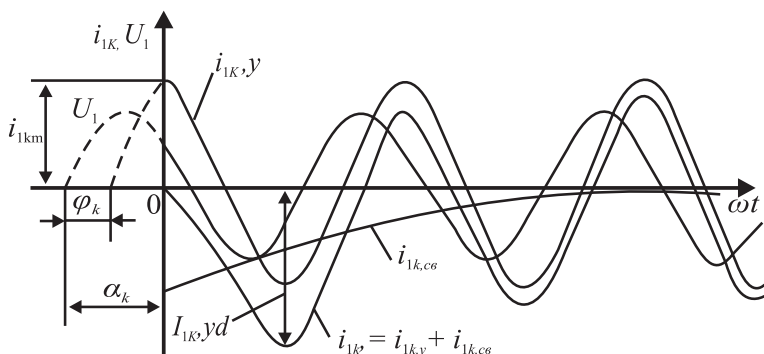
toguň amplitudasyndan näçe esse uludygyny görkezýär. $T_{g,u}$ ululygyna bagly bu koeffisiýentiň ululygy 1-den 2-ä çenli aralykda üýtgeýär. Uly kuwwatly transformatorlar üçin bu koeffisiýentiň ululygy $1,7 \div 1,8$, pes kuwwatlylar üçin $1,2 \div 1,3$ -e deňdir.

Kadalaşan gysga utgaşma toguň transformatoryň nominal togundan näçe esse uludygyny gysga utgaşmanyň naprýaženiýesi arkaly aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

$$I_{1g,u(\max)} = \frac{\sqrt{2}U_{1nom}}{Z_{g,u}} \cdot \frac{I_{1nom} \cdot 100}{I_{1nom}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 100}{u_{g,u}} \cdot I_{1nom}, \quad (1.112)$$

ýa-da

$$\frac{I_{1g,u}}{I_{1nom}} = \frac{I_{1g,u(\max)}}{\sqrt{2}I_{1nom}} = \frac{100}{U_{g,u}}.$$



1.62-nji surat. Ikinji sarymy duýdansyz gysga utgaşan transformatoryň $i_{1g,u}$ togunyň we onuň i_{1y} we i_{1c} düzüjileriň wagta görä üýtgeýiş grafiği

Güýç transformatorlarda gysga utgaşmanyň naprýaženiýesi $U_{g,u} = 3 \div 15 \%$ (uly sanlar uly kuwwatly transformatorlara degişli).

Şeýlelikde, $\frac{I_{1g,u}}{I_{1nom}} = 30 - 6$ deň bolup bilýär. Gysga utgaşmanyň $U_{g,u}$

naprýaženiýesiniň ýokarlanmagy bilen kadalaşan gysga utgaşmanyň togunyň nominal toga gatnaşygy peselýär. Transformatorlarda geçiş prosesleri $t = (3 \div 4) T_{g,u}$ wagt aralygynda geçip gutarýar. Pes kuwwatly transformatorlar üçin $T_{g,u} > 0,006$ s, kuwwatly transformatorlar üçin bolsa $T = 0,05$ s. Pes kuwwatly transformatorlarda geçiş prose-

si toguň üýtgemeginiň takmynan bir periodyň dowamynda gutarýar. Uly kuwwatly transformatorlarda bu proses toguň 6-8 periodyň dowamynda geçip gutarýar.

Gysga utgaşma wagtynda ýüze çykýan toklar transformatoryň nominal togundan ortaça 30 esse we ondan hem uly bolup bilýär. Şol sebäpli transformatoryň sarymynyň sargylarynyň arasynda ýüze çykýan elektromagnit güýçler bolmasyndan takmynan müň gezek uly güýçleri ýüze çykarýar. Bu güýçler sarymlaryň simleriniň sozulmagyna we olaryň izolýasiýasynyň zaýаланmagyna getirýär. Gysga utgaşma wagtyndaky elektromagnit güýçleri hasaba almak arkaly sarymlaryň hatardan çykmazlygy üçin olar ýerinden gozganmaz ýaly berkitmek zerurlygy ýüze çykýar.

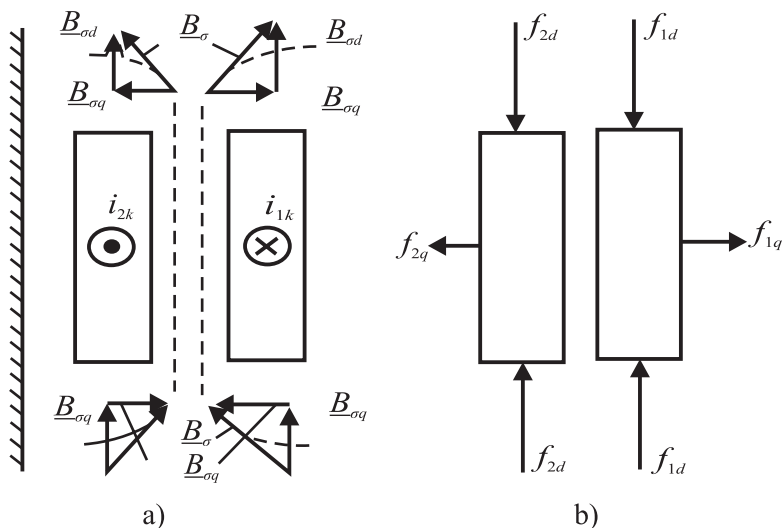
Transformatorlarda ýaýraýan magnit meýdany $B_{\sigma d}$ ugurdaş we $B_{\sigma d}$ kese düzüjilere dargadylýar. $B_{\sigma d}$ magnit meýdanynyň induksiýasy sarymyň okuna parallel ugrukdyrylan, $B_{\sigma q}$ sarymyň okuna perpendikulýar ugrukdyrylan. $B_{\sigma q}$ sarymyň gutarýan ýerinde magnit akymyň liniýasynyň gysarmagy netijesinde ýüze çykýar. Netijede, transformatoryň sarymlaryna ugurdaş F_{emd} we kese F_{emq} elektromagnit güýçler täsir edýärler:

$$F_{emd} \sim B_{\sigma d} - i_{lg} ; \quad F_{emq} \sim B_{\sigma q} - i_{lg} .$$

Çep elin düzgünini ulanmak arkaly (ugurdaş güýçler sarymlary onuň okunyň ugry boýunça gysmaga, kese güýçlere sarymlaryň içki bölegini gysmaga, daşky bölegini bolsa süýndürmäge çalyşýar (1.63-nji surat).

Transformator gysga utgaşan wagtynda onuň sarymlarynda ýüze çykan elektrik ýitgileriň toguň kwadratyna baglylygy sebäpli bölünip çykýan ýylylygyň mukdary adatdakysyndan onlarça esse ýokarlanýar. Sarymlaryň daşyny gurşap alýan mineral ýagyň sarymynda ýüze çykýan ýylylygy aýryp ýetismeyänligi sebäpli sarymlaryň gyzmagy adiobatiki geçip başlaýar we ähli ýylylyk sarymlary gyzdymaga sarp bolýar we onuň temperaturasyny çalt ýokarlandyrýar. Sarymlary misden taýýarlanan ýagly sowadylýan transformatorlaryň sarymlarynyň izolýasiýasyny zaýalaman saklap bilýän temperaturasynyň çägi 250°C, alýuminden taýýarlanan sarymlaryňky 200°C diýip

kabul edilýär. Transformatorlarda ýokarda görkezilen temperaturalara barmazlyk üçin gysga utgaşma wagty $3 \div 5$ s-dan ýokary geçmeli däl-dir. Şol wagtyň içinde transformatory setden aýyrmak üçin goragyň işlemegi zerurdyr.



1.63-nji surat. Ýaýraýan magnet meýdanynyň induksiýasynyň düzüjileri (a) we sarymlara täsir edýän elektromagnet güýçler (b)

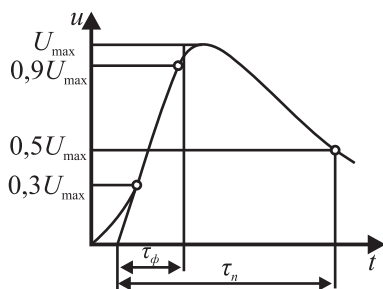
1.15. Transformatorlarda aşa naprýaženiýe

Sarymyň boýuna naprýaženiýäniň bölünişi

Kähalatlarda energoulgamda ulanylýan transformatorlar nominal naprýaženiýeden has uly bolan impuls naprýaženiýelere duçar bolýarlar. Şeýle naprýaženiýelere aşa naprýaženiýeler diýilýär. Aşa naprýaženiýeler, adatça, energoulgamyň käbir elementleri işe goýberilende ýa-da işden çykarylanda ýüze çykýan kommutasion proseslerde, gysga utgaşmalarda, izolirlenen neýtrally ulgamlarda ýere dugaly gysga utgaşma hadysalarynyň netijesinde ýüze çykyp bilýär. Bu ýagdaýlarda aşa naprýaženiýeleriň ululygy transformatoryň nominal naprýaženiýesinden takmynan 2,5–3,5 esse uly bolýar. Elektrik geçiriji howa liniýalary ýyldyrym uranda, çagba bulutlar zarýadsyzlananda liniýalarda indusirlenýan ýokary naprýaženiýeler transformatorlarda örän uly

($U_{a\dot{a}} = 10U_{nom}$) aša naprýaženiýeleriň ýüze çykmagyna sebäp bolýar. Şeýle naprýaženiýelere atmosfera aša naprýaženiýeleri diýilýär.

Köplenç ýagdaýlarda, çagba bulutlar zaryadsyzlananda liniýalarda öran gysga wagtlyk täsir edýän uly amplitudaly aperiodiki elektrik impulsalary döredýär. Bu impulsar elektrik liniýalarda ýüze çykan ýerinden liniýanyň iki tarapyna ýagtylygyň tizligine golaý tizlik bilen ýaýraýar. Emele gelýän impulsyň takmynan 1.64-nji suratdaky

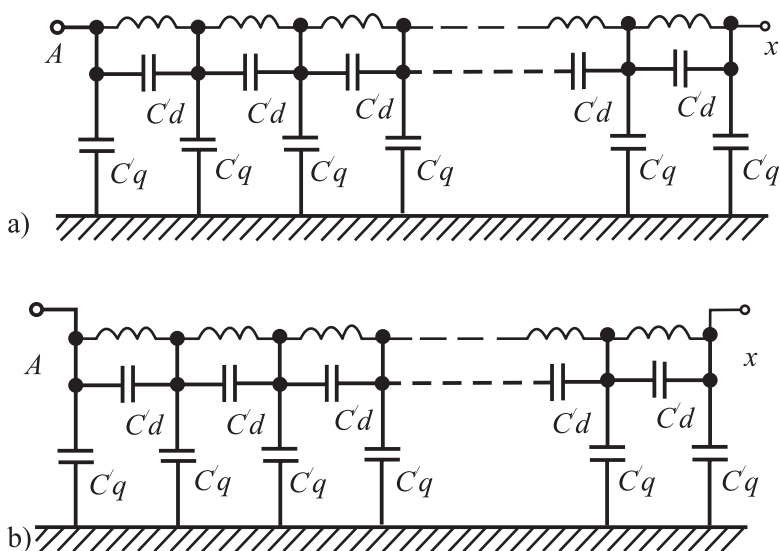


1.64-nji surat. Aša naprýaženiýäniň aperiodiki tolkuný

Tolkunyň öňdäki böleginde naprýaženiýäniň ululygynyň noldan maksimala çenli çalt ýokarlanmagy bolup geçýär. Bu bölege tolkunýň fronty diýilýär. Naprýaženiýäniň ýokarlanmagynyň geçýän t_f wagty mikrosekunda ýa-da mikrosekundyň ondan birine ($t_f = 0,1 - 1$ mks) deňdir. Tolkunyň fronty amplituda ululygy U_m bolan periodiki tolkunýň periodynyň takmynan dördten bir bölegine deňdir. Bu tolkunýň ýygylgy takmynan 250 kGs-e deňdir. Şeýle ýokary ýygylgy üçin transformatorlaryň $X_L = 2\pi fL$ induktiw garşylygy örän uludyr. Emma tersine onuň $X_C = 1/2\pi fc$ sygym garşylygy örän azdyr. Şol sebäpli transformatorlaryň sarymlarynda toklaryň we naprýaženiýeleriň bölünişine onuň sygym baglanyşyklary güýçli täsir edýär. Transformatorlarda sygymlar onuň sarymlarynyň aýratyn tegekleriniň aralaryndaky C'_d (dikligine sygym) we tegekler bilen transformatoryň ýere birikdirilen böleginiň arasyndaky C'_q (keseligine sygym) sygymlara bölünýär. Bu sygymlaryň hasaba alnan ýagdaýy üçin transformatoryň çalşyrma shemasy 1.65-nji a suratda görkezilendir.

Bu shemada: A – ýokary naprýaženiýeli sarymyň liniýa birigýän girişi, X – onuň izolirlenen ýa-da ýere birikdirilen çykyşy.

Shemadan görnüşü ýaly, C'_d sygymlar özaralarynda yzygider birikdirilendigi üçin sarymyň dikligine sygymy: $C_d = C'_d/n$, bu ýerde n – sarymy düžýän tegekleriň sany. Kese sygymlaryň özara parallel birikdirilendigi sebäpli: $C_q = n \cdot C'_q$ bolýar.



1.65-nji surat. Ýokary ýyglyklar üçin transformatoryň çalşyрма shemalary

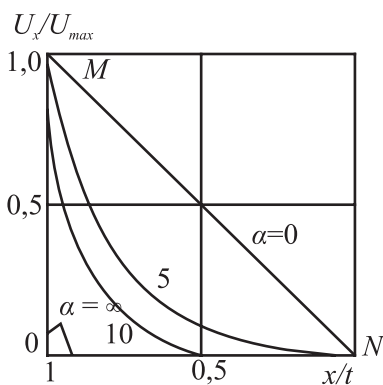
Haçan-da aşa naprýaženiýäniň front tolkunyny sarymyň girişine gelen pursaty prosesiniň örän uly ýyglygynyň bardygyny sebäpli, onuň induktiw garşylygynyň ululygyny tükeniksiz uly diýip hasap edip bolýar. Netijede, toguň we naprýaženiýäniň sarym boýunça ýaýramagy onuň sygymyna baglydygyny sebäpli, transformatory käbir giriş sygymy bilen çalşyrmaga mümkinçilik berýär. Bu ýagdaý üçin çalşyрма shema 1.65-nji *b* suratdaky görnüşi alýar.

Giriş sygymyň zarýadlanmak prosesiniň mikrosekundyň uly bolmadyk böleginde geçýändigini sebäpli, naprýaženiýe ilki başda nola çenli peselýär we soňra ol $2U$ çenli ösýär. Naprýaženiýäniň sarymyň sygymly zynjyry boýunça ýaýraýşyna naprýaženiýäniň başlangyç bölünişi diýilýär. Sarymyň boýuna naprýaženiýäniň ýaýraýşy deňölçeşsiz bolup, onuň bölünişi C_q hem-de C_d sygymlaryň gatnaşygy arkaly kesgitlenýän: $\alpha = \sqrt{C_q/C_d}$ koeffisiýente baglydyr (1.66-njy we 1.67-nji suratlar).

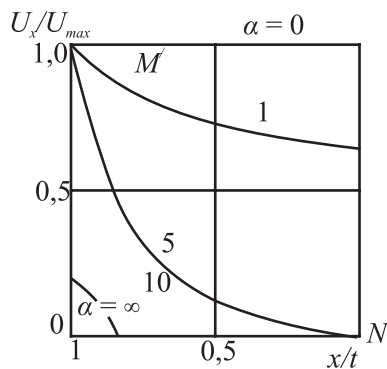
C_q we C_d sygymlaryň naprýaženiýäniň bölünişine täsirini çykyşy ýere birikdirilen sarymyň mysalynda seredeliň. Eger-de ýer bilen aradaky C'_q sygym ýok bolsa ($C'_q = 0$), onda C'_d sygymlar özara yzygider

birikdirilendigi sebäpli, olaryň üstünden birmeňzeş tok geçer. Eger-de C_d' sygymlar ululyklary boýunça deň bolsa, onda naprýaženiýe sarym boýunça deňölçegli bölüner (1.66-njy suratda MN-göni çyzyk).

Eger-de tersine C_d' sygym ýok bolsa ($C_d' = 0$), onda tok diňe sarymyň başlanýan ýerindäki birinji C_q' sygymdan geçer. Ýa-da başgaça aýdylanda naprýaženiýe sarymyň diňe birinji tegeğine düşer (1.66-njy surat M_0 -çyzyk). Hakykatda bolsa, naprýaženiýäniň sarymyň boýy boýunça ýaýraýşy şol iki çägiň aralygynda ýerleşýär. Şuňa meňzeşlikde izolirlenen neýtrally ýagdaý üçin hem naprýaženiýäniň başlangyç ýaýraýşynyň egrileri MN' we M'O' çyzyklaryň aralygynda ýerleşýär (1.67-nji surat).



1.66-njy surat. Neýtrally ýere birikdirilen ýagdaý üçin naprýaženiýäniň başlangyç bölünişi



1.67-nji surat. Neýtrally ýere birikdirilmedik ýagdaý üçin naprýaženiýäniň başlangyç bölünişi

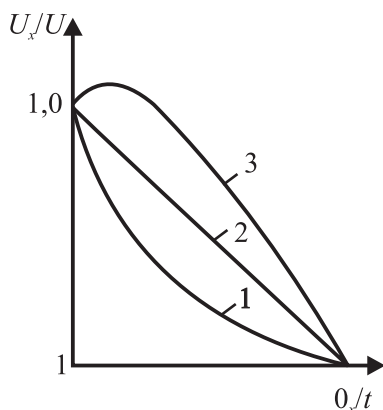
1.66-njy we 1.67-nji suratlardan görnüşi ýaly, naprýaženiýäniň sarymyň boýuna görä bölünişi örän deňölçegsizdir. Naprýaženiýäniň şeýle bölünmegi, ilkinji nobatda, C_q' kese sygymyň täsirinde ýüze çykýar. Ýagny sarymyň başlanýan ýerinden gutarýan tarapyna süýşdügiçe, zaryadlaryň uly bölegi şahalanýarlar we netijede ýere geçýän tok ulalýar. Şol sebäpli sarymyň başlanýan ýerinden uzaklaşdygyça sygymlaryň üstünden akýan toklar azalýar. Şeýlelikde, koeffisiýent näçe uly boldugyça (C_q' uly bolsa) şonça-da naprýaženiýe deňölçegsiz bölünýär. Adatça, $C_q' > C_d'$ we $\alpha = 5 \div 15$. Şeýle ululyklarda naprýaženiýeleriň başlangyç bölünişi ýere birikdirilen we birikdirilmedik neýtrally sarymlar üçin takmynan birmeňzeşdir.

Napryażeniýäniň başlangyç bölünişiniň egrilerinden görnüşi ýaly, onuň esasy bölegi sarymyň ilkibaşdaky tegeklerine düşýär we netijede olaryň izoýasiýalary uly howpa duçar bolýar. Tolkun transformatora geleninden käbir wagt geçenden soňra sarymyň her bir nokady durnuklaşan potensiala eýe bolýar. Şeýlelikde, sarym boýunça napryażeniýäniň ahyrky bölünişi $\alpha = 0$ ýagdyadaky egrä gabat gelýär (1.66-njy we 1.67-nji suratlar).

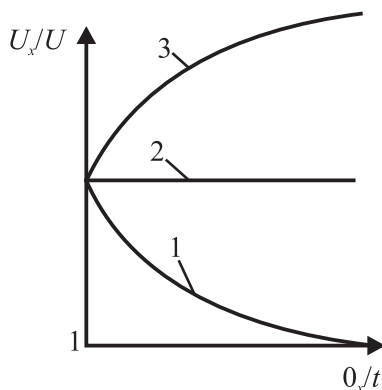
Netijede, napryażeniýäniň başlangyç we ahyrky bölünişleriniň arasynda geçiş prosesleri ýüze çykýar. Sarymyň çalşyрма shemasyň düzümine girýän sygymyň we induktiwligiň yrgyldyly kontury emele getirýändigini üçin geçiş prosesi ýokary ýygylýlykly görnüşde bolup geçýär. Sarymda energiýa ýirgileriniň bardygy sebäpli, ol yrgyldynyň söňýän häsiýeti bardyr.

Napryażeniýäniň başlangyç we ahyrky bölünişiniň arasyndaky tapawut uly boldugyça geçiş prosesindäki yrgyldyly hadysa şonça-da ýiti ýüze çykýar. Bu yrgyldylar ahyrky bölünişigiň göni çyzygyna (1.68-nji we 1.69-njy suratlarda 2-nji göni çyzyklar) görä amala aşyrylýar.

Şol sebäpli sarymyň dürli nokatlaryndaky ýere görä maksimal napryażeniýe 3-nji egri çyzyk boýunça kesgitlenýär. Napryażeniýäniň başlangyç bölünişiniň (1-nji egri çyzyk) 2-nji göni çyzyga görä aýnadan serpiglen görnüşidir.



1.68-nji surat. Neýtraly ýere birikdirilen sarymyň uzynlygy boýunça napryażeniýäniň bölünişi



1.69-njy surat. Neýtraly ýere birikdirilmedik sarymyň uzynlygy boýunça napryażeniýäniň bölünişi

Yrgyldyly prosesde aralyk we gyraky tegekler hem howply naprýaženiýelere duçar bolup biler. Izolirlenen neýtrally sarymyň ahyrynda naprýaženiýe takmynan 2 esse ýokarlanyp bilýär.

1.16. Transformatorlar barada gysgaça taryhy maglumatlar

Polat magnit geçirijide ýerleşdirilen, aýratyn iki sany sarymyň birinde tok üýtgände onuň ikinjisinde elektrik hereketlendiriji güýjüň indusirlenýändigini 1831-nji ýylda M.Faradeý synag geçirip, subut edipdir.

Üýtgeýän toguň energiýasyny aralyga geçirmek üçin niýetlenen, ýapyk magnit geçirijili transformatory 1884-nji ýylda doganlar Jon we Eduard Topkinsonlar tarapyndan döredilipdir. Olaryň taýýarlan transformatorlary O harpyna meňzeş ýapyk magnit geçirijisi bolup, onuň sterženlerinde pes we ýokary naprýaženiýeli sarymlar ýerleşdirilipdir. Şeýle gurluşly transformatorlaryň örän oňat iş häsiýetnamalarynyň bardygyny geçirilen synaglar görkezipdir.

Ýapyk magnit geçirijili birfazaly transformatorlaryň dürli görnüşleri (bronly, halka şekilli, sterženli) 1885-nji ýylda wenger elektrotehnikleri O.Blatti we K.Sepernowskiý tarapyndan işlenip taýýarlanylýdyr.

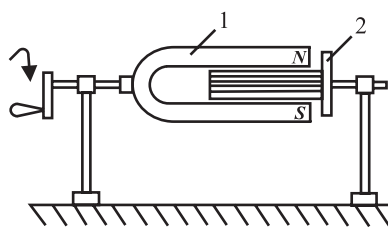
Häzirki döwürde elektrik energiýasyny aralyga geçirmekde we paýlamakda köpçülikleýin ulanylýan, ykdysady tarapdan amatly, üçfazaly transformatorlar 1889-njy ýylda rus elektrotehnigi M.O.Doliwo-Dobrowolskiý tarapyndan oýlanyp tapylypdyr.

II. ASINHROH MAŞYNLAR

2.1. Üçfazly asinhron elektrik hereketlendirijiler

2.1.1. Asinhron hereketlendirijiniň işleýiş düzgüni

Asinhron maşynlara asinhron generatorlar we asinhron hereketlendirijiler degişlidir. Asinhron maşynlar, esasan, hereketlendiriji hökmünde peýdalanylýar. Hereketlendirijiler bir, iki we üçfazly görnüşde taýýarlanylýar. Häzirki döwürde halk hojalygynyň dürli pudaklarynda üçfazly asinhron hereketlendirijiler giňden ulanylýar. Üçfazly asinhron hereketlendirijileriň ýüze çykmagy rus alymy M.O.Doliwo – Dobrowolskiniň ady bilen baglanyşyklydyr. Asinhron hereketlendirijiniň işleýiş düzgünine düşünmek üçin 2.1-nji suratda görkezilen elektromagnit mehanizminden peýdalanylň.



2.1-nji surat. Asinhron elektromagnit mehanizmi

Nal şekilli hemişelik magnit (1) deňölçegli herekete getirilen wagtynda, onuň döredýän aýlanýan magnit meýdanynyň güýç çyzyklary, iki polýusyň arasynda ýerleşen rotoryň (2) metaldan ýasalan sterženlerini (simlerini) kesip geçýär we olarda elektrik hereketlendiriji güýçleri indusirleýär. Indusirlenen elektrik hereketlendiriji güýçler rotoryň ýapyk zynjyrlarynda tok döredýär.

Magnit meýdanynda ýerleşdirilen tokly geçirijä täsir edýän elektromagnit güýç rotory aýlanmaga mejbur edýän aýlaýjy momenti döredýär. Rotoryň aýlaw ýygylgynyň ýokarlanmagy rotoryň

sterženlerinde indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýçleriň ululygynyň kemelmegine getirýär. Hereketlendirijiniň aýlaýjy momentine onuň herekete getirýän işçi mehanizmi we rotory saklaýan podşipnikler hem-de howa garşylyk momentlerini döredýärler. M_{st} statiki garşylyk moment bilen aýlaýjy moment özara deňleşen wagtynda rotor belli bir aýlaw ýygylýk bilen aýlanyp başlaýar. M_{st} statiki garşylyk momentiniň ululygynyň üýtgemegi rotoryň aýlaw ýygylýgynyň üýtgemegine getirýär.

Asinhron maşyn hereketlendiriji hökmünde ulanylýan wagtynda rotoryň bir minudyň dowamynda ýerine ýetirýän n_2 aýlaw ýygylýgy, aýlanýan magnit meýdanynyň şol wagt aralygynda ýerine ýetirýän n_1 aýlaw ýygylýgyndan mydama kiçidir ($n_2 < n_1$). Şol sebäpli bu hereketlendirijilere asinhron (ýagny sinhron däl ýa-da deň aýlaw ýygylýksyz hereketlendirijiler) diýlip at berilýär. Rotoryň aýlaw ýygylýgynyň statoryň magnit meýdanynyň aýlaw ýygylýgyndan näderejede yza galýandygyny görkezýän ululyga typma koeffisiýenti diýilýär. Ol s harpy bilen belgilenýär we aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (2.1)$$

Bu ýerden aşakdaky baglanyşygy hem alyp bileris:

$$n_2 = n_1(1 - s). \quad (2.2)$$

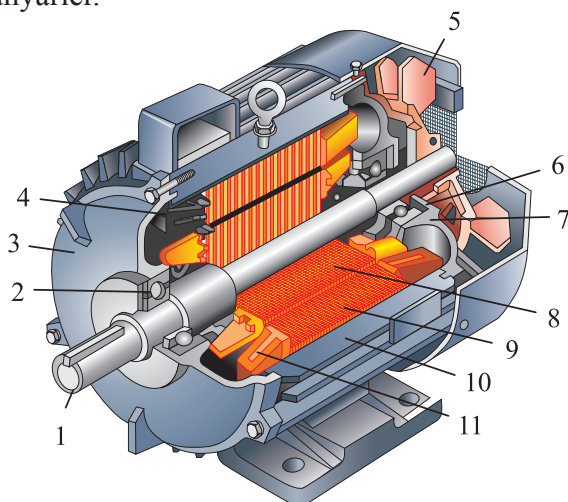
Rotoryň aýlaw ýygylýgynyň $n = 0 \div n_1$ aralykda üýtgäp bilýändigi sebäpli, typma koeffisiýentiniň ululygy $s = 1 \div 0$ aralykda üýtgeýär.

2.1.2. Asinhron hereketlendirijiniň gurluşy

Asinhron hereketlendirijiler önümçilikde ulanylýan hereketlendirijileriň beýleki görnüşlerine garanyňda, öz gurluşy boýunça ýönekeýligi, mehaniki taýdan berkligi we ykdysady taýdan amatlylygy bilen tapawutlanýar. Ol edil beýleki elektrik maşynlary ýaly statordan we rotordan ybaratdyr (2.2-*nji surat*).

Üçfazly üýtgeýän toguň elektrik energiýasyny üç sany hereketsiz sarymyň kömegi arkaly aýlanýan magnit meýdanynyň energiýa-

syna öwürýän stator çöýundan, polatdan ýa-da alýuminden ýasalan korpusdan (3 we 10), ýukajyk polat plastinkalardan ýygynalan magnitgeçiriji silindrden (9) we onuň iç ýüzinde oýulyp ýasalan pazlardan (4) hem-de olaryň içinde ýerleşdirilen oklary töwerek boýunça biri-birine görä deň aralyga süýşürilen üç sany hereketsiz (11) faza sarymlardan ybaratdyr. Aýlanýan magnit meýdanynyň energiýasyny mehaniki energiýa öwürýän rotor ýukajyk elektrotehniki polat plastinkalardan ýygynalan magnitgeçiriji silindrden (8) we onuň üstünden oýulyp ýasalan pazlarda ýerleşdirilen rotoryň sterženlerinden ýa-da sarymlaryndan ybaratdyr. Rotoryň sarymlarynyň gurluşyna görä, asinhron hereketlendirijiler gysga birleşdirilen we faza rotorly görnüşlere bölünýärler.

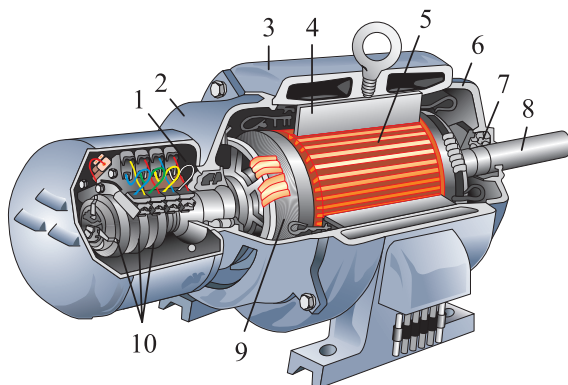


2.2-nji surat. Gysga birleşdirilen rotorly üçfazaly asinhron hereketlendirijiniň gurluşy: 1 – wal; 2, 6 – podşipnikler; 3, 10 – korpus; 4 – paz; 5 – wentilýator; 7 – podşipnigiň şiti; 8 – rotoryň magnitgeçirijisi; 9 – statoryň magnitgeçirijisi; 11 – statoryň sarymy

Gysga birleşdirilen rotoryň sarymynyň misden ýa-da alýuminden taýýarlanan sterženleri rotoryň üstünde, onuň okunyň ugruna ugurdaş, oýulyp ýasalan pazlarda ýerleşdirilýär we olaryň gutarýan uçlary iki tarapyndan, sterženleriň taýýarlanan metalyndan ýasalan ýörite halkalaryň kömegi arkaly özara gysga birleşdirilýär.

Faza rotoryň edil statoryňka meňzeş üç sany faza sarymlary bolup, olar “Ýyldyz” görnüşli birikdirilýär (2.3-nji surat). Bu sarymla-

ryň beýleki uçlary, rotoryň okuna birikdirilen kontakt halkalara (10) birikdirilýär. Biri-birinden we rotoryň okundan izolirlenen kontakt halkalara degip duran hereketsiz çotgalaryň kömegi arkaly rotoryň zynjyryna garşylyklarynyň ululyklaryny erkin üýtgedip bolýan reostatlar birikdirilýär. Faza rotora köplenç halatlarda kontakt halkaly rotor hem diýilýär. Rotor statoryň içinde ýerleşdirilip, onuň korpusynyň gapdal gapaklaryndaky podşipnikleriň kömegi arkaly saklanýar.

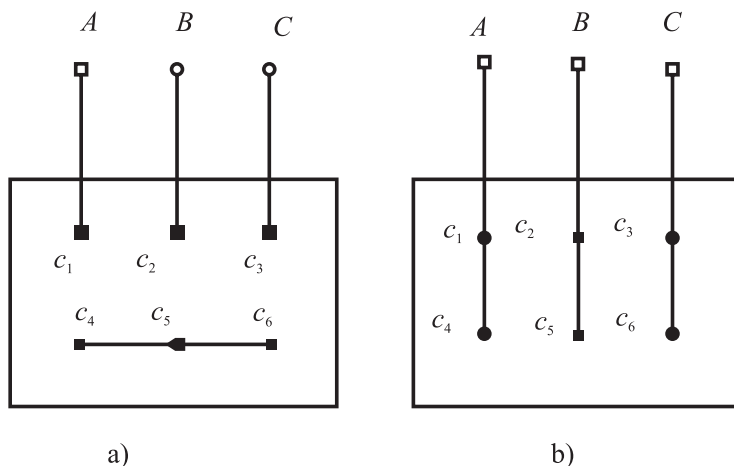


2.3-nji surat. Faza rotorly üçfazaly asinhron hereketlendirijiniň gurluşy:

- 1, 7 – podşipnikler; 2, 6 – podşipnikleriň şiti; 3 – korpus;
4 – statoryň magnitgeçirijisi; 5 – rotoryň magnitgeçirijisi;
8 – wal; 9 – statoryň sarymy; 10 – kontakt halkalary

Stator bilen rotoryň arasyndaky howa boşlugy rotoryň tutuş töweregi boýunça birmeňzeşdir. Statoryň fazalarynyň uçlary hereketlendirijiniň korpusynyň gapdalyna berkidilen gutujygyň içinde ýerleşdirilýär. Halkara standartyna görä, fazalaryň başlangyç uçlary deňişlilikde c_1 , c_2 , c_3 we olaryň ahyrky uçlary c_4 , c_5 , c_6 harplar bilen belgilenýär. Bu bolsa statoryň faza sarymlaryny üçfazaly toguň setine “Ýyldyz” ýa-da “Üçburçluk” görnüşde birikdirmäge mümkinçilik berýär. Hereketlendirijiniň tehniki ýazgysynda, adatça, onuň nominal naprýaženiýesiniň iki sany ululygy görkezilýär. Meselem: 127/220 W ýa-da 220/380 W we ş.m. Bu naprýaženiýeleriň ulusyna statoryň fazalarynyň “Ýyldyz” görnüşli, kiçisine bolsa “Üçburçluk” görnüşli birikdirilişi degişlidir. Egerde setiň naprýaženiýesi 220 W bolsa we hereketlendirijiniň pasportynda 127/220 W diýen ýazgy bar bolsa, onda statoryň faza sarymlary sete “Ýyldyz” görnüşli birikdirilýär (2.4-nji a surat).

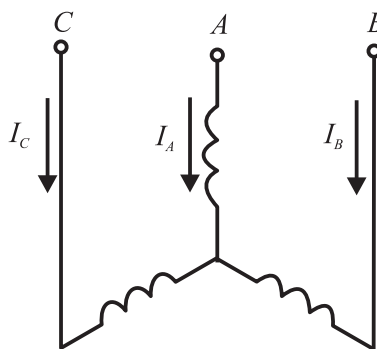
Eger-de hereketlendirijide 220/380 W diýen ýazgy bar bolsa, onda onuň faza sarymlary sete “Üçburçluk” görnüşinde birikdirilýär (2.4-nji b surat).



2.4-nji surat. Statoryň faza sarymlarynyň “Ýyldyz” (a) we “Üçburçluk” (b) birlikdiriliş shemalary

2.1.3. Aýlanýan magnit meýdanyň alnyşy

Giňişlikde töwerek boýunça oklary biri-birine görä 120° burç boýunça deň aralykda simmetrik ýerleşdirilen hereketsiz sarymlaryň ulgamy, fazalary boýunça 120° burça tapawutlanýan üçfazaly toklar bilen iýmitlendirilen wagtynda asinhron hereketlendirijiniň işlemegi üçin zerur bolan aýlanýan magnit meýdany ýüze çykarýar. Şeýle ýagdaýda emele gelýän aýlanýan magnit akymyň ululygy we onuň aýlaw ýygylgy wagta görä hemişelik bolýar. Eger-de töwerek boýunça ýerleşdirilen sarymlar ulgamy tekizlige ýaýradylsa, bu ulgamyň kömegi arkaly tekizlik boýunça göniçyzykly hereket edýän magnit



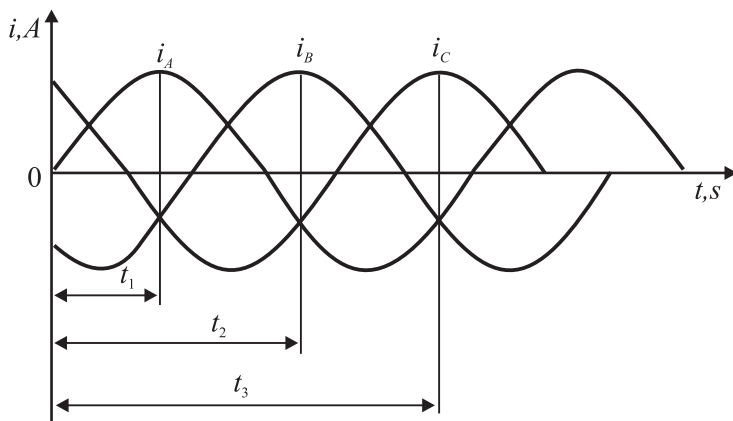
2.5-nji surat. Stator sarymlarynyň “Ýyldyz” görnüşli birlikdiriliş shemasy

meýdanyny alyp bolýar. Aýlanýan magnit meýdanynyň alnyş düzgü-
nine düşünmek üçin töwerek boýunça giňşlikde biri-birine görä
120°-a süýşürilen üç sany simmetrik sarymdan ybarat bolan ulgamyň
mysalynda seredeliň (2.5-nji surat).

Sarymlary “Ýyldyz” görnüşli birikdirilen simmetrik ulgam üçfa-
zaly toguň çeşmesinden iýmitleňýän wagtynda olardan geçýän i_A , i_B ,
 i_C toklar hem biri-birinden fazalary boýunça 120°-a tapawutlanýarlar.
Eger-de ulgamyň “A” (2.5-nji surat) sarymyndan geçýän tok başlangyç
wagt pursatynda nola deň diýip kabul etsek, onda toklaryň pursat ulu-
lyklary üçin deňlemeleri degişlilikde aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \sin \omega t; \\ i_B &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ i_C &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ). \end{aligned} \quad (2.3)$$

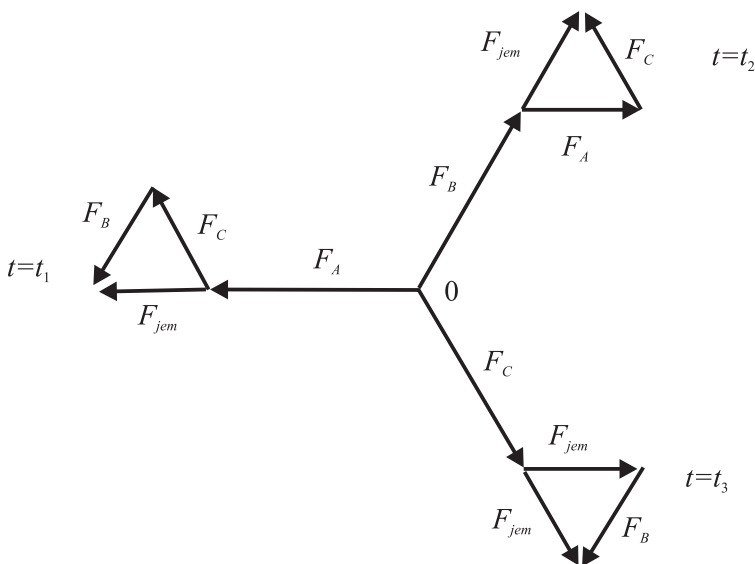
Toklaryň wagta görä üýtgeýşinden (2.6-njy surat) görnüşi ýaly
olaryň sarymlarda pulsirlenýän magnit akymy emele getirýär. Olaryň
bilelikde emele getirýän aýlanýan magnit meýdanynyň ululygynyň
hem-de onuň aýlaw ýygylýgynyň wagta görä üýtgemän galýandygy-
na düşünmek üçin pulsirleýji magnit akymalarynyň ugurlary statoryň
sarymlarynyň okunyň ugry bilen gabat gelýär diýip kabul edeliň. So-
ňra jemleýji magnit akymynyň ululygyny we ugruny t_1 , t_2 , t_3 wagt
pursatlary üçin kesgitläliň.



2.6-njy surat. Üçfazly toguň wagta görä üýtgeýşi

Onuň üçin ilki bilen i_A, i_B, i_C toklaryň položitel ugrý hökmünde, olaryň degişli sarymlarynyň başlangyç uçlaryndan ahyrky uçlaryna tarap bolan ugruny kabul edeliň. Sarymlarda emele gelýän F_A, F_B, F_C magnitlendiriji güýçleriň dürli wagt pursatlaryndaky ululyklary sarymlardaky toklarynyň pursat ululyklary bilen kesgitlenýär. Şol sebäpli, olaryň ugurlary sarymlaryň oklarynyň ugrý bilen gabat gelýär we maksimal tokda olar hem özleriniň in uly ululyklaryny alýarlar ($F_m = wI_m$) diýip şertleşeliň. Berlen t_1 wagt pursatynda i_A tok we onuň döredýän F_A magnitlendiriji güýji položitel maksimuma eýedir.

Emma bu pursatda i_B we i_C toklar, şeýle-de bu toklaryň döredýän F_B we F_C magnitlendiriji güýçleri ululyklary boýunça özara deň, alamatlary boýunça otrisateldirler. t_1 wagt pursatyna degişli F_A, F_B we F_C ululyklar goşulyp, alnan F_{jem} -in diagrammasy 2.7-nji suratda görkezilendir. t_1 wagt pursatynda F_{jem} -in ugrunyň “A” sarymyň okunyň ugrý bilen gabat gelýändigini we onuň ululygy boýunça bu sarymda emele gelýän maksimal F_A magnitlendiriji güýçden 1,5 esse uludygyny subut etmek kyn däl. $t_2 = t_1 + \frac{T}{3}$ wagt pursatynda (T = toguň periody) i_B tok we onuň F_B magnitlendiriji güýji položitel maksimuma deňdir. i_A we i_C toklar we olaryň F_A we F_C magnitlendiriji güýçleri ululyklary boýunça özara deň bolup, alamatlary boýunça otrisateldirler. t_2 wagt pursatynda F_{jem} -in ugrý “B” sarymyň okunyň ugrý bilen gabat gelýär. Onuň ululygy edil t_1 wagt pursatyndaky ýaly bolup, oňa görä giňişlikde 120° -a öwürülýär. $t_3 = t_2 + \frac{T}{3}$ wagt pursatynda i_C tok we F_C magnitlendiriji güýç položitel maksimuma eýedir. Emma bu wagt pursatynda i_A we i_B toklar hem-de F_A we F_B güýçler özara deň bolup, alamatlary boýunça otrisateldir. t_3 wagt pursatyna degişli F_{jem} -in ululygy t_1 we t_2 pursatlarda degişli magnitlendiriji güýçlere deň bolup, özüniň ugrý boýunça “C” sarymyň okunyň ugrý bilen gabat gelýär. t_1, t_2, t_3 wagt pursatlary üçin gurlan diagrammalardan görnüşi ýaly, üç sany hereketsiz sarymlaryň pulsirleýji magnit akymalary, ululygy boýunça bir sarymyň maksimal magnit akymyndan 1,5 esse uly we toguň bir periodynyň dowamynda giňişlikde doly bir aýlawy ýerine ýetirýän aýlanýan magnit meýdanyny emele getirýär.



2.7-nji surat. Iki polýusly aýlanýan magnit meýdanynyň alnyşyny düşündirmek üçin diagramma

Şeýlelikde, iki polýusly magnit meýdanynyň bir minudyň dowamyndaky aýlaw ýygylgy aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

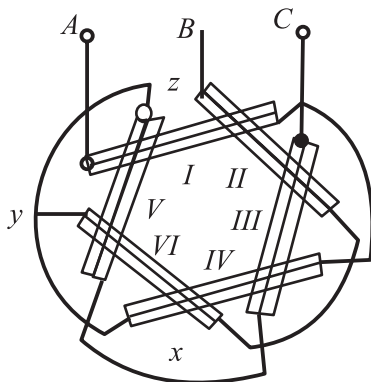
$$n_1 = 60 \cdot f_1.$$

Eger-de $f_1 = 50$ Gs diýip kabul etsek:

$$n_1 = 60 \cdot f_1 = 60 \cdot 50 = 3000 \text{ aýl/min.}$$

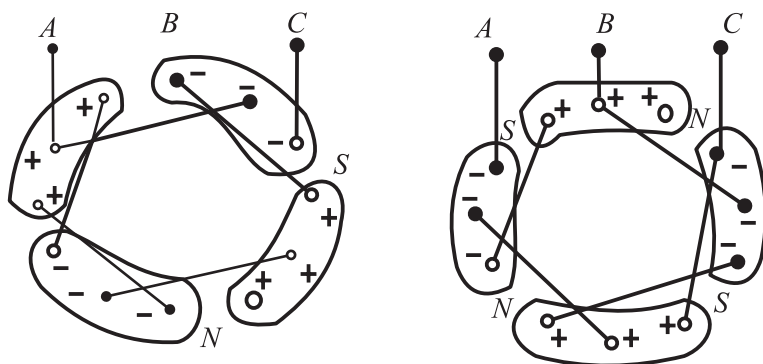
Pes aýlaw ýygylkly aýlanýan magnit meýdanyny almak üçin statoryň faza sarymlarynyň sanyny 3-den 6-a, 9-a, 12-ä we ş.m. köpeltmek we olary 120° gradus burç bilen özara ýerleşdirmek ýeterlikdir.

Eger-de 6 sany sarym alyp, onuň I sarymyny IV bilen, II, V bilen, III, VI-njy bilen, 2.8-nji suratda görkezilişi ýaly yzygider birikdirsek, onda olaryň



2.8-nji surat. Dört polýusly aýlanýan magnit meýdanyny almak üçin statoryň sarymlarynyň birikdirilişi

üstlerinden geçýän üçfazaly toguň täsirinde dört polýusly aýlanýan magnit meýdany alynýar (2.8-nji surat).



2.9-njy surat. Wagat t_1 -den $t_2 = t_1 + \frac{T}{3}$ -ä üýtgände statoryň magnit meýdanynyň polýuslarynyň özara ýerleşşi

Bu ýagdaýda, wagta görä üýtgeýişleri 2.6-njy suratda görkezilen i_A, i_B, i_C toklaryň, seredilýän ulgamda t_1 we $t_2 = t_1 + \frac{T}{3}$ wagat pursatlaryna degişli döredýän magnit meýdanlarynyň polýuslarynyň özara ýerleşişlerini deňeşdirmek arkaly göz ýetireliň (2.9-njy surat). Dört polýusly magnit meýdany toguň wagta görä üýtgeýişiniň üçden bir ($1/3$) periodynyň dowamynda 120° -a däl-de, diňe 60° -a öwrülýär. Ýagny, onuň bir minudyň dowamynda ýerine ýetirýän n_1 aýlaw sany iki polýusly magnit meýdanynyň aýlaw sanyna görä iki esse azdyr. Eger-de statoryň sarymlarynyň sanyny 9-a eltsek, onda statoryň magnit meýdany alty polýusly bolýar we onuň aýlaw ýygylgy, iki polýusly magnit meýdanynyňka görä üç esse kiçeler. Aýlanýan magnit meýdanynyň bir minudyň dowamynda ýerine ýetirýän aýlaw ýygylgy, onuň p polýus jubitleriniň sanyna görä aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}. \quad (2.4)$$

Ýygylgy, senagat ýygylgyna ($f = 50$ Gs) deň bolan üçfazaly setden iýmitlenýän asinhron hereketlendirijiniň aýlanýan magnit

meýdanynyň bir minudyň dowamynda ýerine ýetirýän aýlaw sanyň, onuň polýus jübütleriniň sanyna görä üýtgeýşi 2.1-nji tablisada görkezilendir.

2.1-nji tablica

Polýus jübütleriniň sany, p	1	2	3	4	5	6
Magnit meýdanynyň aýlaw ýygylgy, aýl/min	3000	1500	1000	750	600	500

2.1.4. Üýtgeýän toguň maşynlarynyň sarymlarynyň saralyş usullary

Birgatly sarymlar

Üýtgeýän toguň maşynlarynyň sarymlary bir we iki gat görnüşde saralýar. Birgat sarymlaryň saralyşynyň dürli görnüşleriniň bardygyna garamazdan, olaryň ählisi elektrik we magnit taýdan birmeňzeşdir. Şeýle-de olar biri-birinden diňe sarymlaryň maňlaý taraplarynyň görnüşleri boýunça tapawutlanýarlar. Adatça, sarymlar saralmazdan öňürti olaryň ýazgyn shemalary taýýarlanylýar. Ýazgyn shemany almak üçin maşynyň statorynyň magnitgeçirijisi tekizlige ýaýradylýar. Bu tekizlikde dik göni çyzyklar arkaly statoryň pazlary şekillendirilýär. Ýazgyn shemada içi simli pazlar sanlar arkaly belgilenenden soňra, olar fazalar boýunça bölünýär we polýus bölekleriniň çäkleri anyklanylýar. Statoryň bir polýus bölegine $3q$ sany paza düşýär. Bir polýusyň bir fazasyna düşýän pazyň sany:

$$q = \frac{Z}{2p \cdot m}.$$

Bu aňlatmada: Z – statoryň pazlarynyň sany; p – polýus jübütleriniň sany; m – fazalaryň sany.

Soňra sarymlaryň simlerinde indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjüň şertli položitel ugurlary belgilenilýär. Sarymlaryň goňşy polýusda ýerleşen simlerindäki elektrik hereketlendiriji güýjüň ugry garşylykly tarapa alynýar. Bir faza degişli sarymyň tegekleriniň simlerindäki elektrik hereketlendiriji güýçler goşular ýaly we tegekler

özara ýakyn aralyk bilen birleşdiriler ýaly shema çyzylýar. Indi birgat sarymly shemalaryň käbirine seredeliň.

Konsentrik sarymlar

Goý, statoryň magnitgeçirijisiniň $Z = 24$ sany pazy bar diýeliň. Polýuslaryň sany $2p = 4$ diýeliň, fazalaryň sany $m = 3$ diýip kabul edeliň. Onda bir polýusyň bir fazasyna düşýän pazyň sany:

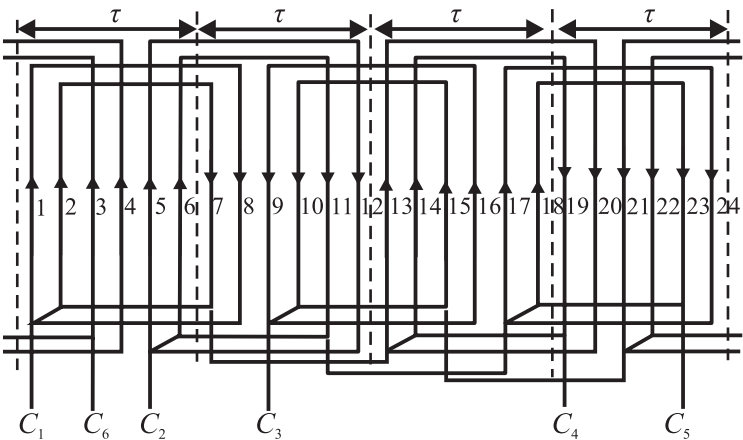
Faza sarymlary statoryň pazlarynda yzygiderlikde ýerleşdirýäris. Bu yzygiderlikdäki harp belgileri degişlilikde A, B, C fazalaryň sarymlarynyň başlanýan we gutarýan uçlary.

Ýokarda aýdylanlary hasaba alyp, statoryň faza sarymlarynyň pazlarda ýerleşdiriliş tablisasyny taýýarlaýarys (2.2-nji tablisa).

2.2-nji tablisa

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A_1	A_1	C_2	C_2	B_1	B_1	A_2	A_2	C_1	C_1	B_2	B_2
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A_1	A_1	C_2	C_2	B_1	B_1	A_2	A_2	C_1	C_1	B_2	B_2

Soňra şu tablisa boýunça fazalara degişli sarymlary 2.10-njy suratda görkezilişi ýaly ýerleşdirýäris.



2.10-njy surat.
Birgaty konsentrik sarymlaryň saralyş shemasy

Berlen wagt pursatynda A we B faza sarymlarynda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýçleri položitel, C fazada indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýji otrisatel diýip kabul edeliň. A we B fazalaryň sarymlarynyň birinji tegekleriniň başlanýan taraplarynyň degişlilikde 1 we 2 hem-de 5 we 6-njy pazlarda ýerleşendigi sebäpli, olarda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjüň položitel ugurlaryny ýokarlygyna tarap, C fazanyň ikinji tegeginin gutarýan tarapynyň 3 we 4-nji pazlarda ýerleşýändigini sebäpli, onuň elektrik hereketlendiriji güýjüniň ugruny hem ýokarlygyna ugrukdyrýarys. A we B fazalaryň sarymlarynyň, birinji tegekleriniň gutarýan taraplarynyň degişlilikde 7 we 8 hem-de 11 we 12 pazlarda ýerleşendigi üçin olaryň elektrik hereketlendiriji güýjüniň ugruny aşaklygyna tarap ugrukdyrýarys. Şeýle-de C fazanyň birinji tegeginin başlanýan tarapynyň 9 we 10 pazlarda ýerleşýändigini üçin olaryň elektrik hereketlendiriji güýjüniň ugruny hem aşaklygyna tarap ugrukdyrýarys.

Soňra şeýle tertipde soňky pazlarda ýerleşen simlerde indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýçleriň ugurlary hem-de polýus bölünmeleriniň çäkleri kesgitlenilýär.

Halkara standarty boýunça asinhron hereketlendirijileriň faza sarymlarynyň başlaýan uçlarynyň degişlilikde C_1 , C_2 we C_3 , olaryň gutarýan uçlarynyň bolsa C_4 , C_5 we C_6 harplar bilen belgilenýändigini sebäpli, shemalarda A , B , C sarymlaryň başlanýan uçlary C_1 , C_2 , C_3 olaryň gutarýan uçlary bolsa C_4 , C_5 , C_6 harplar bilen belgilenýär.

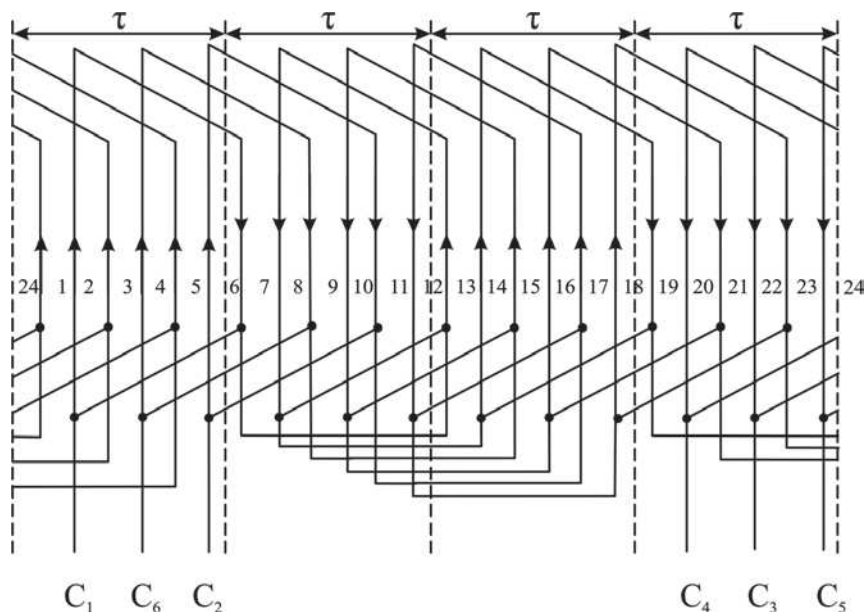
Zynjyr görnüşli sarymlar

Birmeňzeş ini we görnüşli bolan zynjyr görnüşli sarymyň ($z = 24$; $2p = 4$; $m = 3$) taýýarlanylş shemasy 2.11-nji suratda görkezilendir. Shema çyzylmazdan öň onuň faza sarymlarynyň pazlarda ýerleşdiriliş tablisasy taýýarlanýar (2.3-nji tablisa).

2.3-nji tablisa

24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A_1	A_1	C_2	C_2	B_1	B_1	A_2	A_2	C_1	C_1	B_2	B_2
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
A_1	A_1	C_2	C_2	B_1	B_1	A_2	A_2	C_1	C_1	B_2	B_2

Bu tablisa boýunça zynjyr görnüşli birgat sarymyň saralyşy 2.11-nji suratda görkezilen tertipde saralýar. Statoryň polýus aralyklaryny kesgitlemek üçin faza sarymynda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjüň položitel ugurlary konsentrik sarymyň saralyşyndaka meňzeşlikde alynýar.



2.11-nji surat. Zynjyr görnüşli birgatly sarymlaryň saralyş shemasy

Birgat sarymlary pazlarda ýerleşdirmekligiň ikigat sarymlaryňkydan has aňsatlygyna seretmezden, olarda ýokary ýygýlykly garmonikalaryň ýüze çykyanlygy sebäpli praktikada gysgaldylan ädimli ikigat sarymly shemalar hem peýdalanylýar.

Ikigatly sarymlar

Goý, statoryň magnitgeçirijisiniň paz sany $Z = 24$, polýuslaryň sany $2p = 4$, fazalarynyň sany $m = 3$ deň bolsun. Maşynyň polýus bölünmesi:

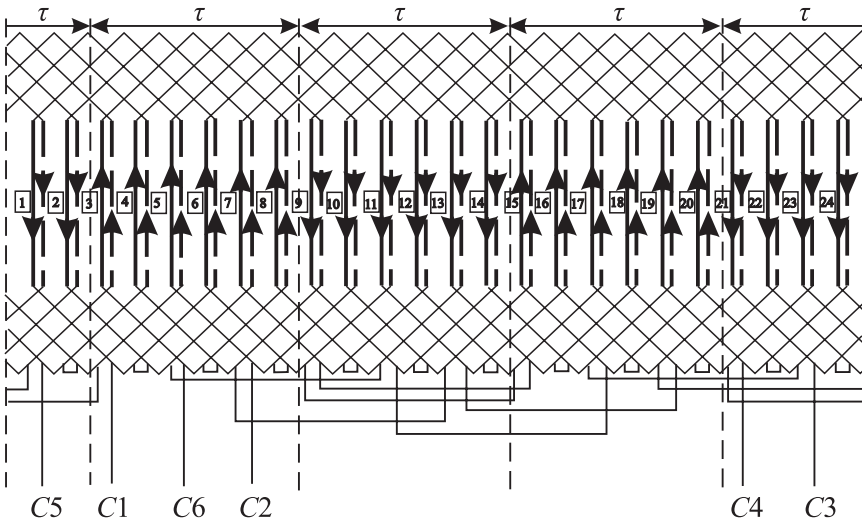
Sarymyň gysgaldylan ädimini $y = 0,8 \cdot \tau = 0,8 \cdot 6 \approx 5$ diýip kabul edeliň. Bir polýus böleginde bir faza sarymyna deňişli pazlaryň sany:

Pazlarda faza sarymlarynyň ýokarky we aşaky böleklerini $q = 2$ san boýunça 2.4-nji tablisada görkezilişi ýaly tertipde ýerleşdirýäris.

2.4-nji tablisa

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A_1	A_1	C_2	C_2	B_1	B_1	A_2	A_2	C_1	C_1	B_2	B_2
A_1	C_2	C_2	B_1	B_1	A_2	A_2	C_1	C_1	B_2	B_2	A_1
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A_1	A_1	C_2	C_2	B_1	B_1	A_2	A_2	C_1	C_1	B_2	B_2
A_1	C_2	C_2	B_1	B_1	A_2	A_2	C_1	C_1	B_2	B_2	A_1

Shemada sarymlaryň pazlaryň ýokarky böleginde ýerleşen simlerini göni çyzyklar, onuň aşaky böleklerinde ýerleşen simlerini bolsa aralary kesilen (ştrihlenen) çyzyklar bilen şekillendirilýär. Soňra, y ädim bilen sarymlaryň pazlaryň ýokarky we aşaky böleklerinde ýerleşdiriliş shemasy 2.12-nji suratda görkezilişi ýaly tertipde ýerine ýetirilýär.



2.12-nji surat. Iki gat sarymyň halka görnüşli saralyş shemasy

2.12-nji suratda görkezilen iki gat sarymyň saralyş shemasyndan görnüşü ýaly sarymlaryň aşaky fazalar boýunça zonasý ýokarky fazalar zonasyna görä oňositel süýşmesi bardyr. Şeýle süýşme diňe gysgaldylan ädimli sarymlar üçin mahsusdyr. Sarymlaryň şu görnüşli saralyşynda pazyň içinde dürli fazalara degişli sarymlaryň taraplary ýerleşýär. Faza sarymlaryň tegekleri özara birikdirilende olaryň elektrik hereketlendiriji güýçleri goşular ýaly edilip birikdirilýär. Iki gatly shemalarda sarymlaryň sany bir gatly shemalar bilen deňeşdirilende 2 esse köpdür.

2.1.5. Asinhron hereketlendirijiniň boş iş düzgüni

Asinhron hereketlendiriji üçfazly toguň setine birikdirilen wagtynda onuň statorynda döreýän aýlanýan magnit meýdanynyň güýç çyzyklary statoryň we rotoryň sarymlaryny kesip geçýär we olarda elektrik hereketlendiriji güýçleri indusirleýär. Eger-de rotoryň sarymlary ýapyk zynjyry emele getirmeýän bolsa, onda rotorda oýandyrylan elektrik hereketlendiriji güýçler hiç hili tok döretmeýär we netijede hereketlendirijiniň aýlaýjy momenti nola deň bolýar. Bu ýagdaýda hereketlendirijiniň rotory hereketsiz galýar we onuň sarymynda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjüň ýygylgy aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

$$f_2 = \frac{pn_1}{60}. \quad (2.5)$$

2.4-nji aňlatmany hasaba alyp, hereket etmeýän rotorda we statorda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýçleriň öz ýygylklary boýunça özara deňligine göz ýetirip bolar:

$$f_2 = \frac{p60f_1}{60p} = f_1. \quad (2.6)$$

Statoryň we hereket etmeýän rotoryň sarymlarynyň bir sargysynda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjüň ululygy edil güýç transformatoradaky ýaly kesgitlenýär:

$$E = 4,44 f_1 \Phi_m. \quad (2.7)$$

Bu ýerde Φ_m statoryň maksimal magnit akymy. Statoryň we hereket etmeýän rotoryň elektrik hereketlendiriji güýçleri deňşilikde:

$$\begin{aligned} E_1 &= w_1 E = 4,44 w_1 f_1 \Phi_m; \\ E_2 &= w_2 E = 4,44 w_2 f_1 \Phi_m. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Bu ýerde w_1 we w_2 statoryň we rotoryň sarymlarynyň sargy sanlarydyr.

Eger-de asinhron hereketlendirijiniň rotorynyň sarymlary ýapyk zynjyry emele getirýän bolsa, onda statoryň aýlanýan magnit meýdany tarapyndan oýandyrylýan E_2 elektrik hereketlendiriji güýji

rotorda I_2 togy ýüze çykarýar we rotor belli bir ýygylýk bilen aýlanyp başlaýar. Rotoryň okuna hiç hili işçi mehanizm birikdirilmedik wagtynda, statoryň sarymynyň üstünden geçýän I_0 toguň ululygy hereketlendirijiniň kuwwatyna görä, onuň nominal togunyň $20 \div 40\%$ -ni düzýär, ýagny:

$$I_0 = (0,2 \mid 0,4)I_{nom}.$$

Asinhron hereketlendirijide I_0 boş iş toguň, transformatorlaryň boş iş togundan ($I_0 = (0,02 \mid 0,1)I_{nom}$) uly bolmagy, stator bilen rotoryň arasyndaky howa boşlugynyň täsiri bilen düşündirilýär. Ýagny, $w_1 I_0$ magnitlendiriji güýç tarapyndan döredilýän Φ_0 magnit akymynyň ýoly näçe köp howa gatlagynyň üstünden geçdigiçe, şol bir ululykdaky magnit akymyny döretmek üçin şonça-da uly tok gerek bolýar.

$$\Phi_0 = \frac{w_1 I_0}{R_m + R_{howa}}. \quad (2.9)$$

2.1.6. İşleýän hereketlendirijide elektromagnit hadysalar

Asinhron hereketlendiriji sete birikdirilen wagtynda, onuň rotory herekete gelyär we belli bir ýygylýk bilen aýlanýan magnit meýdanynyň herketiniň ugruna tarap aýlanyp başlaýar. Rotoryň n_2 aýlaw ýygylýgy, mydama aýlanýan magnit meýdanynyň n_1 aýlaw ýygylýgyndan yza galýar. Rotoryň aýlaw ýygylýgynyň aýlanýan magnit meýdanynyň aýlaw ýygylýgyndan näçe yza galýandygyny görkezýän s typma koeffisiýentiniň ululygy, esasan, hereketlendirijiniň okuna birikdirilen işçi mehanizmiň hereketlendirijä görkezýän garşylyk momentiniň ululygyna baglydyr. Hereketlendirijiniň okuna hiç hili işçi mehamizm birikdirilmedik ýagdaýynda s typmanyň ululygy orän kiçidir ($s = 0,01 \div 0,04$). Hereketlendirijiniň okuna birikdirilen mehanizmiň görkezýän garşylyk momenti ýokarlandygyça, rotoryň n_2 aýlaw ýygylýgy peselýär ýa-da s typmanyň ululygy ýokarlanýar. Hereketlendiriji öz nominal ýükünde işleýän wagtynda s typmanyň ululygy hereketlendirijiniň kuwwatyna görä $s_{nom} = 0,02 \mid 0,08$ töwereginde bolýar. Indi, n_2 aýlawy ýerine ýetirýän rotoryň sarymlarynda indusirlenýän E_{2s} elektrik hereketlendiriji güýjüň ululygyna we onuň täsiri netijesinde döreýän I_{2s} toguň f_{2s} ýygylýgyny kesgitleliň.

Statoryň aýlanýan magnit meýdany, hereket edýän rotora görä, bir minudyň dowamynda $n_1 - n_2$ sany artykmaç aýlaw edýär diýeliň. Onda hereket edýän rotorda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjüň ýygylgy:

$$f_{2s} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = \frac{p \cdot n_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = s f_1. \quad (2.10)$$

$s < 1$ -bolan ýagdaýynda, statoryň sarymlary ýygylgy senagat ýygylgyna ($f_1 = 50$ Gs) deň bolan setden ýýmitlenen wagtynda hereketlendirijiniň rotorynyň elektrik hereketlendiriji güýjüniň we togunyň ýygylgy $f_{2s} = 1 \div 4$ Gs töwereginde bolýar. Hereket edýän rotoryň sarymynda indusirlenýän E_{2s} elektrik hereketlendiriji güýji aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

$$E_{2s} = 4,44 w_2 f_{2s} \Phi_m = s \cdot E_2. \quad (2.11)$$

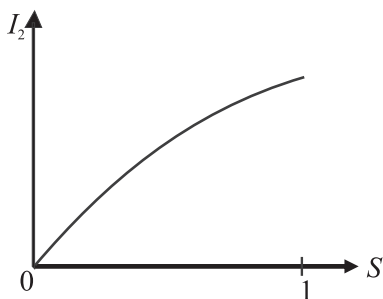
Bu aňlatmadan görnüşi ýaly, E_{2s} elektrik hereketlendiriji güýjüň ululygy hereket etmeýän rotorda indusirlenýän E_2 elektrik hereketlendiriji güýjüň s typma köpeldilmegine deňdir. Rotoryň togy diňe bir hereketlendirijiniň umumy magnit akymyny döretmäge gatnaşmak bilen çäklenmän, ol rotoryň ýaýraýan $\Phi_{2\delta}$ magnit akymyny hem emele getirýär. Bu akymyň ululygy I_2 toguň ululygyna göni baglanyşykda bolup, rotoryň her bir fazasynyň sarymynda: $E_{2s} = 4,44 w_2 f_{2s} \Phi_{2\delta}$ elektrik hereketlendiriji güýji oýandyryar. E_{2s} elektrik hereketlendiriji güýji rotoryň $X_{2\delta}$ induktiw garşylygyndaky naprýaženiýäniň peselmesi görnüşinde ýazyp bileris:

$$E_{2\delta} = -j \cdot X_{2\delta} \cdot I_2. \quad (2.12)$$

Hereket edýän rotoryň $X_{2\delta}$ induktiw garşylygyny hereket etmeýän rotoryň X_2 reaktiw garşylygy bilen aňladalyň:

$$X_{2\delta} = 2\pi \cdot f_{2s} \cdot L_2 = s \cdot X_2. \quad (2.13)$$

Bu ýerde L_2 rotoryň sarymynyň induktiwligi.



2.13-nji surat. Rotoryň togunyň typma bagly üýtgeýişiniň egrisi

Şeýlelikde, hereket edýän rotoryň togy:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{z_2} = \frac{E_2 \cdot s}{\sqrt{R_2^2 + (X_2 \cdot s)^2}}. \quad (2.14)$$

Bu ýerde R_2 rotoryň sarymynyň aktiw garşylygy.

2.13-nji suratda rotoryň I_2 togunyň, s typma koeffisiýentine bolan $I_2 = f(s)$ baglanyşygy görkezilendir.

Görnüş i ýaly I_2 tok özüniň iň ýokary ululygyny hereketlendiriji işe goýberilen pursatynda ($s = 1$ bolan ýagdaýynda) eýe bolar. Rotoryň aýlaw hereketiniň ýokarlanmagy bilen ýa-da s -typmanyň ululygynyň kemelmegi bilen I_2 toguň ululygy hem peselýär. Eger-de rotor bilen statoryň magnit meýdany deň ýygylýk bilen hereket edýär diýip göz onüne getirsek, onda bu ýagdaýda statoryň aýlanýan magnit meýdanynyň güýç çyzyklary rotoryň sarymlaryny kesip geçmeýär. Netijede, E_2 we I_2 nola deň bolýar. Real ýagdaýda, hatda hereketlendiriji boş iş işleýän wagtynda hem rotoryň hereketine ony gurşap alan howa we rotoryň okunyň daýanýan podşipnikleri örän az bolsa-da belli bir derejede garşylyk momentini döredýärler. Bu bolsa, $n_2 < n_1$ bolmagyna getirýär. Rotoryň I_2 togunyň nola deň ($I_2 = 0$) bolan ýagdaýynda, hereketlendirijiniň magnit meýdany diňe statoryň magnitlendiriji güýji tarapyndan döredilýär:

$$\underline{F}_0 = \frac{3}{2} w_1 \underline{I}_0. \quad (2.15)$$

Rotoryň I_2 togunyň nola deň däl ýagdaýynda, hereketlendirijiniň magnit meýdany stator bilen rotoryň magnitlendiriji güýçleri tarapyndan bilelikde döredilýär:

$$\underline{F}_{jem} = \underline{F}_1 + \underline{F}_2 = \frac{3}{2} w_1 \underline{I}_1 + \frac{3}{2} w_2 \underline{I}_2. \quad (2.16)$$

Hereketlendirijä berilýän U_1 naprýaženiýe, esasan, statoryň E_1 elektrik hereketlendiriji güýjüni deňagramlaşdyrýar ($U_1 \approx E_1$). Hereketlendirijiniň islendik iş düzgüninde Φ_{jem} jemleýji magnit akymynyň ululygy boýunça takmynan hemişelik galýandygy sebäpli, hereketlendirijiniň magnitlendiriji güýçleriniň deňligi aşakdaky görnüşde ýazylýar:

$$\frac{3}{2} w_1 \underline{I}_1 + \frac{3}{2} w_2 \underline{I}_2 \approx \frac{3}{2} w_2 \underline{I}_0. \quad (2.17)$$

Bu deňlemäniň sag we çep taraplaryny $\frac{3}{2} w_1$ bölüp hereketlendirijiniň toklarynyň deňlemesini alarys:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - (w_2 / w_1) \underline{I}_2 = \underline{I}_0 + \underline{I}_2'. \quad (2.18)$$

Aňlatmadaky $\underline{I}_2' = -(w_2 / w_1) \cdot \underline{I}_2$ toga rotoryň statoryň toguna getirilen togy diýilýär we oňa \underline{I}_1 toguň bir bölegi hökmünde seredilýär. (2.18) deňleme statoryň \underline{I}_1 toguna, Φ_0 umumy magnit akymyny döredýän \underline{I}_0 toguň we rotoryň togunyň döredýän magnit akymyny doly magnitsizlendirmek üçin sarp edilýän \underline{I}_2 toguň geometriki jemi hökmünde seretmäge mümkinçilik berýär. Rotoryň okuna birikdirilen işçi mehanizmiň hereketlendirijä görkezýän garşylyk momentiniň ýokarlanmagy bilen rotoryň togy we onuň döredýän magnitlendiriji güýji hem ýokarlanýar:

$$\underline{F}_2 = -\frac{3}{2} w_2 \underline{I}_2. \quad (2.19)$$

Ol bolsa öz gezeginde statoryň \underline{I}_1 togunyň we onuň magnitlendiriji güýjüniň ýokarlanmagyna getirýär:

$$\underline{F}_1 = -\frac{3}{2} w_1 \underline{I}_1. \quad (2.20)$$

2.1.7. Asinhron hereketlendirijiniň çalşyрма shemasy

Asinhron hereketlendirijiniň ekspluatasion iş düzgünlerini analiz etmek üçin, real hereketlendirijini hasaplamak ýoly arkaly özüne energiýa taýdan ekwiwalent bolan elektrik shema bilen çalşyrylýar we bu shema hereketlendirijiniň çalşyрма shemasy diýilýär. Şeýle shemany almak üçin edil güýç transformatorlarynyň birinji we ikinji sarymlarynyň arasyndaky magnit baglanyşygyny elektrik baglanyşygy bilen çalşyrylyşy ýaly, stator bilen rotoryň arasyndaky magnit baglanyşygyny hem elektrik baglanyşygy bilen çalşyrylýar. Emma transformatordan tapawutlylykda, hereketlendiriji işleýän wagtynda

onuň statorynyň we rotorynyň sarymlaryndaky elektrik hereketlendiriji güýçleriň hem-de olardaky toklaryň ýygylklarynyň biri-birinden tapawutlanýandyklary sebäpli, stator bilen rotoryň zynjyrlarynyň arasynda göni elektrik baglanyşygy berilmezden öň I_1 we I_{2s} toklaryň ýygylklaryny biri-birine deňlemek zerurlygy ýüze çykýar. Iş ýüzünde adatyça rotoryň togunyň ýygylgy statoryň togunyň ýygylgyna deňlenilýär. Onuň üçin bolsa, hereket edýän rotory hasaplama ýoly arkaly özüne energiýa taýdan ekwiwalent bolan hereket etmeýän rotor bilen çalşyrylýar.

Şeýle çalşyrmaklyk hereket edýän rotor bilen oňa ekwiwalent bolan hereket etmeýän rotor üçin hereketlendirijiniň setden kabul edýän elektromagnit kuwwatynyň, rotoryň I_2 togunyň we I_{2s} tok bilen E_{2s} elektrik hereketlendiriji güýjüň arasyndaky φ_2 fazalar tapawudynyň üýtgemeyän ululyklarynda ýerine ýetirilýär. Bu şertler ýerine ýetirilende hereketlendirijiniň magnitlendiriji güýji hem öz ululygy boýunça üýtgemän galýar. Hereket edýän rotoryň E_{2s} elektrik hereketlendiriji güýjüni hereket etmeýän rotoryň E_2 elektrik hereketlendiriji güýji bilen çalşyrmak üçin ony $1/s$ -e köpeltmek ýeterlikdir:

$$E_{2s} \cdot \frac{1}{s} = E_2 \cdot s \cdot \frac{1}{s} = E_2.$$

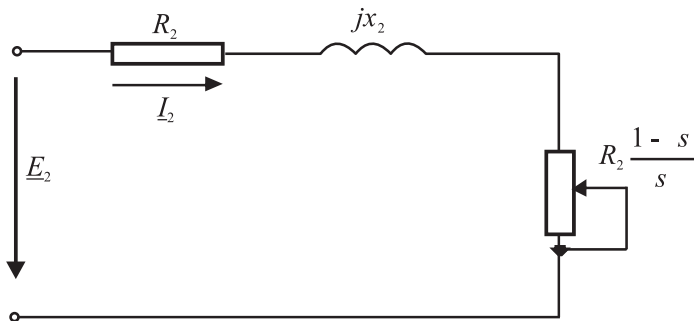
Real we oňa ekwiwalent bolan rotorlaryň toklarynyň ululyklaryny birmeňzeş saklamak üçin real rotoryň Z_2 kompleks garşylygyny $1/s$ -e köpeltmek ýeterlikdir. Onda rotoryň togy bu iki ýagdaý üçin hem aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2 \cdot s^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2 / s)^2 + X_2^2}}. \quad (2.21)$$

Bu aňlatmada R_2/s ululyk ekwiwalent rotoryň aktiw garşylygy bolup, ol aşakdaky görnüşde hem ýazylyp bilner:

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_2 \frac{1-s}{s}. \quad (2.22)$$

Çalşyрма shemada $R_2 \frac{1-s}{s}$ hereketlendirijiniň daşky ekwiwalent garşylygy hökmünde ulanylýar. Ekwiwalent rotoryň elektrik shemasy 2.14-nji suratda görkezilendir.



2.14-nji surat. Ekwiwalent rotoryň elektrik shemasy

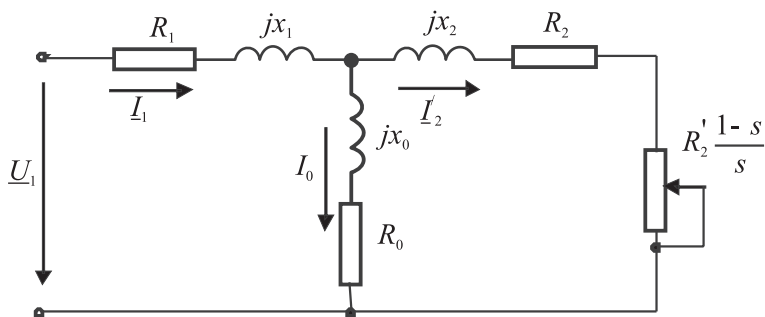
Hereketlendirijiniň hereket edýän rotory özüne ekwiwalent bolan hereketsiz rotor bilen çalşyrylandan soňra üçfazaly toguň asinhron hereketlendirijisi üçfazaly güýç transformatorndan hiç hili tapawutlanmaýar. Ýagny ekwiwalent rotor transformatoryň ikinji sarymynyň wezipesini ýerine ýetirýär. Şu sebäpli transformatoryň birinji we ikinji sarymlarynyň arasyndaky magnit baglanyşygyny elektrik baglanyşygy bilen çalşyrmak üçin alnan aňlatmalary asinhron hereketlendirijiniň çalşyрма shemasy üçin hem ulanyp bileris:

$$E'_2 = K \cdot E_2; \quad I'_2 = \frac{1}{K} \cdot I_2; \quad R'_2 = K^2 \cdot R_2; \quad X'_2 = K^2 \cdot X_2;$$

$$R'_2 \frac{1-s}{s} = K^2 \left(R_2 \frac{1-s}{s} \right), \quad (2.23)$$

bu aňlatmalarda K – asinhron hereketlendirijiniň transformasiýa koeffisiýenti.

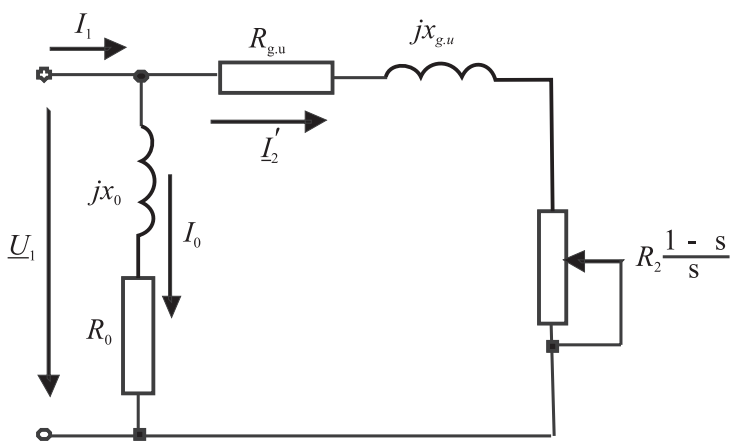
Stator bilen ekwiwalent rotoryň zynjyrlarynda hereketlendirijiniň baş magnit akymy tarapyndan indusirlenen E_1 we E_2 elektrik hereketlendiriji güýçleri özara deňlenenden soňra, bu zynjyrlaryň arasynda göni elektrik baglanyşygyny bermäge mümkinçilik döreýär. Asinhron hereketlendirijiniň stator bilen rotoryň arasyndaky magnit baglanyşygyny elektrik baglanyşygy bilen çalşyryp alnan shema 2.15-nji suratda görkezilendir.



2.15-nji surat. Asinhron hereketlendirijiniň doly çalşyрма shemasy

Bu shema asinhron hereketlendirijiniň doly çalşyрма shemasy diýilýär. Kähalatlarda hasaplamalary ýeňilleşdirmek maksady bilen, bu shemanyň ýerine 2.16-njy suratda görkezilen hereketlendirijiniň ýönekeýleşdirilen çalşyрма shemasy hem ulanylýar. Ýönekeýleşdirilen shemada:

$$X_{g,u} = X_1 + X_2; \quad R_{g,u} = R_1 + R_2'.$$



2.16-njy surat. Asinhron hereketlendirijiniň ýönekeýleşdirilen çalşyрма shemasy

Shemalaryň ikisinde hem hereketlendirijiniň mehaniki kuwwaty elektromagnit kuwwat arkaly aňladylýar:

$$P_{meh} = 3R_2' \frac{1-s}{s} \cdot (I_2')^2. \quad (2.24)$$

Hereketlendirijiniň statoryndaky we rotoryndaky elektrik ýitgileriniň jemi:

$$\Delta P_{El} = \Delta P_{st} + \Delta P_r = 3R_1 \cdot I_1^2 + 3R_2' \cdot (I_2')^2. \quad (2.25)$$

Hereketlendirijiniň magnit ýitgisi:

$$\Delta P_{EM} = 3R_0 \cdot I_0^2. \quad (2.26)$$

2.1.8. Aýlaýjy moment

Eger-de asinhron hereketlendirijiniň işçi mehanizmi herekete getirmek üçin sarp edýän P_{meh} mehaniki kuwwatyny rotoryň döredýän M elektromagnit momentiniň we ω rotoryň burç tizliginiň üsti bilen aňlatsak, ol aşakdaky görnüşli alýar:

$$P_{meh} = \omega \cdot M.$$

ω rotoryň burç tizligini, onuň n_2 aýlaw ýygylgy arkaly aňladyp alarys:

$$\omega = \frac{2\pi n_2}{60} = \frac{2\pi n_1}{60} \cdot (1-s);$$

$$P_{meh} = \frac{2\pi n_1}{60} \cdot (1-s) \cdot M. \quad (2.27)$$

Asinhron hereketlendirijiniň çalşyрма shemasyndan peýdalanyp P_{meh} mehaniki kuwwaty aşakdaky görnüşde hem ýazmak mümkin:

$$P_{meh} = 3R_2' \frac{1-s}{s} \cdot (I_2')^2. \quad (2.28)$$

(2.27) we (2.28) aňlatmalardan peýdalanyp, hereketlendirijiniň aýlaýjy elektromagnit momenti üçin aşakdaky aňlatmany ýazyp bileris:

$$M = \frac{3R_2' \frac{1-s}{s} (I_2')^2 \cdot 60}{2\pi n_1 \cdot (1-s)} = \frac{28,6 \cdot R_2'}{n_1 \cdot s} \cdot (I_2')^2. \quad (2.29)$$

Hereketlendirijiniň ýönekeýleşdirilen çalşyрма shemasyndan peýdalanyň, rotoryň

$$I_2' = \frac{U_{1F}}{\sqrt{(R_1 + R_2' / S)^2 + X_{g.u}^2}} \quad (2.30)$$

toguny (2.28) aňlatmada goýup, aýlaýjy moment üçin aňlatmany aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$M = \frac{28,6 \cdot U_{1f}^2 \cdot R_2' / S}{n_1 \left[(R_1 + R_2' / s)^2 + X_{g.u}^2 \right]}. \quad (2.31)$$

(2.31) aňlatmadan görnüşi ýaly, setiň U_{1f} faza naprýaženiýesinde hereketlendirijiniň M aýlaýjy momenti s typmanyň ululygyna baglydyr.

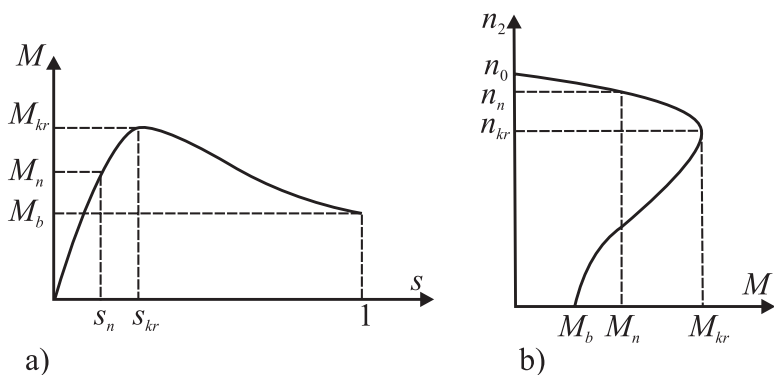
2.1.9. Hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamasy

Asinhron hereketlendirijiniň öz okuna birikdirilen işçi mehanizmi herekete getirip biljekdigini we ekspluatasiýa wagtynda mehanizm tarapyndan döredilýän M_{st} statiki garşylyk moment haýsy aralykda üýtgände onuň durnukly iş düzgüni üpjün edip biljekdigini görkezýän $M = f(s)$ ýa-da $M = f(n_2)$ başlanyşyga hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamasy diýilýär. (2.31) aňlatmanyň esasynda s -iň ululygyny 0-dan 1-e çenli erkin üýtgedip gurlan $M = f(s)$ baglanyşygy 2.17-nji a suratda, $M = f(n_2)$ baglanyşygy bolsa 2.17-nji b suratda görkezilendir.

Asinhron hereketlendiriji işe goýberilen pursatynda, ýagny rotoryň heniz herekete gelip ýetişmedik ($s = 1$) wagtynda, onuň döredýän başlangyç momenti aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

$$M_{baş} = \frac{28,6}{n_1} \cdot \frac{U_{1f}^2 \cdot R_2'}{\left[(R_1 + R_2')^2 + X_{g.u}^2 \right]}. \quad (2.32)$$

2.17-nji a suratda görkezilen mehaniki häsiýetnamadan görnüşi ýaly, s typma koeffisiýenti 1-den 0-a çenli azalanda hereketlendirijiniň döredýän aýlaýjy momenti ýokarlanýar we s -iň belli bir ululygynyda maksimuma barýar.



2.17-nji surat.

Asinhron hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamasy

Hereketlendirijiniň döredip bilýän in uly momentine onuň kritiki momenti diýilýär. Kritiki momente degişli bolan s_{kr} typma bolsa kritiki typma koeffisiýenti diýilýär. s -iň s_{kr} -den aňryk kemelmegi M aýlaýjy momentiniň hem peselmesine getirýär we $s = 0$ bolanda $M = 0$ bolýar. s_{kr} kritiki typmany kesgitlemek üçin (2.31) aňlatmany s -e görä differensirleýäris we alnan aňlatmany nola deňleýäris:

$$\begin{aligned} \frac{dM}{ds} &= \left(\frac{28,6}{n_1} \cdot \frac{U_1^2 \cdot R_2'}{s \left[(R_1 + R_2' / s)^2 + X_{g,u}^2 \right]} \right)' = \\ &= \frac{\left(28,6 \cdot U_1^2 R_2' \right)' \cdot s \cdot n_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{g,u}^2 \right] - \left(s \cdot n_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{g,u}^2 \right] \right)' \cdot 28,6 U_1^2 R_2'}{\left\{ s \cdot n_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{g,u}^2 \right] \right\}^2} = \\ &= \frac{0 \cdot s \cdot n_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{g,u}^2 \right] - \left(s \cdot n_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{g,u}^2 \right] \right)' \cdot 28,6 \cdot U_1^2 R_2'}{\left\{ s \cdot n_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{g,u}^2 \right] \right\}^2}. \end{aligned}$$

$$\frac{dM}{ds} = 0 \text{ deň bolmagy üçin:}$$

$$\begin{aligned}
& \left(s \cdot n_1 \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{g,u}^2 \right] \right)' = 0 \text{ bolmagy ýeterlikdir.} \\
& \left(s \cdot n_1 \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{g,u}^2 \right] \right)' = \\
& = \left(s \cdot n_1 R_1^2 + 2 \cdot s \cdot n_1 \cdot R_1 \cdot \frac{R'_2}{s} + s \cdot n_1 \cdot \left(\frac{R'_2}{s} \right)^2 + s \cdot n_1 \cdot X_{g,u}^2 \right)' = \\
& = n_1 \cdot R_1^2 - \frac{n_1 (R'_2)^2}{s^2} + n_1 X_{g,u}^2 = 0.
\end{aligned}$$

Soňra bu ýerden s_{kr} -ni kesgitläris we alarys:

$$\begin{aligned}
n_1 (R_1^2 + X_{g,u}^2) &= n_1 \frac{(R'_2)^2}{s^2}; \\
s_{kr} &= \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{g,u}^2}}. \tag{2.33}
\end{aligned}$$

Asinhron hereketlendirijiniň $X_{g,u}$ jemleýji (gysga utgaşma) reaktiw garşylygynyň statoryň R_1 aktiw garşylygyndan has uludygyny ($X_{g,u} \gg R_1$) nazarda tutup (2.33) aňlatmany aşakdaky görnüşde hem ýazyp bileris:

$$s_{kr} = \frac{R'_2}{X_{g,u}}. \tag{2.34}$$

s_{kr} -niň ululygyny (2.31) aňlatma goýup, hereketlendirijiniň M_{kr} kritiki momenti üçin aňlatma alarys:

$$M_{kr} = \frac{14,3}{n_1} \cdot \frac{U_{1f}^2 \cdot R'_2 / s}{\left[(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{g,u}^2}) \right]} \approx \frac{14,23}{n_1} \cdot \frac{U_{1f}^2}{X_{g,u}}. \tag{2.35}$$

Bu aňlatmadan görnüşi ýaly, M_{kr} momentiň ululygy rotoryň R_2 garşylygyna bagly däldir. Emma R_2 garşylygyň s -iň ululygyna täsir

edýanligi sebäpli, ol $M = f(s)$ baglanyşygyň häsiýetine täsir edýär. Hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamasynyň (2.17-nji a surat) “oa” bölegine onuň durnukly bölegi, “ab” bölegine bolsa durnuksyz bölegi diýilýär.

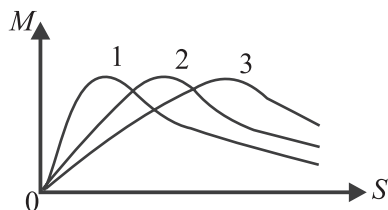
Mehaniki häsiýetnamanyň durnukly böleginde hereketlendirijiniň okuna birikdirilen mehanizmiň döredýän garşylyk momentiniň ösmegi bilen, onuň aýlaýjy momenti öz-özünden ýokarlanýar, ýagny hereketlendiriji durnukly işleýär. Häsiýetnamanyň durnuksyz böleginde bolsa, garşylyk momentiniň ösmegi bilen, onuň aýlaýjy momenti kiçelýär we ol hereketlendirijiniň hereketiniň örän çalt saklanmagyna getirýär. Kontakt halkaly asinhron hereketlendirijiniň rotorynyň zynjyryna s_{goy} işe goýberiji rezistor birikdirilende, hereketlendirijiniň aýlaýjy momenti aşadaky görnüşde kesgitlenýär:

$$M = \frac{28,6 \cdot U_{1f}^2 \frac{R'_2 + R'_{gos}}{s}}{n_1 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2 + R'_{gos}}{s} \right)^2 + X_{g.u}^2 \right]}. \quad (2.36)$$

Bu ýagdaý üçin s_{kr} aşadaky ýaly hasaplanýar:

$$s_{kr} = \frac{R'_2 + R'_{gos}}{X_{g.u}}. \quad (2.37)$$

Hereketlendirijä berilýän U_{1f} nominal naprýaženiýede rotoryň zynjyryna hiç hili reostat birikdirilmedik ýagdaýynda alnan $M = f(s)$ baglanyşyga hereketlendirijiniň tebigy mehaniki häsiýetnamasy diýilýär.



2.18-nji surat. Asinhron hereketlendirijiniň tebigy (1) we emeli (2; 3) mehaniki häsiýetnamalary

Rotoryň zynjyryna goşmaça garşylyk birikdirilip alnan häsiýetnamalara hereketlendirijiniň emeli mehaniki häsiýetnamasy diýilýär. 2.18-nji suratda asinhron hereketlendirijiniň tebigy (1) we emeli (2; 3) häsiýetnamalary görkezilendir.

2.1.10. Asinhron hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamalaryny onuň pasport ululyklary boýunça gurmak

Asinhron hereketlendirijiler üçin ýörite taýýarlanylýan tehniki kataloglarda hereketlendirijiniň P_{nom} nominal kuwwaty we n_2 -nominal aýlaw ýygylgynyň ululyklary bilen bilelikde onuň M_{goy} goýberiş we M_{kr} kritiki momentleriniň M_{nom} nominal momentine bolan gatnaşyklary berilýär:

$$\frac{M_{goy}}{M_{nom}} = \delta ; \quad \frac{M_{kr}}{M_{nom}} = \lambda. \quad (2.38)$$

M_{goy} we M_{kr} momentleriň ululyklaryny kesgitlemek üçin, ilki bilen, hereketlendirijiniň M_{nom} nominal momenti hasaplanylýar. Nominal moment P_{nom} nominal kuwwatyň rotoryň n_{nom} nominal aýlaw ýygylgyna gatnaşygy bilen aşadaky görnüşde kesgitlenýär:

$$M_{nom} = 9550 \cdot \frac{P_{nom}}{n_{nom}}.$$

Hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamasyny gurmak üçin zerur bolan s_{kr} kritiki typmany kesgitlemek üçin (2.31) we (2.35) aňlatmalardan peýdalanylýar we $\frac{R'_2}{s_{kr}} = \sqrt{R_1^2 + X_{g.u}^2}$ deňlikden peýdalanyň alarys:

$$\begin{aligned} \frac{M_{nom}}{M_{kr}} &= \frac{28,6 \cdot U_1^2 \frac{R'_2}{s_{nom}}}{n_1 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_{nom}} \right)^2 + X_{g.u}^2 \right]} = \\ &= \frac{14,3 \cdot U_1^2}{n_1 \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{g.u}^2} \right)} = \\ &= \frac{2 \cdot R'_2 \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{g.u}^2} \right)}{s_{nom} \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s_{nom}} \right)^2 + X_{g.u}^2 \right]} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{2 \cdot R'_2 \cdot \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_{nom}} \right)}{s_{nom} \cdot \left[R_1^2 + 2 \frac{R'_2 \cdot R_1}{s_{nom}} + \left(\frac{R'_2}{s_{nom}} \right)^2 + X_{g,u}^2 \right]} = \\
& \frac{2 \cdot R'_2 \cdot \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_{nom}} \right)}{s_{nom} \cdot \left[R_1^2 + X_{g,u}^2 + \left(\frac{R'_2}{s_{nom}} \right)^2 + 2 \frac{R'_2 \cdot R_1}{s_{nom}} \right]} = \\
& \frac{2 \cdot R'_2 \cdot \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_{nom}} \right)}{s_{nom} \cdot \left[\left(\frac{R'_2}{s_{kr}} \right)^2 + \left(\frac{R'_2}{s_{nom}} \right)^2 + 2 \frac{R_1 / R'_2}{s_{nom}} \right]} = \\
& \frac{2 \frac{(R'_2)^2}{s_{kr}} \cdot \left(1 + \frac{R_1 \cdot s_{kr}}{R'_2} \right)}{\left(\frac{R'_2}{s_{kr}} \right)^2 \cdot s_{nom} + \frac{(R'_2)^2}{s_{nom}} + 2 \cdot R_1 \cdot R'_2} = \\
& \frac{2 \frac{(R'_2)^2}{s_{kr}} \cdot \left(1 + \frac{R_1 \cdot s_{kr}}{R'_2} \right)}{\frac{(R'_2)^2}{s_{kr}} \cdot \left(\frac{s_{nom}}{s_{kr}} + \frac{s_{kr}}{s_{nom}} + 2 \frac{R_1}{R'_2} \cdot s_{kr} \right)} = \\
& \frac{2 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R'_2} \cdot s_{kr} \right)}{\frac{s_{nom}}{s_{kr}} + \frac{s_{kr}}{s_{nom}} + 2 \frac{R_1}{R'_2} \cdot s_k} ;
\end{aligned}$$

Hereketlendirijilerde statoryň R_1 aktiw garşylygynyň jemleýji $X_{g.u}$ reaktiw garşylykdan has kiçiligi sebäpli ($R_1 \ll X_{g.u}$), ol hasaba alynmadyk ýagdaýynda aňlatma aşadaky görnüşi alýar:

$$\frac{M}{M_{kr}} = \frac{2}{\frac{s_{kr}}{s} + \frac{s}{s_{kr}}}. \quad (2.39)$$

Bu aňlatma *Klossuň* formulasy diýilýär.

(2.39) deňlemäni M_{nom} nominal moment we s_{nom} nominal typmaklyk üçin ýazyp we ony s_{kr} -ä görä çözüp, aşadaky aňlatmany alarys:

$$\begin{aligned} \frac{M_{nom}}{M_{kr}} &= \frac{2}{\frac{s_{nom}}{s_{kr}} + \frac{s_{kr}}{s_{nom}}} = \frac{1}{\lambda} \rightarrow \frac{\frac{s_{nom}}{s_{kr}} + \frac{s_{kr}}{s_{nom}}}{2} = \lambda \rightarrow \\ &\rightarrow 2\lambda = \frac{s_{nom}}{s_{kr}} + \frac{s_{kr}}{s_{nom}} = \frac{s_{nom}^2 + s_{kr}^2}{s_{kr} \cdot s_{nom}} \rightarrow \\ &\rightarrow s_{kr}^2 + s_{nom}^2 = 2\lambda \cdot s_{nom} \cdot s_{kr} \rightarrow \\ &\rightarrow s_{kr}^2 - 2\lambda \cdot s_{nom} \cdot s_{kr} + s_{nom}^2 = 0. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_{kr} = X_1 &= \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-2\lambda \cdot s_{nom} + \sqrt{4\lambda^2 \cdot s_{nom}^2 - 4 \cdot s_{nom}^2}}{2} = \\ &= \frac{-2\lambda \cdot s_{nom} + 2 \cdot s_{nom} \sqrt{\lambda^2 - 1}}{2} = \frac{2 \cdot s_{nom} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})}{2} = \\ &= s_{nom} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}). \end{aligned}$$

$$s_{kr} = s_{nom} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}). \quad (2.40)$$

Soňra (2.39) deňlemäni ulanyp, s typmanyň islendik ululygyna degişli M momenti kesgitläp we $M = f(s)$ baglanyşygy gurup bileris. Alnan $M = f(s)$ baglanyşyk hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetlerine

baha bermekde ulanylýar. Goýberiş M_{goy} moment hereketlendirijiniň öz okuna birikdirilen işçi mehanizmi herekete getirip biljekdigini ýa-da bilmejekdigini görkezýär. İşçi mehanizmi herekete getirmek üçin hökmany suratda hereketlendirijiniň M_{goy} başlangyç momenti mehanizmiň döredýän goýberiş $M_{st,goy}$ momentine deň ýa-da ondan uly bolmalydyr ($M_{goy} \geq M_{st,goy}$). Kritiki moment hereketlendirijiniň gysga wagtlaýyn öz nominal momentinden artyk näçe garşylyk momenti ýeňňip biljekdigini görkezýär.

Hereketlendirijiniň durnukly işlemegi üçin mydama işçi mehanizminiň wagtlaýyn döredýän $M_{st,max}$ maksimal garşylyk momenti hereketlendirijiniň M_{kr} kritiki momentinden kiçi ýa-da deň bolmalydyr ($M_{st,max} \leq M_{kr}$). Eger-de $M_{st,max}$ moment M_{kr} kritiki momentden uly bolsa ($M_{st,max} > M_{kr}$), onda hereketlendiriji $M = f(s)$ baglanyşygyň durnuksyz bölegine geçýär we öz aýlaw hereketini bes edýär. Adaty asinhron hereketlendirijiler üçin: $\lambda = 1,6 \div 2,5$ töwereginde bolýar. Hereketlendirijiniň M aýlaýjy momentiniň ululygy hereketlendirijä goýlan $U_{1,f}$ naprýaženiýäniň kwadratyna baglydyr (2.3.1-nji aňlatma seret). Şonuň üçin $U_{1,f}$ naprýaženiýäniň ululygynyň üýtgemegi onuň iş düzgünlerine örän ýaramaz täsir edýär. Kähalatlarda setiň naprýaženiýesiniň duýdamsyz peselmegi hereketlendirijiniň M_{goy} we M_{kr} momentleriniň örän peselmegine getirýär we netijede, işe goýberilen mehanizmler üçin $M_{goy} \geq M_{st,goy}$ işläp duran mehanizmler üçin bolsa $M_{st,max} \leq M_{kr}$ şertleriň ýerine ýetirilmezligine getirýär. Ikinji tarapdan $U_{1,f}$ naprýaženiýäniň peselmegi nominal iş düzgüninde işläp duran hereketlendirijide artykmaç elektrik ýitgileriniň döremegine sebäp bolýar. $U_{1,f}$ naprýaženiýäniň özüniň nominalyndan ýokary geçmegi hereketlendirijiniň Q reaktiw kuwwatynyň ösmegine getirýär. Şonuň üçin döwlet standarty tarapyndan asinhron elektrik hereketlendirijilere berilýän naprýaženiýäniň öz nominal naprýaženiýesinden diňe $\pm 5\%$ töweregi üýtgemegine ýol berilýär.

2.1.11. Asinhron hereketlendirijiniň energetiki görkezijileri

Asinhron hereketlendirijileriň energetiki görkezijilerine, onuň η peýdaly täsir koeffisiýenti we $\cos \varphi$ kuwwat koeffisiýenti degişlidir. Hereketlendirijiniň peýdaly täsir koeffisiýenti işçi mehanizme here-

ketlendiriji tarapyndan berilýän P_2 mehaniki kuwwatyň, hereketlendirijiniň setden kabul edýän P_1 aktiw kuwwatyna bolan gatnaşygy görnüşinde kesgitlenýär:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (2.41)$$

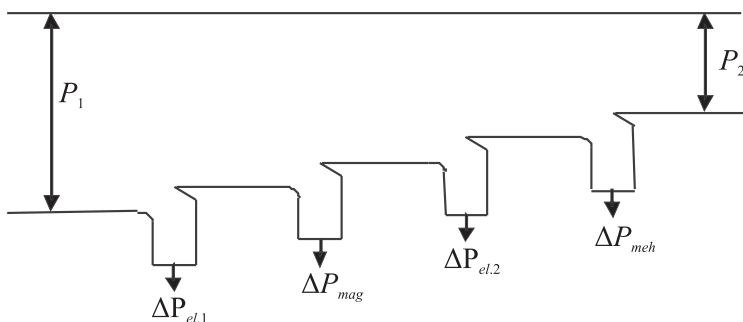
P_1 kuwwat hereketlendirijiniň statorynyň we rotorynyň sarylaryndaky $(\Delta P_{el.1}; \Delta P_{el.2})$ elektrik ýitgilerini, magnitgeçirijisindäki ΔP_{mag} magnit ýitgilerini, howanyň we podşipnikleriň rotoryň hereketine garşy döredýän sürtülme güýçlerini ýeňmek üçin sarp edilýän ΔP_{meh} mehaniki ýitgileri hem-de hereketlendiriji tarapyndan işçi mehanizme berilýän P_2 kuwwaty deňagramlaşdyrýar:

$$P_1 = \Delta P_{el.1} + \Delta P_{el.2} + \Delta P_{mag} + \Delta P_{meh} + P_2. \quad (2.42)$$

Bu deňlemä asinhron hereketlendirijiniň aktiw kuwwatlarynyň deňlemesi diýilýär. Hereketlendirijiniň 2.42-nji deňlemäniň esasynda gurlan energetiki diagrammasy 2.19-njy suratda görkezilendir. Hereketlendirijiniň peýdaly täsir koeffisiýenti üçin aňlatmany ΔP kuwwat ýitgileriniň we β ýük koeffisiýentiniň ($\beta = P_2 / P_{nom}$) üsti arkaly aşakdaky görnüşde ýazylýar:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{\beta P_{nom}}{\beta P_{nom} + \Delta P_{mag} + \Delta P_{meh} + \beta^2 \Delta P_{el}}. \quad (2.43)$$

Bu aňlatmada: $\Delta P_{el} = \Delta P_{el.1} + \Delta P_{el.2}$ -de statordaky we rotordaky elektrik ýitgileriniň jemidir.



2.19-njy surat. Asinhron hereketlendirijiniň energetiki diagrammasy

Hereketlendirijiniň kuwwat koeffisiýenti aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

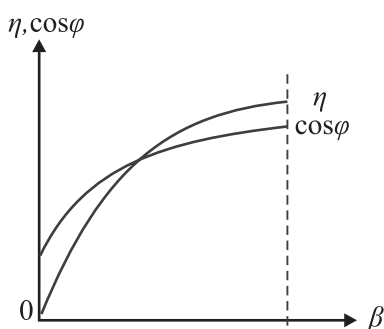
$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q}{P_1}\right)^2}}. \quad (2.44)$$

Bu aňlatmadan görnüşi ýaly, P_1 aktiw kuwwatda hereketlendirijiniň $\cos \varphi$ kuwwat koeffisiýenti, onuň setden kabul edýän Q reaktiw kuwwaty bilen kesgitlenýär. Asinhron hereketlendirijiniň çalşyрма she-masyny ulanyp, Q reaktiw kuwwaty aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\begin{aligned} Q &= 3X_1 I_1^2 + 3X_0 I_0^2 + 3X_2' (I_2')^2 \approx 3(X_1 + X_0) \cdot I_0^2 + \\ &+ 3 \cdot (X_1 + X_2') \cdot (I_2')^2 = Q_{hem} + Q_{üýt}. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Hereketlendirijiniň reaktiw kuwwatynyň Q_{hem} hemişelik bölegi-niň I_0 boş iş togy bilen kesgitlenýändigini sebäpli, ol hemişelik galýar. Emma onuň $Q_{üýt}$ üýtgeýän böleginiň I_2 tok bilen kesgitlenýändigini se-bäpli, ol ýüke görä üýtgeýär.

Hereketlendiriji boş iş düzgüninden nominal iş düzgünine geçen wagtynda Q reaktiw kuwwatyň ululygy hereketlendirijiniň P_1 kuwwa-tyna görä takmynan iki esse töweregi üýtgeýär. Şonuň üçin asinhron hereketlendiriji özüniň nominal kuwwatynda işlemese, onuň reaktiw



2.20-nji surat. Asinhron hereketlendirijiniň η we $\cos \varphi$ koeffisiýentleriniň β -a bolan baglanyşygy

kuwwatyň ululygy ýokarlanýar. Bu bolsa ykdysady tarapdan uly ähmiýeti bolan $\cos \varphi$ kuwwat koeffisiýentiniň peselmegine getirýär. Hereketlendirijiniň η peýdaly täsir koeffisiýentiniň we $\cos \varphi$ kuwwat koeffisiýentiniň β ýük koeffisiýentine görä üýtgeýişleri 2.20-nji suratda görkezilendir.

Asinhron hereketlendirijiniň kuwwat koeffisiýentini ýokarlandyrmak üçin, onuň statorynyň fazalaryna parallel kondensator birikdirilýär ýa-da senagat kärhanalarynda ýörite sin-hron kompensator ulanylýar.

2.1.12. Asinhron hereketlendirijiniň aýlaw ýgylygyny sazlamak hem-de onuň hereketiniň ugruny üýtgetmek (rewersirmek)

Asinhron hereketlendirijiler köplenç ýagdaýlarda aýlaw ýgylygyny sazlamak zerur bolmadyk mehanizmleri herekete getirmek üçin ulanylýar. Soňky wagtlarda aýlaw ýgylygy sazlamak gerek bolan ýagdaýynda hemişelik toguň hereketlendirijileri bilen bir hatarda asinhron hereketlendirijiler hem peýdalanylýar. Asinhron hereketlendirijileriň aýlaw ýgylygyny sazlamak üçin aşakdaky usullar ulanylýar:

1) Hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäniň ululygyny üýtgetmek.

2) Statoryň polýus jübütleriniň sanyny üýtgetmek.

3) Hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäniň ýgylygyny üýtgetmek.

4) Kontakt halkaly rotoryň (faza rotoryň) zynjyryna goşmaça garşylyk birikdirmek.

2.1.12.1. Asinhron hereketlendirijiniň aýlaw ýgylygyny naprýaženiýesini üýtgetmek arkaly sazlamak

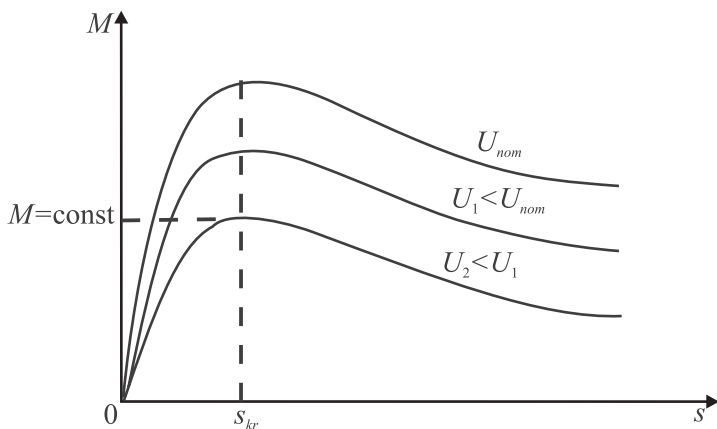
Asinhron hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäniň ululygy üýtgände, hereketlendirijiniň maksimal momenti naprýaženiýäniň kwadratyna bagly üýtgeýär.

$$M_n = \frac{14,3}{n_0} \cdot \frac{U_{1.f}^2}{\left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{g.u}^2} \right]} \approx \frac{14,3}{n_0} \cdot \frac{U_{1.f}^2}{X_{g.u}}; \quad (R_1 \ll X_{g.u}). \quad (2.46)$$

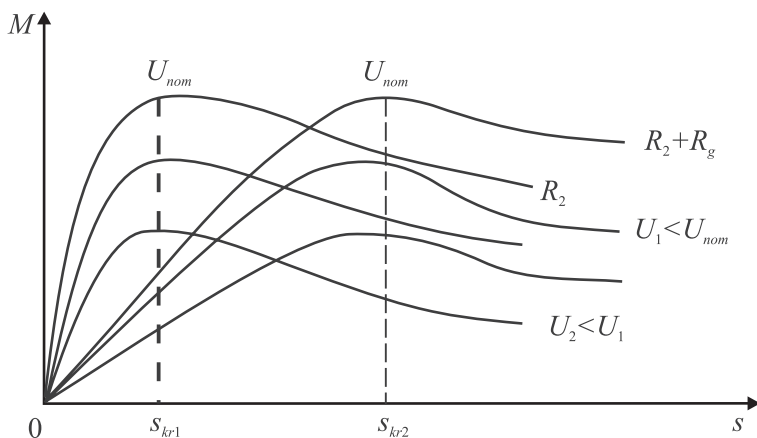
Emma naprýaženiýäniň üýtgemegi hereketlendirijiniň maksimal momentine degişli s_{kr} kritiki typma we hereketlendirijiniň sinhron aýlaw ýgylygyna täsir etmeýär ($f = \text{const}$; $p = \text{const}$). Önümçilikde hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäni nominaldan pes tarapa üýtgedilýär. Pes naprýaženiýede hereketlendirijiniň döredip biljek maksimal momentini, naprýaženiýeleri arkaly aşakdaky görnüşde aňladylýar.

$$M_{kr(pes)} = M_{kr(nom)} \cdot \left(\frac{U_{pes}}{U_{nom}} \right)^2, \quad (2.47)$$

bu aňlatmada $M_{kr(pes)}$ – pes naprýaženiýä degişli maksimal moment, $M_{kr(nom)}$ – nominal naprýaženiýä degişli maksimal moment. Hereketlendirijä berilýän dürli ululykdaky naprýaženiýeler üçin gurlan mehaniki häsiýetnamalary 2.21-nji suratda görkezilendir.



2.21-nji surat. Hereketlendirijiniň dürli naprýaženiýelerdäki mehaniki häsiýetnamalary



2.22-nji surat. Hereketlendirijiniň naprýaženiýesiniň dürli ululyklarynda rotora goşmaça garşylyk birikdirilip alnan mehaniki häsiýetnamalary

Napryáženíye boýunça hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny sazlamaklyk onuň okuna goýlan statiki garşylyk momentiniň hemişelik ($M_{st} = \text{const}$) ululygynda $0 < s < s_{kr}$ aralykda mümkindir (2.21-nji surat). Aýlaw ýygylgynyň sazlanlyş çäginí gñeltmek üçin rotoryň zynjyryna R_{gos} goşmaça garşylyk birikdirilýär. Goşmaça garşylyk bitikdirilen ýagdaýynda maksimal momente degişli s_{kr} kritiki typma ýokarlanýar.

$$s_{kr} = \frac{R'_2 + R_{gos}}{\sqrt{R_1^2 + X_{g.u}^2}}. \quad (2.48)$$

Dürli ululykdaky napryáženíyelerde rotora R_{gos} goşmaça garşylyk birikdirilip gurlan mehaniki häsiýetnamalary 2.22-nji suratda görkezilendir.

Asinhron hereketlendirijilerde s_{kr} kritiki typma koeffisiýentiniň ýokarlanmagy bilen rotoryň zynjyryndaky tok hem ýokarlanýar. Netijede, rotorda ýüze çykýan energiýa ýitgileriniň mukdarynyň toguň kwadratyna görä ösýändigini sebäpli, hereketlendirijide energiýanyň goşmaça ýitgileri ýüze çykýar.

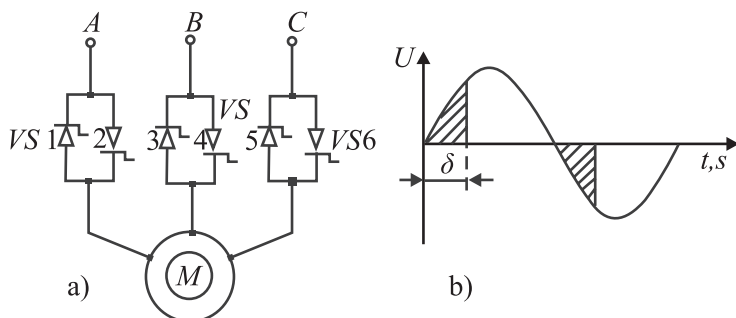
$$P_{el.2} = 3 \cdot R_2 \cdot I_2^2. \quad (2.49)$$

Hereketlendirijiniň s_{kr} kritiki typma koeffisiýentini ýokarlandyrmak arkaly aýlaw ýygylgyny sazlamak usuly kontakt halkaly hereketlendirijilerde ulanylýar. Bu hereketlendirijilerde rotorda bölünip çykýan energiýanyň ýitgileriniň esasy bölegi hereketlendirijiden daşarda ýerleşdirilen R_{gos} goşmaça garşylykda ýüze çykýar we ýylylyk daşky gurşawa ýaýraýar. Aýlaw ýygylgyny şeýle usul bilen sazlanýanda ýüze çykýan energiýanyň ýitgileriniň mukdarynyň ýokarlanmagy hereketlendirijiniň peýdaly täsir koeffisiýentiniň peselmegine getirýär. Şu sebäpli, seredilýän usul pes kuwwatly kontakt halkaly elektrik hereketlendirijilerde peýdalanylýar. Hereketlendirijä berilýän napryáženíýäniň ululygyny üýtgetmek üçin aşakdaky usullar ulanylýar:

- 1) Statoryň zynjyryna goşmaça garşylyk birikdirmek usuly.
- 2) Awtotransformatorly sazlamak usuly.
- 3) Tiristorly sazlamak usuly.

Tiristorly sazlamak usulynda hereketlendirijä berilýän üýtgeýän napryáženíýäniň ýarym periodynyň bir bölegi tiristorlaryň kömegi ar-

kaly hereketlendirijä geçirilmän saklanylýar (2.23-nji b surat). Bu bol-sa hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäniň täsir ululygyny peseldýär. Onuň üçin A, B, C fazalara aýratynlykda hereketlendirijiniň öň ýanyn-dan parallel-garşylyklaýyn tiristorlar birikdirilýär (2.23-nji a surat).



2.23-nji surat. Asinhron hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäniň tiristorly sazlanlyş shemasy (a) we onuň grafigi (b)

Naprýaženiýäni sazlamak üçin VS tiristorlar aşakdaky tertipde işleýärler:

- 1) VS – 2; VS3; VS5.
- 2) VS – 4; VD1; VS5.
- 3) VS – 6; VS1; VS3.

Hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäniň täsir ululygy δ burçuň ululygy bilen sazlanlyýar. Bu usulda hereketlendirijide ýokary ýyg-lykly garmonikalaryň döremegi mümkindir.

2.1.12.2. Asinhron hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny polýus jübütleriniň sanyny üýtgetmek arkaly sazlamak

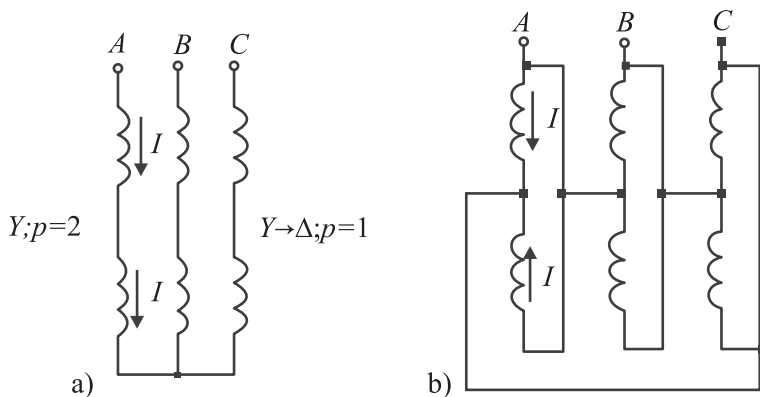
Setiň naprýaženiýesiniň ýygylgynyň hemişelik ýagdaýynda asinhron elektrik hereketlendirijileriň sinhron aýlaw ýygylgy polýus jübütleriň sanyna baglydyr:

$$n = n_0 \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s). \quad (2.50)$$

Polýus jübütleriň ($p = 1; 2; 3 \dots$) sanynyň üýtgemegi hereketlen-dirijileriň aýlaw ýygylgynyň basgançaklaýyn üýtgemegine getirýär.

Bu usuly diňe gysga birleşdirilen rotorly asinhron hereketlendirijileriň aýlaw ýygylgyny sazlamak üçin ulanylýar. Kontakt halkaly asinhron hereketlendirijilerde statoryň polýus jübütleriniň sany üýtgedilende onuň rotorynyň polýus jübütleriniň sanyny hem üýtgetmek zerurlygy ýüze çykýar. Bu bolsa önümçilik şertlerinde mümkin däldir. Ikitizlikli hereketlendirijilerde polýus jübütleriň sanyny üýtgetmek üçin statoryň faza sarymlary iki sany birmeňzeş bölekden ybarat edip saralýar. Aýlaw ýygylgy üýtgetmek üçin sarymlaryň haýsy hem bosa bir bölegindäki toguň ugruny üýtgetmek ýeterlikdir. Şu maksat bilen önümçilikde aşakdaky elektrik shemalar peýdalanylýar.

Statoryň sarymlarynyň birikdirilişini „Y“ ýyldyzdan „Δ“ üçburçluk görnüşe geçirmek usuly (2.24-nji surat).



2.24-nji surat. Statoryň sarymlarynyň „Y“-dan „Δ“-a geçiriliş shemasy

Statoryň sarymlarynyň birikdiriliş usulyny „Y“ ýyldyzdan ($p = 2$) „Δ“ üçburçluk ($p = 1$) görnüşe geçirilen ýagdaýynda hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamalarynyň umumy görnüşini almak üçin olaryň rug-sat berilýän aktiw kuwwatlaruny hasaplalyň. Şeýle-de hasaplamalarda statoryň sarymlaryna ýa-da onuň böleklerine nominal liniýa ýa-da faza naprýaženiýe düşende olaryň üstünden geçýän toklar we kuwwat koeffisiýentler nominal ululyklaryna deň diýip kabul edeliň (2.25-nji surat).

Aktiw kuwwatlar:

$$p = 2 \rightarrow P_Y = 3 \cdot \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom};$$

$$p = 1 \rightarrow P_\Delta = 3 \cdot U_L \cdot 2I_1 \cdot \cos \varphi_{nom} = 6U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}.$$

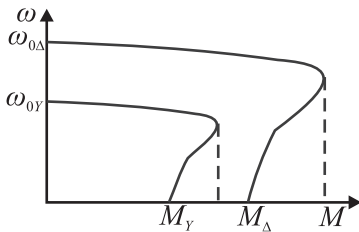
Aýlaýjy momentler:

$$M_Y = \frac{P_Y}{\omega/2} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}}{\omega/2} = \frac{3 \cdot U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}}{\omega};$$

$$M_\Delta = \frac{P_\Delta}{\omega} = \frac{6 \cdot U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}}{\omega}.$$

Momentleriň gatnaşygy: $\frac{M_\Delta}{M_Y} = \frac{6}{3} = 2.$

Seredilýän ýagdaý üçin hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamalary 2.25-nji suratda görkezilendir.



2.25-nji surat. Statoryň sarymlary „Y“ we „Δ“ birikdirilen ýagdaýlary üçin mehaniki häsiýetnamalar

2.25-nji suratdan görnüşi ýaly, statoryň faza sarymlarynyň birikdiriliş usuly „Y“ ýyldyzdan „Δ“ üçburçluk görnüşe geçende aýlaw ýygyllyklar we maksimal momentleri biri-birinden iki esse tapawutlanýarlar. Szalanylyşyň şeýle usuly hereket deňlemesi $M = A + Bn^2$ bolan wentilýasion häsiýetli işçi mehanizmleri herekete getirýän asinhron hereketlendirijilerde ulanylýar.

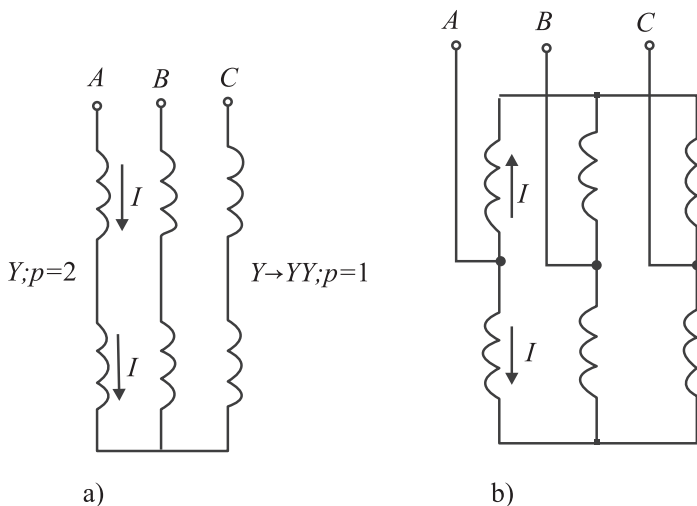
Statoryň sarymlarynyň birikdirilişini birgat ýyldyzdan „Y“, ikigat ýyldyz „YY“ görnüşe geçirmek usuly (2.26-njy surat).

Statoryň sarymlarynyň birikdirilişi birgat ýyldyzdan „Y“ ikigat ýyldyza „YY“ geçirilende mehaniki häsiýetnamalarynyň umumy görnüşini almak üçin olaryň aktiw kuwwatlaryna degişli hasaplamalary geçireliň, (2.26-njy surat).

Aktiw kuwwatlar:

$$P = 2 \rightarrow P_Y = 3 \cdot \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom};$$

$$P = 1 \rightarrow P_{YY} = 3 \cdot \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom} = 3,46 \cdot U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}.$$



2.26-njy surat. Statoryň sarymlary „Y“-dan „YY“-a geçirmegiň shemalary

Kuwwatlaryň gatnaşygy: $\frac{P_{YY}}{P_Y} = \frac{3,46}{\sqrt{3}} \approx 2$.

Aýlaýjy momentler:

$$M_Y = \frac{P_Y}{\omega/2} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot 2 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}}{\omega} = \frac{3,46 \cdot U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}}{\omega};$$

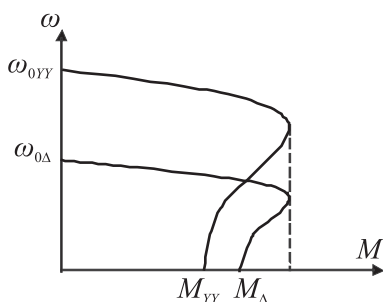
$$M_{YY} = \frac{P_{YY}}{\omega} = \frac{3,46 \cdot U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}}{\omega}.$$

Momentleriň gatnaşygy: $\frac{M_{\Delta}}{M_Y} = 1$.

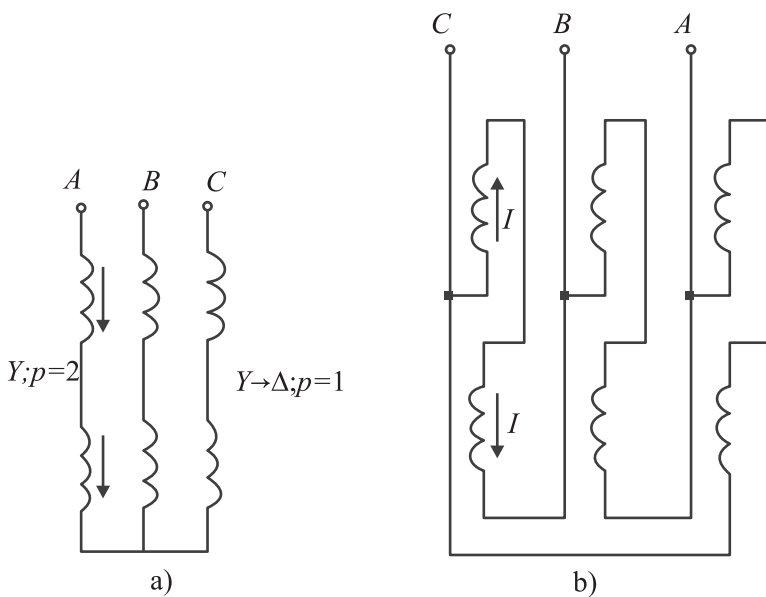
Aýlaw ýygylgy sazlamagyň bu usuly üçin mehaniki häsiýetnama 2.27-nji suratda görkezilendir.

Statoryň sarymlarynyň birikdirilişini „Y“-ýyldyzdan „Δ“-üçburçluk görnüşe geçirmegiň ikinji usuly (2.28-nji surat).

Statoryň faza sarymlarynyň birikdirilişini „Y“-ýyldyzdan „Δ“-üçburçluk görnüşe geçilen ýagdaýy üçin mehaniki häsiýetnamalaryň umumy görnüşlerini alalyň.



2.27-nji surat. Statoryň sarymlary „Y“ we „YY“ – birikdirilen ýagdaýlary üçin mehaniki häsiýetnamalar



2.28-nji surat. Statoryň sarymlarynyň „Y“-dan „Δ“-a geçirmek üçin shemalar

Aktiw kuwwatlar:

$$P = 2 \rightarrow P_Y = 3 \cdot \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom};$$

$$P = 1 \rightarrow P_\Delta = 3 \cdot U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}.$$

Aýlaýjy momentler:

$$M_Y = \frac{P_Y}{\omega/2} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot 2 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}}{\omega} = \frac{3,46 \cdot U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}}{\omega};$$

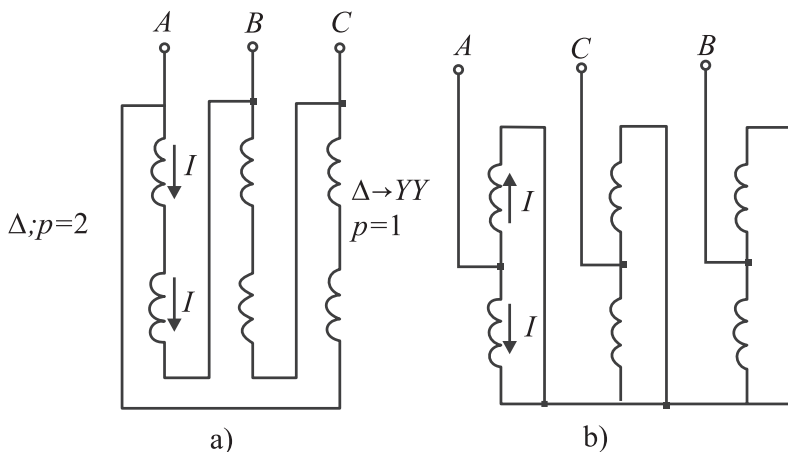
$$M_\Delta = \frac{P_\Delta}{\omega} = \frac{3 \cdot U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}}{\omega}.$$

Momentleriň gatnaşygy:

$$\frac{M_Y}{M_\Delta} = \frac{3,46}{3} \approx 1,1.$$

Aýlaw ýygylgy sazlamagyň bu usuly üçin mehaniki häsiýetnamalary takmynan 2.27-nji suratda görkezilen häsiýetnamany gaýtalaýar.

4) Statoryň sarymlarynyň birikdirilişini „Δ“ üçburçlukdan „YY“ iki gat ýyldyz görnüşe geçirmek usuly (2.29-njy surat).



2.29-njy surat. Statoryň sarymlary „Δ“-dan „YY“-a geçirmek üçin shemalar

Statoryň sarymlarynyň birikdirilişini „Δ“ üçburçlukdan „YY“ iki gat ýyldyz görnüşe geçilen ýagdaýy üçin mehaniki häsiýetnamalaryň umumy görnüşleriniň alnysyna seredeliň,

Aktiwi kuwwatlar:

$$P = 2 \rightarrow P_{\Delta} = 3 \cdot U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom};$$

$$P = 1 \rightarrow P_{YY} = 3 \cdot \frac{U_L}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom} = 3,46 U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}.$$

Aýlaýjy momentler:

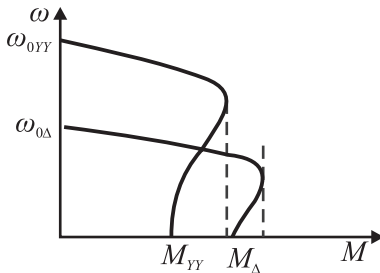
$$M_{\Delta} = \frac{P_{\Delta}}{\omega/2} = \frac{3 \cdot U_L \cdot 2 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}}{\omega} = \frac{6 \cdot U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}}{\omega};$$

$$M_{YY} = \frac{P_{YY}}{\omega} = \frac{3,46 \cdot U_L \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{nom}}{\omega}.$$

Momentleriň gatnaşygy:

$$\frac{M_{\Delta}}{M_{YY}} = \frac{6}{3,46} = \sqrt{3}.$$

Aýlaw ýygylgy sazlamagyň bu usuly üçin mehaniki häsiýetnama 2.30-njy suratda görkezilendir.



2.30-njy surat. Statoryň sarymlary „Δ“-dan „YY“ geçilen ýagdaýlary üçin mehaniki häsiýetnamalar

Hereketlendirijileriň aýlaw ýygylklaryny sazlamak üçin peýdalanylýan elektrik shemalarda polýus jübütleriň sany üýtgände hereketlendirijiniň aýlaw hereketiniň ugry üýtgemän galar ýaly edilip saýlanylýar. Polýus jübütleriniň sanyny üýtgedip tizligi sazlamak usuly, haçan-da işçi mehanizmiň tizliginiň peselip onuň statiki garşylyk momentiniň ýokarlanýan ýagdaýynda ulanmak mak-sadalaýykdyr.

Seredilen shemalaryň ählisi tizlikleriniň gatnaşygy $\omega_1 / \omega_2 = 2$ deň bolan ikitizlikli hereketlendirijilerde ulanylýar. Şeýle hereketlendirijilere iki tizlikli hereketlendiriji diýilýär. Iş ýüzünde üç we dört tizlikli hereketlendirijiler hem ulanylýar. Bu hereketlendirijileriň statorynda özbaşdak iki sany aýratyn sarym ýerleşdirilýär we olarda tizligi giň çäklerde üýtgetmäge mümkinçilik döreýär. Asinhron hereketlendirijileriň minimal aýlaw ýygylgy $n_{nom} = 500$ aýl/min, maksimal aýlaw ýygylgy bolsa $m_{max} = 3000$ aýl/min bolýar. Hereketlendirijiniň berlen kuwwatynda onuň aýlaw ýygylgyny pese düşürmek hereketlendirijiniň göwrüminiň ulalmagyna we energetiki görkezijileriniň peselmegine getirýär. Bu hereketlendirijiniň aşa ýüklenme ukyplylygy: $\lambda = 1,8 \div 2,5$.

2.1.12.3. Asinhron hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny tiristorlar arkaly sazlamak

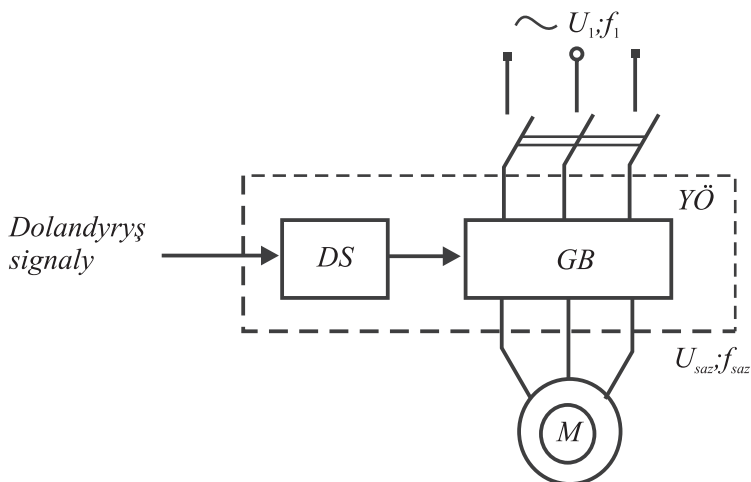
Häzirki döwürde ýygylgyk özgerdijileriň statiki ýygylgyk özgerdijiler diýlip atlandyrylýan görnüşü has giňden ýaýrandyr. Bu ýygylgyk özgerdijileriň ýarymgeçiriji enjamlardan, kondensatorlardan we beý-

leki statiki elementlerden hem-de gurluşlardan düzülenligi sebäpli, olara statiki ýygylýk özgerdijiler diýilýär. Uly toklar we naprýaženiýeler üçin niýetlenen ýarymgeçiriji diodlaryň, tranzistorlaryň we tiristorlaryň ýüze çykmagy bilen bu özgerdijileriň ulanylyş çägi has hem giňedi. Ýygylgy erkin üýtgedip bilýän statiki ýygylýk özgerdijileriň ulanylmagy sazlanýlýan aýlaw ýygylýkly elektrohereketlendiriliş tehniki-ykdysady görkezjilerini has-da ýokarlandyrmaga mümkinçilik berdi. Şeýle-de onuň sazlaýjy ulgamynyň peýdaly täsir koeffisiýentiniň ýokary bolmagy ($90 \div 95\%$) we elektrohereketlendiriliş aýlaw ýygylýgyny üýtgetmek üçin gerek bolan wagtyň has azalmagy bu özgerdijileriň ulanmagyna giň ýol açdy. Statiki ýygylýk özgerdijiler iki topara bölünýär:

1) Düzüminde hemişelik toguň göneldijisi bolmadyk iýmitlendiriji set bilen hereketlendirijiniň arasynda gönümel baglanyşygy bolan ýygylýk özgerdijiler.

2) Düzüminde hemişelik toguň göneldijisi we inwertor bolan ýygylýk özgerdijiler.

1) Düzüminde hemişelik toguň göneldijisi bolmadyk ýygylýk özgerdijiniň ýönekeýleşdirilen funksional shemasy 2.31-nji suratda görkezilendir.

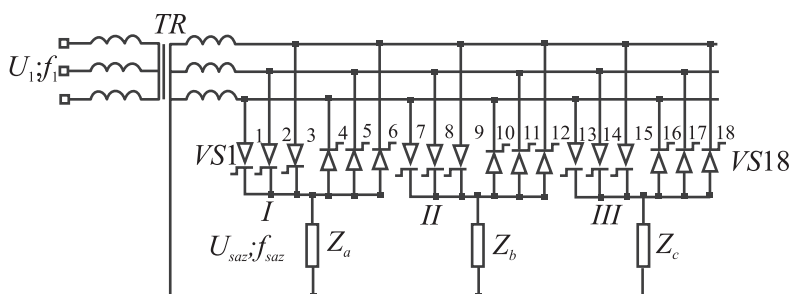


2.31-nji surat. Düzüminde hemişelik toguň zwenosy bolmadyk ýygylýk özgerdijiniň funksional shemasy

Ýygýlyk özgerdiji (ÝÖ): GB güýç we DS dolandyrylyş böleklerden ybaratdyr. Ýygýlyk özgerdiji U_1 naprýaženiýaly we f_1 ýygýlykly üýtgeýän toguň setiniň elektrik energiýasyny sazlanýlýan U_{saz} naprýaženiýeli hem-de f_{saz} ýygýlykly üýtgeýän toguň energiýasyna öwrülmegini amala aşyran güýç böleginiň düzümine tiristorlar we käbir ýagdaýlarda ylalaşdyryjy transformatorlar girýär.

Dolandyrylyş bölegi ýygýlyk özgerdijiniň güýç böleginiň düzümine girýän tiristorlary dolandyrmagy üpjün edýär. Ýagny ol tiristorlaryň dolandyryjy elektrodларыna wagtyň gerekli pursatynda impulsary bermek üçin niýetlenendir.

Üçfazly gönümel baglanyşykly tiristorly ýygýlyk özgerdijiniň shemasy 2.32-nji suratda görkezilendir.



2.32-nji surat. Üçfazly gönümel baglanyşykly tiristorly ýygýlyk özgerdijiniň shemasy

Schema asinhron hereketlendirijiniň Z_a , Z_b we Z_c fazalaryny iýmitlendirmek üçin niýetlenen, tiristorlaryň üç sany birmeňzeş toplumyndan ybaratdyr. Bir toplumda alty sany tiristor bolup, olaryň üçüsi anodlary bilen TR transformatoryň ikinji sarymlaryna, beýleki üçüsi bolsa katodlary bilen şol sarymlara birleşdirilýär.

Shemada TR transformatoryň neýtral nokady üçfazly hereketlendirijiniň faza sarymlarynyň umumy nokadyna nol simiň üsti arkaly birikdirilýär. Şonuň üçin bu shema, adaty, nol simli shema hem diýlip atlandyrylýar (2.32-nji surat). Shemanyň her bir fazasynyň özbaşdak işleýändigini sebäpli, onuň işleýiş aýratynlygyna düşünmek üçin fazalaryň diňe birine (meselem, tiristorlaryň I toplumu bilen dolandyrylýan A faza) seretmek ýeterlikdir.

Goý, TR transformatoryň ikinji sarymlarynyň naprýaženiýeleri wagta görä sinusoidal üýtgeýär diýip kabul edeliň. Eger-de VS1-VS6 tiristorlar ýapyk bolsa, onda naprýaženiýe ýapyk tiristorlara düşer we bu ýagdaýda Z_a fazadaky naprýaženiýe nola deň bolar. Dolandyrylyş shemasyndan t_1 wagt pursatynda VS1 tiristora, t_2 wagt pursatynda VS2 tiristora we t_3 wagt pursatynda VS3 tiristora açylyş impulsalaryny bereliň (2.33-nji a surat). Bu wagt pursatlarynda tiristorlar açylýarlar we hereketlendirijiniň Z_a fazasyna naprýaženiýe berilýär.

Bu naprýaženiýe U_a , U_b we U_c naprýaženiýeleriň üç sany sinusoidanyň kesgitli bir bölümi görnüşinde bolýar. Ol 2.33-nji b suratda görkezilendir. Eger VS1-VS3 tiristorlaryň dolandyryjy elektrodlaryna berilýän impulsary kessek hem-de t_5 , t_6 , t_7 wagt pursatlarynda VS6, VS4 we VS5 tiristorlara dolandyryjy impulsary bersek, onda Z_a fazada ýene-de sinusoidalaryň kesgitli bölümleri görnüşindäki naprýaženiýe ýüze çykar. Ýöne olaryň polýarlylygy öňki naprýaženiýelere görä otrisatel bolar. Eger-de VS1-VS3 we VS4-VS6 tiristorlaryň gezekligezegine ýokarda görkezilen tertipde açylmagyny amala aşyrsak, onda 2.33-nji b suratda görkezilen U_{saz} sazlanylan naprýaženiýäniň egri çyzygy periodiki gaýtalanar. Şeýlelikde, Z_a faza T_{saz} sazlanylan periodly we $f_{saz} = 1/T_{saz}$ sazlanylan ýygyllykly üýtgeýän toguň naprýaženiýesi düşer. 2.33-nji b suratdan görnüşi ýaly, bu naprýaženiýäniň T_{saz} sazlanylan periody setdäki naprýaženiýäniň T_1 periodyndan uly bolýar ýa-da edil sonuň ýaly hereketlendirijiniň naprýaženiýesiniň f_{saz} sazlanylan ýygyllygy setiň naprýaženiýesiniň f_1 ýygyllygyndan kiçi bolýar. Bu ululyklaryň arasyndaky gatnaşygy 2.33-nji suratyň kömegi arkaly kesgitlemek mümkin:

$$\frac{T_{saz}}{2} = \frac{T_1}{2} + \frac{nT_1}{3}; \quad T_{saz} = \frac{T_1(3+2n)}{3}.$$

bu ýerde $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ topardaky açylýan tiristorlaryň sanyndan bir sanyň azdyr. Ýygyllyk özgerdijiniň f_1 giriş we f_{saz} çykyş ýygyllyklarynyň arasyndaky baglanyşyk.

$$f_{saz} = \frac{1}{T_{saz}} = \frac{3f_1}{(3+2n)}. \quad (2.51)$$

Eger giriş naprýaženiýäniň m_1 fazaly ulgamy bar bolsa, onda ýygylklaryň arasyndaky gatnaşyk aşakdaky görnüşde aňladylyp bilner:

$$f_{\text{saz}} = \frac{m_1 \cdot f_1}{(m_1 + 2n)}. \quad (2.52)$$

(2.51) ýa-da (2.52) aňlatmalardan görnüşi ýaly, f_{saz} sazlanýlýan ýygyllyk VS1-VS6 tiristorlaryň dolandyrylyşynyň şu seredilýän prinsipinde diňe açylýan tiristorlaryň n sanyna baglylykda diskret görnüşde üýtgäp biler. Mysal üçin: $m_1 = 3$ we $f_1 = 50$ Gs bolanda f_{saz} sazlanýlýan ýygyllygyň n sana baglylykdaky ululyklary:

$n \dots\dots\dots 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7$

$f_{\text{saz}} \dots\dots 21,4; 16,7; 13,6; 11,5; 10; 8,8$

Şeýlelikde, bu shema f_{saz} çykyş ýygyllygyny hem endigan sazlamaga mümkinçilik berýär. Onuň üçin VS1-VS3 tiristorlara berilýän dolandyryjy impulslaryň kesilen pursaty bilen VS4-VS6 tiristorlara berilýän dolandyryjy impulslaryň kesim pursatynyň arasynda emeli usulda Δt_n wagt aralygyny (arakesme) girizmek ýeterlikdir (2.33-nji b surat).

Sazlanýlýan f_{saz} çykyş ýygyllygy aşakdaky aňlatma boýunça kesgitlenilip bilner:

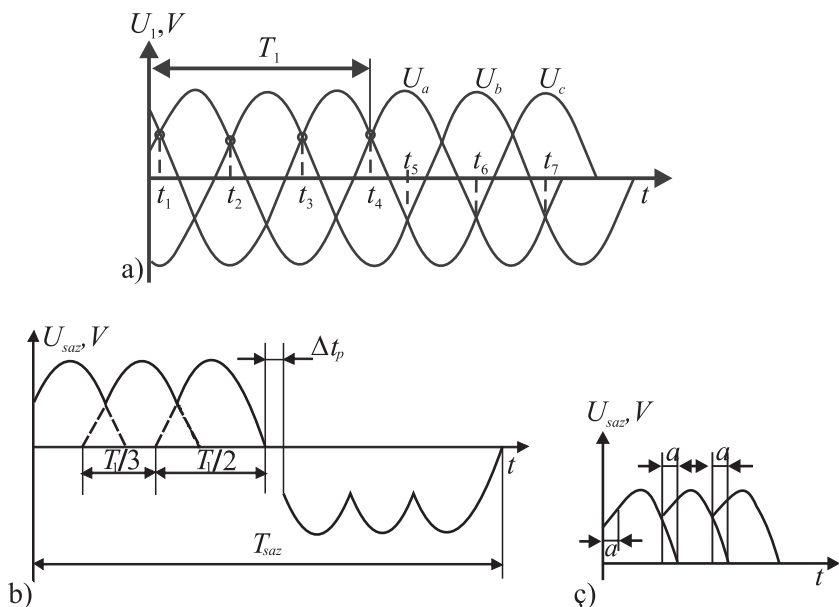
$$f = \frac{m_1 \cdot f_1}{(m_1 + 2n + \Delta t_n \cdot f_1)}, \quad (2.53)$$

bu ýerde, Δt_n – çykyş f_{saz} ýygyllygy endigan üýtgetmek üçin gerek bolan wagt aralygy. Seredilýän ýygyllyk özgerdijiler hereketlendirijidäki U_{saz} naprýaženiýäni hem sazlamaga mümkinçilik berýär. Bu bolsa asinhron hereketlendirijiniň aýlaw ýygyllygyny sazlamagyň mümkinçiligini ýokarlandyrýar. Çykyş naprýaženiýäni sazlamak üçin tiristorlara dolandyryjy impulslar olaryň hakyky açylyş pursatynda berilmän, az kem eglenilip berilýär (2.33-nji a suratdaky t_1, t_2, t_3 we ş.m. nokatlar). Bu eglenme wagty burç ölçeginde α dolandyrylyş burçuna gabat gelýär. Käbir $a > 0$ burçda U_{saz} sazlanýan naprýaženiýäniň täsir ediş ululygy peselýär. Naprýaženiýäniň täsir ululygynyň a burça bolan baglanyşygy aşakdaky görnüşde aňladylyr:

$$U_{saz} = \frac{\sqrt{2} \cdot m_1 U_f \sin \pi / m_1}{\pi} \cdot \cos \alpha. \quad (2.54)$$

Dolandyrylyş ulgamy tiristorlara berilýän impulsalaryň berliş pursatyny üýtgedip hereketlendirijiniň naprýaženiýesini noldan ($\alpha = 90^\circ$) maksimala ($\alpha = 0$) çenli sazlamaga mümkinçilik berýär:

$$U_{saz} = \sqrt{2} \frac{m_1}{\pi} \sin \frac{\pi}{m_1} U_f. \quad (2.55).$$

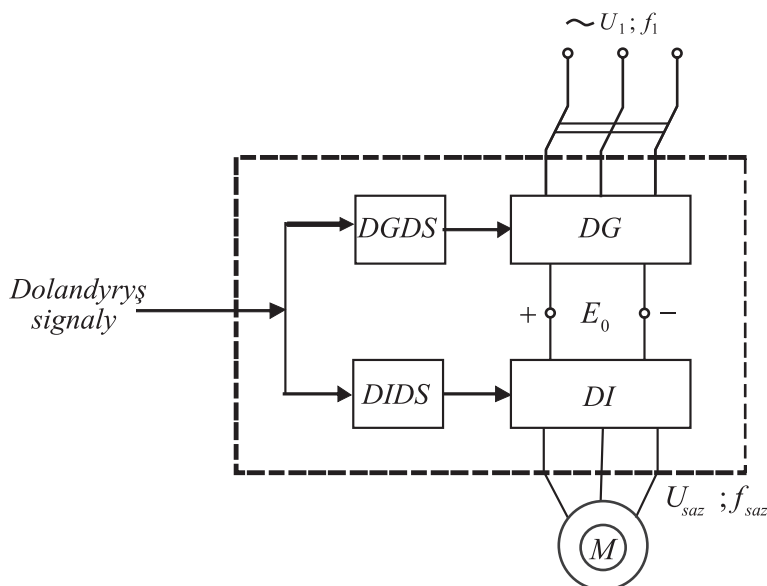


2.33-nji surat. Setdäki (a) we hereketlendirijidäki (b, c) naprýaženiýeleriň wagta göre üýtgeýişleri

Ýygylýk özgerdijileriň dolandyryjy shemasynyň düzüminde transformatoryň we nol simiň bolmagy käbir goşmaça kynçylyklary döredýär. Şonuň üçin praktikada ýygylýk özgerdijileriň köpri görnüşli shemalary giňden ýaýrandyr. Hemişelik toguň göneldijisi bolan ýygylýk özgerdijiniň funksional shemasy 2.34-nji suratda görkezilendir.

Ýygylýk özgerdijiniň güýç bölegi iki sany: DG dolandyrylýan göneldijiniň we DI dolandyrylýan inwertoryň bloklaryndan ybaratdyr. Shemada, setiň f_1 standart ýygylýkly U_1 naprýaženiýesini, he-

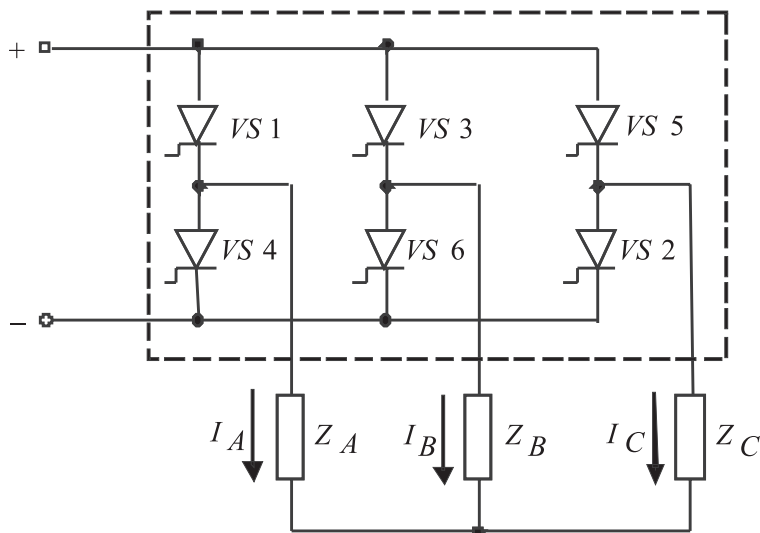
mişelik E_0 naprýaženiýä özgerdýän DG dolandyrylýan göneldijiniň girişine berilýär. Hemişelik naprýaženiýäni DG dolandyrylýan göneldijiniň kömegi arkaly giň çäkde sazlamak mümkin. Göneldilen we ululygy sazlanýlýan E_0 naprýaženiýe DI dolandyrylýan inwertoryň girişine berilýär. Ol gurluş hemişelik toguň E_0 naprýaženiýesini f_{saz} sazlanýlýan ýygyllykly üçfazly U_{saz} üýtgeýän naprýaženiýä öwürýär. Dolandyrylýan inwertoryň f_{saz} ýygyllykly çykyş naprýaženiýesi aýlaw ýygyllygy sazlanýlýan asinhron hereketlendirijä berilýär. Dolandyrylýan inwertoryň kömegi arkaly sazlanýlýan f_{saz} ýygyllygyň alynýş prinsipine 2.35-nji suratdaky shemanyň mysalynda seredeliň.



2.34-nji surat. Hemişelik toguň göneldijisi bolan ýygyllyk özgerdijiniň funksional shemasy

Goý, üçfazly hereketlendirijiniň sarymlary “Ýyldyz” görnüşinde birleşdirilen bolsun. Köpri görnüşli shema boýunça birikdirilen VS1-VS6 tiristorlar bolsa DIDS dolandyrylyş ulgamynyň kömegi arkaly gerekli yzygiderlilikde we wagtyň islendik kesiminde açylyp bilýär diýip göz önüne getireliň. Praktikada ulanylýan shemalarda, köplenç, her bir tiristoryň açyk ýagdaýynyň λ dowamlylygy f_{saz} sazlanýlýan ýygyllygyň T_{saz} periodynyň ýarysyna ($1/2$) ýa-da üçden birine ($1/3$) deň edilip alyn-

ýar. VS1–VS6 tiristorlaryň açylyş pursatlarynyň süýşmesi bolsa, bu pe-riodyň altydan bir bölegine (1/6) deň edilip alynýar.



2.35-nji surat. Düzüminde aralyk göneldijisi bolan ýygylýk özgerdijiniň shemasy

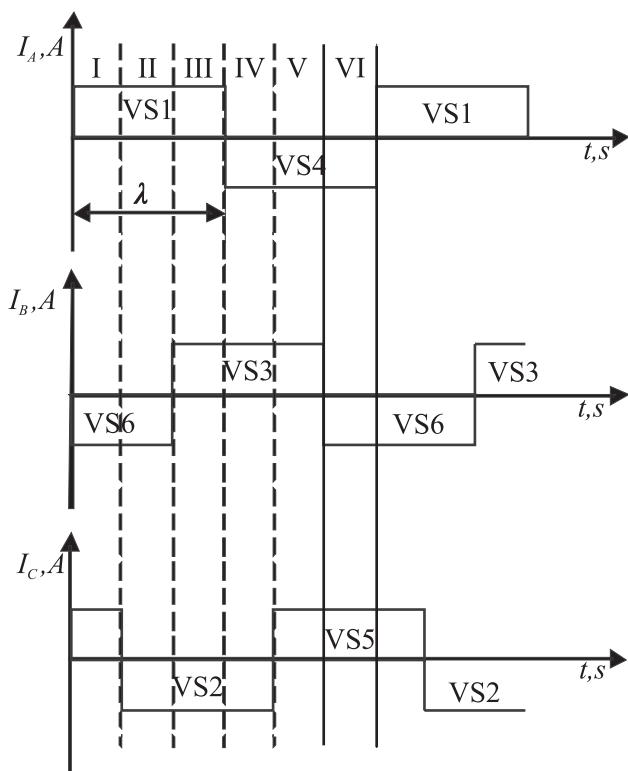
Ilki bilen $\lambda = T_{\text{saz}}/2_z$ bolan shemanyň işlaýyş düzgünine seredeliň. Bu ýagdaý üçin tiristorlaryň toklarynyň wagta görä üýtgeýiş diagram-masy 2.36-njy suratda görkezilendir.

Diagrammada tak san belgili tiristorlaryň üstünden geçýän I_A , I_B , I_C faza toklary položitel tarapda, jübüt tiristorlaryň üstünden geçýän toklar bolsa otrisatel tarapda gurlandyr. Diagrammadan görnüşi ýaly, wagtyň bir pursatynda alty tiristoryň üçüsiniň üstünden tok geçýär.

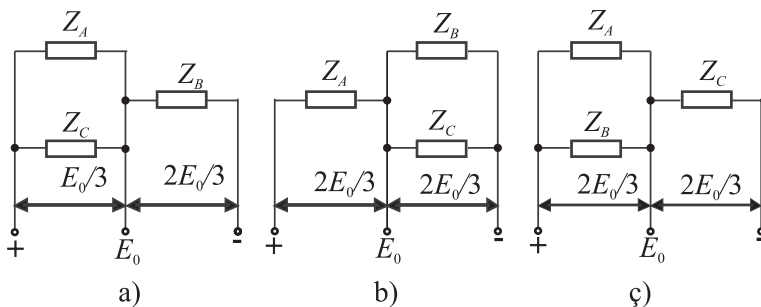
Napryáženiýäniň wagta görä üýtgeýiş periodynyň (I, II, III, VI, V, VI) görnüşi kesgitlemek üçin alty sany wagt aralygynyň her birinde tiristorlaryň, birleşdiriliş shemasyna seredeliň. Ilki bilen I-nji wagt aralygy üçin ekwiwalent shema çyzalyň (2.37-nji a surat).

Birinji wagt aralygynda VS1, VS5 we VS6 tiristorlar açyk bol-ýar. Ýygylýk özgerdijiniň işiniň şu interwalynda A we C fazalaryň başlangyçlary ($+E_0$) nokada birleşdirilen, B fazanyň başy bolsa ($-E_0$) nokada birleşdirilendir. Eger-de üç fazanyň garşylygy birmeňzeş bol-sa, onda parallel birikdirilen A we C fazalaryň ekwiwalent garşylygy

B fazanyň garşylygyndan iki esse kiçi bolar. Onda A we C fazalardaky naprýaženiýe hem B fazanyňka görä iki esse kiçi bolar, ýagny $(1/3)E_0$ deň bolar.

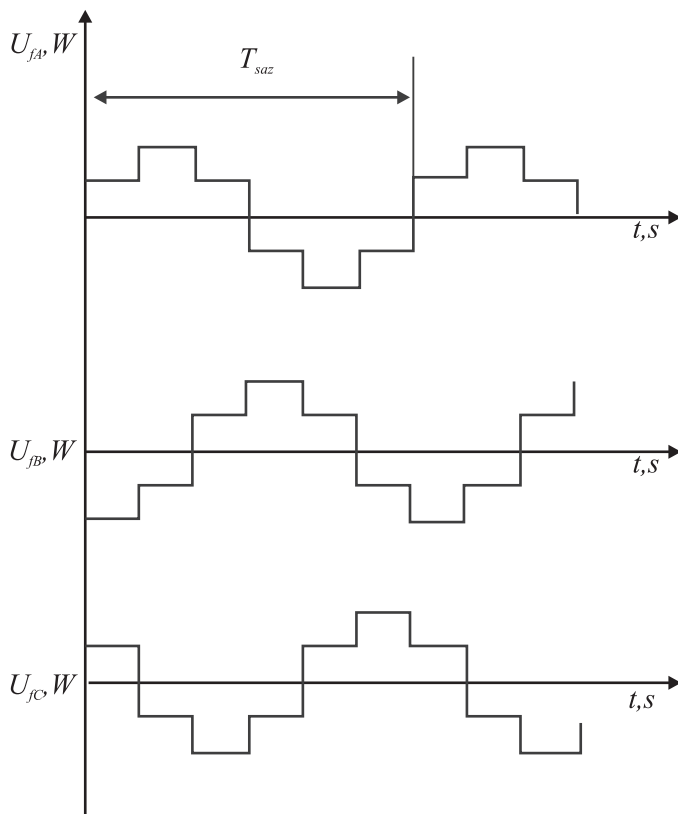


2.36-njy surat. Tiristorlaryň togunyň wagta görä üýtgeýişleri



2.37-nji surat. Tiristorlaryň asinhron hereketlendirijiniň faza sarymlary bilen emele getirýän zynjyrlaryň dürli wagıt pursatlary üçin çalşyрма shemalary

Indi II interwala seredeliň. Şol ýagdaýda VS5 tiristor ýapyk we VS2 tiristor açyk bolýar. VS1 we VS6 tiristorlar bolsa açyk bolmagyny dowam etdirýärler (2.37-nji b surat). Shemadan görnüşi ýaly, bu interwalda B we C fazalar parallel birleşdirilendir. Olara $(1/3) E_0$ naprýaženiýe, A faza bolsa $(2/3) E_0$ naprýaženiýe düşýär. III interwalda VS6 tiristor ýapyk we VS3 tiristor açyk. VS1 we VS2 tiristorlar öňki-si ýaly açyk bolup, bu interwalyň shemasy 2.37-nji ç suratda görkezilendir. Şeýle ýagdaýda A we B fazalar özara parallel birleşdirilendir. Edil şuna meňzeşlikde, IV, V we VI interwallar üçin hem shemalary çyzmak mümkindir.



2.38-nji surat. Ýüküň faza naprýaženiýesiniň wagta görä üýtgeýşi

Bu shemalar degişlilikde I, II we III interwallaryň shemalaryna meňzeş bolup, diňe fazalaryň naprýaženiýeleriniň polýarlylygy bi-

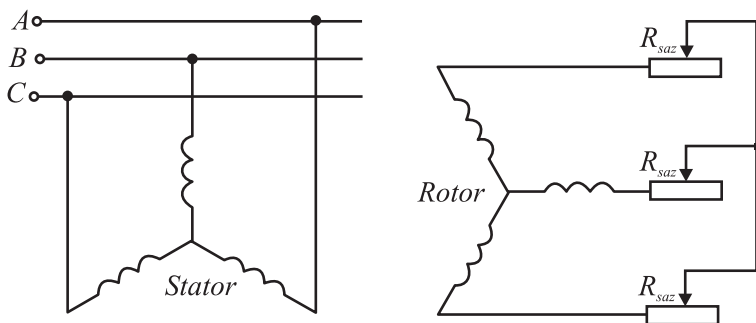
len tapawutlanýar. Hereketlendirijiniň fazalaryndaky naprýaženiýäni grafik görnüşde şekillendirsek, ol 2.38-nji suratda görkezilen egri çyzykly görnüşli alar. Şeýlelikde, hereketlendirijä ýygylgy erkin sazlanýan üçfazly üýtgeýän toguň naprýaženiýesi berilýär. Bu bolsa hereketlendirijiniň tizligini giň çäkke sazlamaga mümkinçilik döredýär.

2.1.12.4. Asinhron hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny rotor zynjyrynyň garşylygyny üýtgetmek arkaly sazlamak

Hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny rotoryň zynjyrynyň R_2 garşylygyny üýtgetmek arkaly sazlamak usuly diňe faza rotorly asinhron hereketlendirijilerde ýerine ýetirilýär we ol hereketlendirijiniň s typma koeffisiýentini üýtgetmeklige esaslanandyr:

$$n_2 = n_1(1 - s).$$

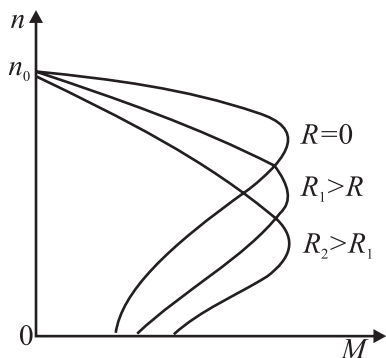
Rotoryň zynjyrynyň R_2 garşylygyny üýtgetmek arkaly hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny sazlamagyň shemasy 2.39-njy suratda görkezilendir.



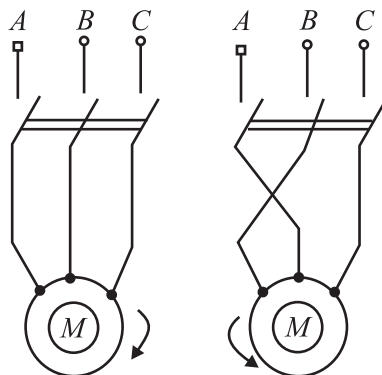
2.39-njy surat. Asinhron hereketlendirijiniň rotor zynjyryna garşylyk birikdirmek arkaly aýlaw ýygylgynyň sazlanlyş shemasy

2.39-njy surat suratdan görnüşli ýaly, rotoryň zynjyrynyň R_2 garşylygynyň ululygynyň ýokarlanmagy bilen hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamalarynyň ýapgytlyk burçy üýtgeýär. Emma M_{kr} kritiki momentiň ululygy bolsa öňkiligine galýar ($M_{kr} = \text{const}$) (2.40-njy surat).

2.40-njy suratdan görnüş i ýaly, hereketlendirijä işçi mehanizm tarapyndan döredilýän M_{st} statiki garşylyk momenti hemişelik bolanda ($M_{st} = \text{const}$), R_2 garşylygyň ösmegi bilen rotoryň aýlaw ýygylgy peselýär. Hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny sazlamagyň bu usulynda elektrik energiýasynyň goşmaça ýitgileriniň ýüze çykýandygy we hereketlendirijiniň peýdaly täsir koeffisiýentiniň peselýändig i sebäpli, ol örän seýrek ulanylýar.



2.40-njy surat. Asinhron hereketlendirijiniň rotorynyň zynjyrynyň dürli ululyklardaky garşylyklaryna degişli mehaniki häsiýetnamalary



2.41-nji surat. Hereketlendirijiniň aýlaw hereketiniň ugrunyň üýtgediliş shemasy

Asinhron hereketlendirijiniň aýlaw hereketiniň ugruny üýtgetmek üçin, statoryň aýlanýan magnit meýdanynyň ugry üýtgedilýär. Ony üýtgetmek üçin hereketlendirijä barýan liniýa simleriniň islendik ikisiniň ýerini çalşymak ýeterlikdir. 2.41-nji suratda hereketlendirijiniň A we B simleriniň ýerini çalşymak arkaly hereketlendirijiniň aýlaw hereketiniň ugrunyň üýtgediliş i görkezilendir.

2.1.13. Asinhron hereketlendirijileriň işe goýberiliş usullary

Asinhron hereketlendirijileri işe goýbermek üçin, esasan, iki sany talaby ýerine ýetirmeli:

1) hereketlendirijiniň aýlaýjy momenti, işçi mehanizmiň döredýän garşylyk momenti bilen özüniň hususy inersiýa momentiniň jeminde uly bolmaly;

2) hereketlendiriji işe goýberilýän wagtynda statoryň we rotoryň toklary mümkin boldugyça, az bolmaly.

Hereketlendirijiniň kuwwatyna we onyň rotorynyň gurluşyna (gysga birleşdirilen ýa-da faza rotorly) hem-de onuň herekete getirýän mehanizminiň häsiýetine görä praktikada hereketlendirijileriň işe goýberilişiniň usullary bar:

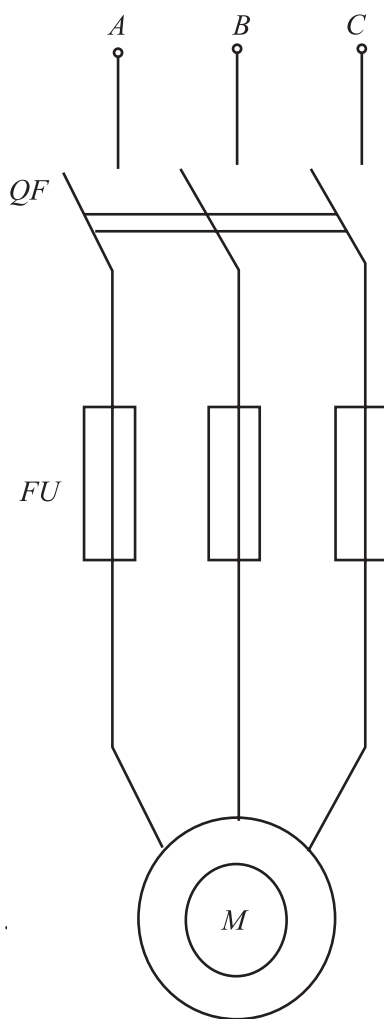
Gönümel işe goýberiliş, rotoryň zynjyryna goşmaça garşylyk birikdirmek we hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäni peseltmek usullary bar. Hereketlendirijiniň gönümel işe goýberiliş usulynyň birikdiriliş shemasy 2.42-nji suratda görkezilendir.

Bu usulda asinhron hereketlendiriji üçfazly toguň çeşmesine göni birikdirilýär. Hereketlendiriji şeýle usul bilen işe goýberilen pursatynda, (ýagny $s = 1$ bolan ýagdaýynda) statoryň we rotoryň toklary aşakdaky görnüşde hasaplanýar:

$$I_1 \approx I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (2.56)$$

Işe goýberilen hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgynyň ýokarlanmagy bilen, rotoryň we statoryň toklary işe goýberiliş pursatynyň ahyryna çenli köp derejede peselýär. Halk hojalygynyň dürli pudaklaryndada ulanmak üçin köpçülikleýin goýberilýän hereketlendirijileriň kuwwatlyklaryna görä hereketlendiriji işe goýberilen pursatynda ýüze çykýan

$I_{goý}$ goýberiliş togy, onuň I_{1n} nominal togundan $K = \frac{I_{goý}}{I_{1n}} = 5 \div 7$ esse

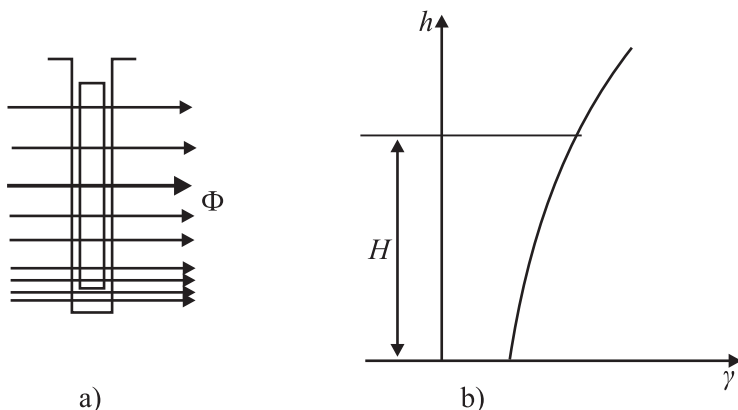


2.42-nji surat. Asinhron hereketlendirijiniň gönümel işe goýberiliş shemasy

töweregi uly bolýar. Adatça, hereketlendirijiniň kuwwatynyň ýokarlanmagy bilen K koeffisiýentiň ululygy hem ýokarlanýar.

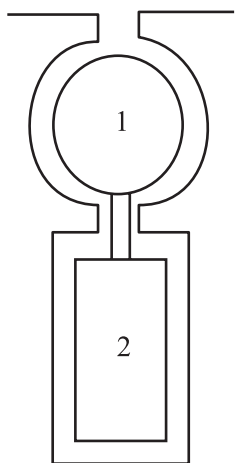
Uly kuwwatly asinhron hereketlendirijileri şu usul bilen işe goýberilen wagtynda, olar setiň napryženiýesini gysga wagtlaýyn hem bolsa, ep-esli derejede peseldýär. Bu bolsa kähallatlarda olara görä parallel işleýän elektrik hereketlendirijileriň aýlaw hereketiniň togtagmagyna getirýär. Şu hadysanyň netijesinde ýükli işe goýberilýän hereketlendirijiniň özüniň hem herekete gelip bilmeýän pursatlary bolýar. Şonuň üçin bu usul, esasan, kuwwaty 50 kW-dan pes bolan asinhron hereketlendirijilerde ulanylýar. Asinhron hereketlendiriji işe goýberilýän pursatynda ýüze çykyan $I_{goý}$ goýberiliş toguny peseltmek üçin, rotoryň ýörite konstruksiýasynyň kömegi arkaly “Toguň gysylyş” hadysasy ulanylýar. Bu hadysa şeýle düşündirilýär: Eger-de rotoryň sterženleri 2.43-nji suratda görkezilişi ýaly, çuň pazlarda ýerleşdirilen ýukajyk mis plastinkalar görnüşinde taýýarlanylýan bolsa, onda rotoryň kese kesigi boýunça onuň üstünden geçýän magnit akymynyň plastinkalardaky ilişmesi birmeňzeş bolmaýar. Ýagny onuň aşaky böleginde magnit akymynyň ilişmesi onuň ýokarky bölegindäkä garanyňda köp bolýar, bu bolsa, öz gezeginde rotoryň plastinkalarynyň aşaky böleginiň induktiw garşylygynyň onuň ýokarky bölegindäkä görä uly bolmagyna getirýär. Netijede, rotoryň togy plastinkanyň ýokarky bölegine gysylýar we toguň esasy bölegi plastinkanyň ýokarky böleginden geçýär. Bu bolsa rotoryň aktiw garşylygynyň ýokarlanmagyna getirýär. R_2 garşylygyň ösmegi, öz gezeginde hereketlendirijiniň togunyň peselmegine we onuň $M_{goý}$ goýberiş momentiniň ýokarlanmagyna getirýär. Bu hadysa hereketlendiriji işe goýberilen pursatynda (ýagny $s = 1$ we $f_2 = f_1 = 50$ Gs bolan ýagdaýynda has) hem oňat ýüze çykýar.

Rotoryň aýlaw ýygylgynyň ýokarlanmagy bilen, hereketlendirijiniň s typmasynyň kemelýänligi sebäpli, işe goýberiliş pursatynyň ahyryna çenli rotoryň togunyň ýygylgy $1 \div 4$ Gs-e ýetýär. Bu ýygylkyda bolsa rotoryň plastinkalarynyň induktiw garşylygy örän azalýar we toguň dykzlygy rotoryň plastinkalarynyň kese kesiginiň meýdany boýunça takmynan deňölçegli ýaýraýar. Şeýlelikde, gysylmak hadysasy asinhron hereketlendirijiniň sete göni birikdirilen pursatynda ýüze çykyan $I_{goý}$ goýberiliş toguny peseltmäge we hereketlendirijiniň $M_{goý}$ goýberiş momentini ýokarlandyrmaga mümkinçilik döredýär.



2.43-nji surat. Sterženleri plastinka görnüşli ýerine yetirilen rotoryň kese kesiginiň bir bölegi (a) we plastinkanyň kese-kesigi boyunca toguň dykzlygynyň ýaýraýşy (b)

Hereketlendirijileri göni işe goýbermek üçin diňe çuň pazly rotorlar däl-de, ikeldilen gözenekli rotorlar hem peýdalanylýar (2.44-nji surat). Ikeldilen gözenekli rotoryň ýokarky pazynda latun siminden taýýarlanylýan (1) we aşaky pazynda mis siminden taýýarlanylýan (2) sarymlar (plastinkalar) ýerleşdirilýär. Rotoryň ýokarky plastinkasynyň aktiw garşylygy, onuň aşaky plastinkasynyňka görä has uly bolar ýaly edilip ýerine ýetirilýär.

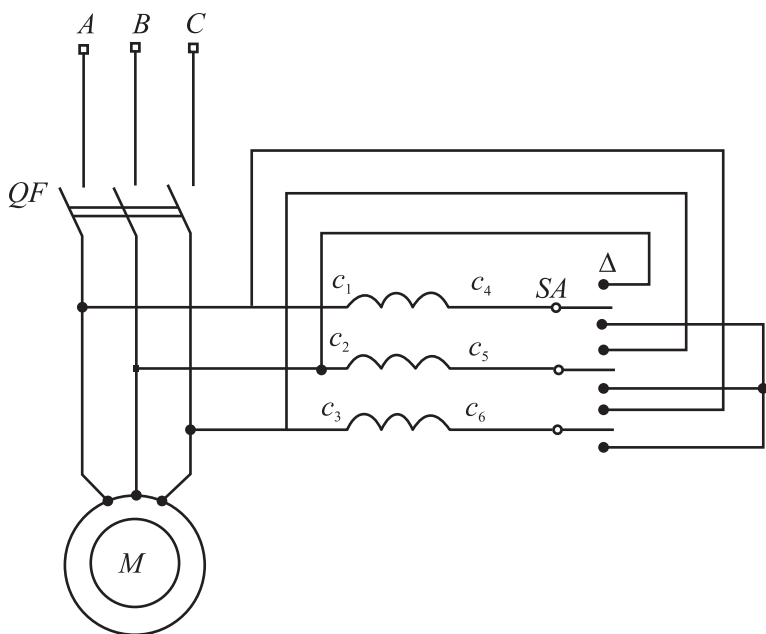


2.44-nji surat. Ikeldilen gözenekli rotoryň kese-kesiginiň bir bölegi

Hereketlendiriji işe goýberilýän pursatynda magnit akymynyň esasy böleginiň rotoryň aşaky plastinkasyny kesip geçýänligi sebäpli, onuň togunyň esasy bölegi ýokarky plastinkadan akýar. Netijede, rotoryň aktiw garşylygy diňe ýokarky latun simiň aktiw garşylygy bilen kesgitlenýär. Bu bolsa hereketlendirijiniň işe goýberilýän pursatynda ýüze çykyan toguň çäklendirilmegine hem-de onuň goýberiş momentiniň ýokarlanmagyna getirýär. Hereketlendiriji nominal aýlaw ýygylgyny alandan soňra, rotoryň togunyň esasy bölegi ýokarky plastinkadan aşaka geçýär.

Ikeldilen gözenekli asinhron hereketlendirijiniň goýberiş momenti adaty görnüşde taýýarlanylýan rotorly hereketlendirijileriň başlangyç momentlerinden has uly bolýar. Emma olaryň bahasy adaty gurluşly hereketlendirijileriňkiden gymmatdyr.

Statorynyň faza sarymlary “Üçburçluk” görnüşli birikdirilýän hereketlendirijileriň $I_{goý}$ goýberiliş toguny peseltmek maksady bilen onuň fazalary “Ýyldyz” görnüşli birikdirilýär. Hereketlendiriji özüniň nominal aýlaw ýygylgyna ýakyn barandan soňra statoryň fazalary “Ýyldyzdan” “Üçburçluga” geçirilýär. Statoryň fazalaryny “Ýyldyzdan” “Üçburçluga” geçirmek üçin 2.45-nji suratda görkezilen shema ulanylýar.

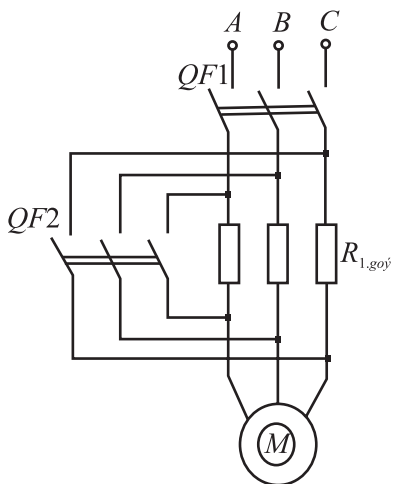


2.45-nji surat. Asinhron hereketlendirijiniň statorynyň fazalaryny “Ýyldyzdan” “Üçburçluga” geçiriliş shemasý

Hereketlendirijini işe goýbermek üçin, ilki bilen, ony QF açaryň kömegi arkaly üçfazly toguň çeşmesine birikdirmeli. Soňra SA açar Y ýagdaýa geçirilýär, ýagny statoryň fazalary “Ýyldyz” görnüşli birikdirilýär. Bu ýagdaýda hereketlendirijä berilýän naprýaženiýe, öz

ululygy boýunça U_{1n} nominal naprýaženiýesinden $\sqrt{3}$ esse az bolmagy, statoryň sarymlarynyň üstünden geçýän toguň $\sqrt{3}$ esse kemelmegine getirýär.

Pes naprýaženiýäniň täsiri netijesinde hereketlendiriji öz nominal aýlaw ýygylgyna ýakyn barandan soňra, SA açar ýokary Δ ýagdaýa geçirilýär, ýagny statoryň fazalary “Üçburçluk” görnüşli birikdirilýär we hereketlendiriji U_{1n} nominal naprýaženiýede işläp başlaýar.



2.46-njy surat. Asinchron hereketlendirijiniň rezistorly işe goýberiliş shemasy

Şeýle usul bilen hereketlendiriji işe goýberilen wagtynda, onuň $M_{baş}$ başlangyç momenti 3-4 esse kemelýär. Şonuň üçin bu usul diňe pes statiki garşylyk momenti bolan işçi mehanizmleri herekete getirýän hereketlendirijilerde peýdalanylýar. Hereketlendirijiler işe goýberilen pursatynda ýüze çykýan toklary peseltmek maksady bilen, kähalatlarda statoryň fazalaryna yzygider rezistorlar birikdirilýär (2.46-njy surat).

Şeýle usul bilen hereketlendirijini işe goýbermek üçin QF2 awtomatiki açary açyk ýagdaýda goýmaly we QF1 awtomatiki açaryň üsti arkaly ony sete birikdirmeli (2.43-nji surat).

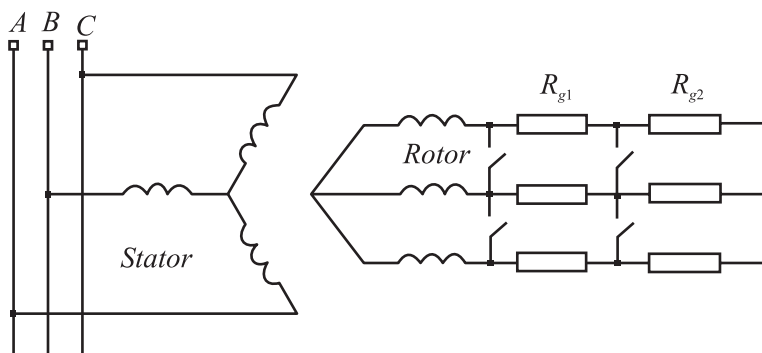
Statora toguň $R_{1.goy}$ rezistoryň üstünden geçmegi, hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäniň we I_{goy} goýberiliş togunyň peselmegine getirýär. Hereketlendiriji işe goýberilýän pursatynda statora düşýän naprýaženiýäniň ululygy aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

$$U_1 = U_{1,nom} - R_{1,goy} \cdot I_b.$$

U_1 naprýaženiýäniň täsiri netijesinde hereketlendiriji öz nominal aýlaw ýygylgyna ýakyn barandan soň QF2 awtomatiki açar birikdirilýär we hereketlendiriji U_{1n} nominal naprýaženiýeden iýmitlenip başlaýar. Şeýlelikde, $R_{1.goy}$ goýberiji rezistoryň garşylygynyň ulu-

lygyny üýtgetmek arkaly hereketlendirijiniň $I_{goý}$ goýberiliş togunyň ululygy çäklendirilýär. Bu usul hem pes garşylyk momenti bolan işçi mehanizmleri herekete getirýän hereketlendirijilerde peýdalanylýar.

Faza rotorly asinhron hereketlendirijileri işe goýbermek üçin 2.47-nji suratda görkezilen shema ulanylýar.



2.47-nji surat. Faza rotorly asinhron hereketlendirijiniň rezistorly işe goýberiliş shemasy

Bu usulda kontakt halkalarynyň kömegi arkaly rotoryň zynjyryna yzygider R_g garşylykly rezistor birikdirilýär. R_g garşylygyň ululygy hereketlendirijiniň $M_{goý}$ goýberiliş momenti bilen onuň M_{kr} kritiki momenti özara deň bolar ýaly hasaplanylýp alynýar. Onuň üçin:

$$s_{kr} = \frac{R'_2 + R'_g}{X_1 + X'_2} = 1$$

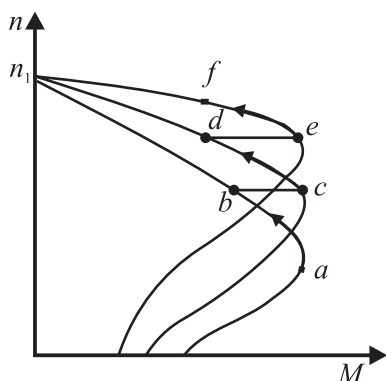
aňlatmadan goşmaça rezistoryň garşylygynyň getirilen ululygyny kesgitlemek ýeterlikdir:

$$R'_g = (X_1 + X'_2) - R'_2 .$$

Rezistoryň garşylygynyň ululygyny üç sany başgançak arkaly üýtgedip bolýan hereketlendirijiniň işe goýberilişi 2.48-nji suratda görkezilen egri çyzyk boýunça ýerine ýetirilýär.

Hereketlendiriji işe goýberilen pursatynda rezistoryň iň uly garşylygynyň barlygy sebäpli, mehaniki häsiýetnamanyň işçi nokady

a nokatda bolýar. Rotoryň aýlaw ýygylgynyň ýokarlanmagy bilen häsiýetnamanyň işçi nokady 1-nji egri çyzyk boýunça hereket edýär we ol b nokada ýeten wagtynda R rezistoryň birinji basgançagy özara gysga birleşdirilýär. Netijede, häsiýetnamanyň işçi nokady b nokatdan c nokada geçýär we hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgynyň ýokarlanmagy 2-nji egri çyzyk boýunça hereket edýär. Ol d nokada ýeten wagtynda R rezistoryň ikinji basgançagy hem özara gysga birleşýär. Bu ýagdaýda häsiýetnamanyň işçi nokady d nokatdan e nokada geçýär we ol rotoryň zynjyryna hiç hili goşmaça garşylyk birik-



2.48-nji surat. Faza rotorly asinhron hereketlendirijiniň üç basgançakly rezistor bilen işe goýberiliş häsiýetnamasy

dirilmedik ýagdaýynda ýüze çykýan tebigy mehaniki häsiýetnamanyň 3-nji egri çyzygy boýunça hereket edýär. Hereketlendiriji nominal düzgüninde işleýän wagty onuň işçi nokady häsiýetnamanyň f nokadynyň töwreginde ýerleşýär. Faza rotorly asinhron hereketlendirijiniň I_{goy} goýberiliş toguny R rezistor arkaly peseldip bolýanlygyna garamazdan, hereketlendirijide elektrik energiýanyň goşmaça ýitgileriniň ýüze çykýanlygy sebäpli, bu usul diňe uly kuwwatly hereketlendirijilerde ulanylýar.

2.1.14. Üçfazly asinhron hereketlendirijileriň simmetrik däl iş düzgünleriniň hasaplanylşy

Üçfazly asinhron hereketlendirijilerde simmetrik däl iş düzgünler aşakdaky ýagdaýlarda ýüze çykmagy mümkin:

- setiň simmetrik däl naprýaženiýesinde;
- statoryň we rotoryň simmetrik däl faza garşylyklarynda;
- hereketlendirijiniň statorynyň sarymlary simmetrik däl shema boýunça birikdirilende.

Asinhron hereketlendirijileriň simmetrik däl iş düzgünleri, edil transformatorlarda bolşy ýaly naprýaženiýeleri, toklary simmetrik düzüjilere dargatmak usuly arkaly analiz edilýär. Meselem:

$$\underline{U}_A = \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} + \underline{U}_{a0};$$

$$\underline{U}_B = \underline{U}_{b1} + \underline{U}_{b2} + \underline{U}_{b0};$$

$$\underline{U}_C = \underline{U}_{c1} + \underline{U}_{c2} + \underline{U}_{c0}.$$

Göni yzygiderliligiň naprýaženiýesi:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{a1} &= \frac{\underline{U}_a + a \cdot \underline{U}_b + a^2 \cdot \underline{U}_c}{3}; \\ \underline{U}_{b1} &= a^2 \cdot \underline{U}_{a1}; \\ \underline{U}_{c1} &= a \cdot \underline{U}_{a1}.\end{aligned}\tag{2.57}$$

Ters yzygiderliligiň naprýaženiýesi:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{a2} &= \frac{\underline{U}_a + a^2 \cdot \underline{U}_b + a \cdot \underline{U}_c}{3}; \\ \underline{U}_{b2} &= a \cdot \underline{U}_{a2}; \\ \underline{U}_{c2} &= a^2 \cdot \underline{U}_{a2}.\end{aligned}\tag{2.58}$$

Nol yzygiderliligiň naprýaženiýesi:

$$\underline{U}_{a0} = \underline{U}_{b0} = \underline{U}_{c0} = \frac{\underline{U}_a + \underline{U}_b + \underline{U}_c}{3}.\tag{2.59}$$

Bu aňlatmalarda:

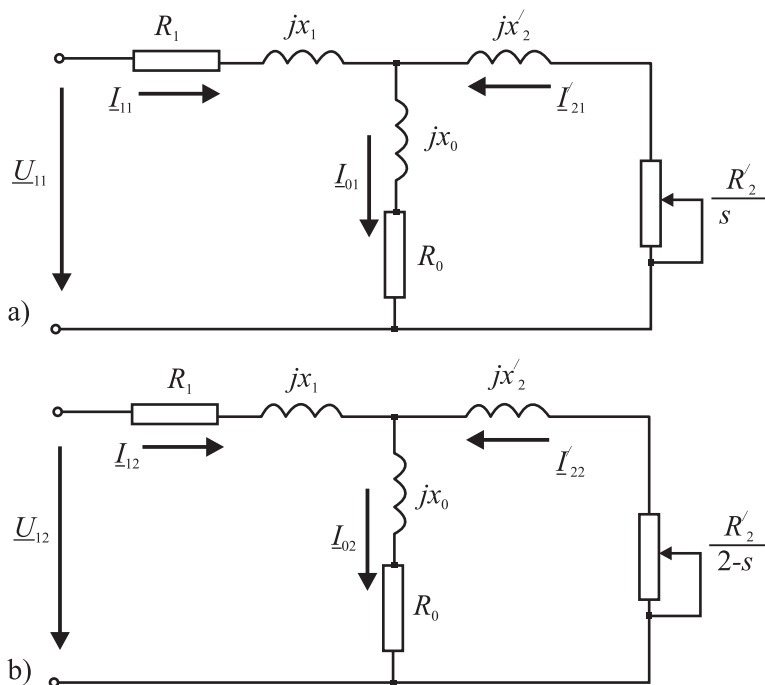
$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Adatça, asinhron hereketlendirijilerde neýtral simiň ulanylmaýanlygy üçin nol yzygiderliligiň toklary ýüze çykmaýar. Şol sebäpli asinhron hereketlendirijiniň iş düzgüniniň analizi naprýaženiýeleriň we toklaryň göni hem-de ters yzygiderliliginiň düzüjilerine görä ýerine ýetirilýär.

Asinhron hereketlendirijileriň simmetrik däl naprýaženiýeli setden iýmitlenýän wagtyndaky iş düzgünleriniň hasaplanylşy

Asinhron hereketlendirijä simmetrik däl üçfazly naprýaženiýe goýlan wagtynda statorda ýüze çykýan toklary göni we ters zyzgiderliligiň toklaryna dargatmak mümkin. Göni we ters zyzgiderliklere deňişli çalşyрма shemalary 2.49-njy suratda görkezilendir.

Göni zyzgiderliligiň U_{11} naprýaženiýeleriniň simmetrik ulgamy statorda göni zyzgiderliligiň I_{11} toklarynyň ulgamyny emele getirýär. Bu toklar göni zyzgiderliligiň aýlanýan magnit meýdanyny döredýär. Ol meýdan n_1 aýlawy ýerine ýetirýär. Göni zyzgiderliligiň magnit meýdanynyň güýç çyzyklary rotoryň sarymlarynda E_{21} elektrik hereketlendiriji güýüi, ol hem öz gezeginde I'_{21} togy emele getirýär. I_{11} we I'_{21} toklar bilelikde göni zyzgiderliligiň jemleýji magnit meýdanyny döredýärler we ol giňişlikde $n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$ ýygylyk bilen aýlanýar.



2.49-njy surat. Asinhron hereketlendirijiniň naprýaženiýeleriniň göni (a) we ters (b) zyzgiderlikleri üçin çalşyрма shemalary

Rotoryň göni yzygiderliligiň magnit meýdanyna görä typma koeffisiýenti: $s_1 = s = \frac{n_1 - n}{n_1}$, bu ýerde n – rotoryň aýlaw ýygylgy. Ro-

toryň n aýlaw ýygylgynyň göni yzygiderliligiň magnit meýdanynyň aýlanýan ugruna tarap hereketi položitel diýip kabul edilýär. Göni yzygiderliligiň naprýaženiýeleriniň we toklarynyň ulgamyna degişli çalşyрма shemasy 2.49-njy a suratda görkezilendir. Bu shema göni yzygiderliligiň U_{11} naprýaženiýesiniň statoryň we rotoryň sarymlarynda emele getirýän I_{11} we I'_{21} toklaryny kesgitlemäge mümkinçilik berýär. Göni yzygiderliligiň toklary we magnit meýdany göni yzygiderliligiň aýlaýjy momentini döredýär:

$$M_1 = 3 \cdot \left(I'_{21} \right)^2 \cdot \frac{R'_2}{s_1} \cdot \frac{p}{\omega_1}. \quad (2.60)$$

$$\text{Bu aňlatmada: } \omega_1 = \frac{2\pi \cdot n_1}{60}.$$

Asinhron hereketlendirijiniň statoryna goýlan ters yzygiderliligiň U_{12} naprýaženiýesi statoryň sarymlarynda ters yzygiderliligiň I_{12} toklaryny emele getirýär. Bu toklar statorda ters yzygiderliligiň aýlanýan magnit meýdanyny döredýär. Ters yzygiderliligiň magnit meýdany hem edil göni yzygiderliligiň magnit meýdany ýaly minutda n_2 aýlawy ýerine ýetirýär. Emma ters yzygiderlikde hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäniň iki fazasynyň ýeriniň çalyşýandygy sebäpli, bu magnit meýdan göni yzygiderliligiň ters ugruna tarap n_2 tizlik bilen aýlanýar.

$$n_2 = -n_1 = -\frac{60 \cdot f_1}{p}. \quad (2.61)$$

Ters yzygiderliligiň aýlanýan magnit meýdany rotoryň sarymlarynda ters yzygiderliligiň I'_{22} toguny emele getirýär. Öz gezeginde I_{12} we I'_{22} toklar bilelikde ters yzygiderliligiň jemleýji magnit meýdanyny döredýär.

Rotoryň ters yzygiderliligiň magnit meýdanyna görä typma koeffisiýenti:

$$s_2 = \frac{n_2 - n}{n_2} = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = \frac{n_1 + n}{n_1}. \quad (2.62)$$

(2.62) deňlemede $n = (1-s) \cdot n_1$ ululygy goýup alarys:

$$s_2 = \frac{n_1 + n_1 \cdot (1-s)}{n_1} = \frac{n_1 \cdot (1+1-s)}{n_1} = 2-s. \quad (2.63)$$

Ters yzygiderliligiň naprýaženiýesine degişli çalşyрма she-ma 2.49-njy b suratda görkezilendir. Ters yzygiderliligiň toklary we magnit meýdanýy ters yzygiderliligiň aýlaýjy momentini döredýär:

$$M_2 = -\frac{1}{\omega_1} \cdot 3 \cdot \left(\underline{I}'_{22} \right)^2 \cdot \frac{R'_2}{s_2} = -3 \cdot \left(\underline{I}'_{22} \right)^2 \cdot \frac{R'_2}{2-s} \cdot \frac{1}{\omega_1}. \quad (2.64)$$

Bu deňlemede “-”, alamat M_2 momentiniň ters yzygiderliligiň magnit meýdanynyň ugruna tarap hereket edýändigini görkezýär.

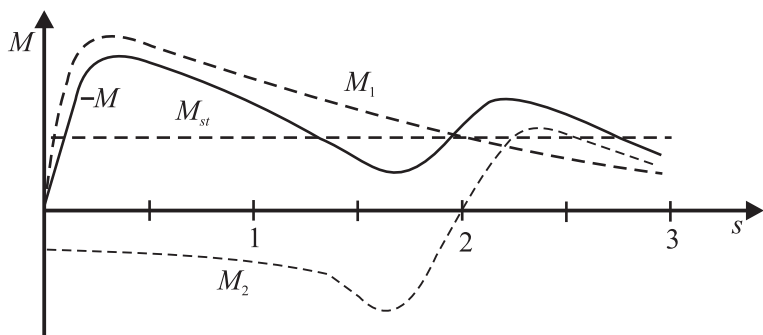
Rotora täsir edýän jemleýji moment

$$M = M_1 + M_2 = \left[3 \cdot \left(\underline{I}'_{21} \right)^2 \cdot \frac{R'_2}{s} - 3 \cdot \left(\underline{I}'_{22} \right)^2 \cdot \frac{R'_2}{2-s} \right] \cdot \frac{1}{\omega_1}. \quad (2.65)$$

Rotorda M_1 we M_2 momentlerden başga-da ters yzygiderliligiň I'_{22} togy bilen göni yzygiderliligiň magnit meýdanynyň döredýän M_{21} şeýle-de, göni yzygiderliligiň I'_{21} togy bilen ters yzygiderliligiň magnit meýdanynyň döredýän M_{12} goşmaça aýlaýjy momentleriň ýüze çykyandygyny ýatlatmak zerurdyr. Bu goşmaça momentleriň $2f_1$ ýygylýk bilen pulsirlenýändigini sebäpli olaryň hiç hili amaly ähmiýeti ýokdur. Ýöne, olar göni we ters yzygiderliligiň magnit meýdanlarynyň täsirinde $2f_1$ ýygylýkly yrgyldyly radial güýçleri döredýär. Rotor-daky göni we ters yzygiderliligiň toklarynyň ýygylýklary degişlilikde: $f_{21} = s \cdot f_1$ we $f_{22} = (2-s) \cdot f_1$ aňlatmalar boýunça kesgitlenýärler. Şol sebäpli hem R'_2 we X'_2 garşylyklar hasaplanylanda olary hasa-ba almak zerurdyr. 2.50-nji suratda U_{12} we U_{11} naprýaženiýeleriň he-mişelik ululyklarynda hem-de $U_{12}/U_{11} = 0,5$ bolan ýagdaýy üçin gur-lan M_1 , M_2 , M momentleriň s -e bolan baglanyşyklary görkezilendir.

2.50-nji suratdan görnüşi ýaly hereketlendirijiniň jemleýji mo-mentiniň esasyny göni yzygiderliligiň aýlaýjy momenti düzýär. Ters yzygiderliligiň momenti göni yzygiderliligiň momentini gowşadýar. Has takygy ters yzygiderliligiň momenti hereketlendirijide tormozlaý-jy moment döredýär. Bu bolsa öz gezeginde hereketlendirijidäki ýit-

gileriň ösmegine, onuň gyzmagyna, hereketlendirijiniň peýdaly täsir koeffisiýentiniň peselmegine getirýär. Ýokarda aýdylanlardan mälim bolşy ýaly setiň naprýaženiýeleriniň simmetrik ýagdaýynyň saklanymazlygy hereketlendirijiniň iş düzgünlerine ýaramaz täsir edýär. Emma kähatlarda hereketlendirijilerde simmetrik däl iş düzgünleri onuň ýörite aýratyn häsiýetnamalaryny almak üçin hem ulanylýar.



2.50-nji surat. Asinhron hereketlendirijiniň göni (M_1), ters (M_2) yzygiderlikleriniň we jemleýji (M) momentleriniň (s) typma bolan baglanyşyklary

Asinhron hereketlendirijileriň rotorynyň simmetrik däl faza garşylyklarynda iş düzgünleriniň hasaplanylýşy.

Faza rotorly asinhron hereketlendirijilerde rotoryň bir fazanyň kontakt halkasy bilen çotganyň arasynda kontaktynyň bolmazlygy, gysga birleşdirilen rotorly hereketlendirijilerde rotoryň sterženleri guýulanda bir ýa-da birnäçe sterženiň birikmän galmagy we ş.m. netijesinde rotoryň fazalarynyň garşylyklarynyň simmetrik ýagdaýy saklanylmaýar. Rotoryň simmetrik däl faza garşylyklarynyň onuň iş düzgünine edýän täsirine seredeliň.

Goý, rotoryň üçfazaly sarymy bar diýeliň. Setiň simmetrik naprýaženiýesiniň täsirinde statoryň sarymlaryndan f_1 ýygyllykly $I_1 = I_{11}$ tok geçýär. Bu toklaryň statorda döreden göni yzygiderliligiň aýlanýan magnit meýdany rotoryň zynjyrynda $f_2 = s \cdot f_1$ ýygyllykly E_{2s} elektrik hereketlendiriji güýji indusirleýär. Rotoryň fazalarynyň garşylyklarynyň simmetrik däldigi sebäpli onuň fazalarynda ýüze çykýan toklar öz ululyklary boýunça biri-birinden tapawutlanýarlar. Hasaplamlary ýerine ýetirmek üçin rotoryň simmetrik däl toklary göni I_{21} we ters I_{22} yzygiderliligiň toklaryna dargadylýar.

Göni we ters yzygiderliligiň I_{21} we I_{22} simmetrik toklar ulgamlarynyň her biri rotorda aýratynlykda aýlanýan magnit meýdanlaryny döredýärler. Bu magnit meýdanlaryň rotora görä deň burç tizlikleri bardyr:

$$\frac{2\pi \cdot f_2}{p} = \frac{2\pi \cdot f_1 \cdot s}{p} = \omega_1 \cdot s. \quad (2.66)$$

Rotoryň göni we ters yzygiderliliginiň toklarynyň fazalarynyň gezekleşip gelşiniň tapawutly bolýanlygy sebäpli bu magnit meýdanlar garşylykly taraplara aýlanýarlar. Ýagny göni yzygiderliligiň magnit meýdany rotoryň hereketiniň ugruna tarap, ters yzygiderliligiň magnit meýdany bolsa, rotoryň hereketiniň tersine tarap aýlanýar. Bu magnit meýdanlar hereket etmeýän statora görä dürli tizlik bilen aýlanýar. Rotoryň göni yzygiderliliginiň magnit meýdany giňişlikde statora görä:

$$\omega + s \cdot \omega_1 = \omega_1 \cdot (1 - s) + \omega_1 \cdot s = \omega_1 \quad (2.67)$$

aýlaw ýygyllyk bilen hereket edýär. Bu ýerden görnüşi ýaly, rotoryň göni yzygiderliliginiň magnit meýdany statoryň I_n toguň döreden magnit meýdany bilen deň tizlikde aýlanýar. Netijede, I_{21} we I_n toklar göni yzygiderliligiň Φ_1 jemleýji aýlanýan magnit akymyny emele getirýär. I_{21} tok bilen Φ_1 magnit akymy göni yzygiderliligiň M_1 aýlaýjy momentini döredýär. Rotoryň ters yzygiderliliginiň magnit meýdany giňişlikde statora görä:

$$\omega - s \cdot \omega_1 = \omega_1 \cdot (1 - s) - s \cdot \omega_1 = \omega_1 - \omega_1 \cdot s - s \cdot \omega_1 = \omega_1 \cdot (1 - 2 \cdot s) \quad (2.68)$$

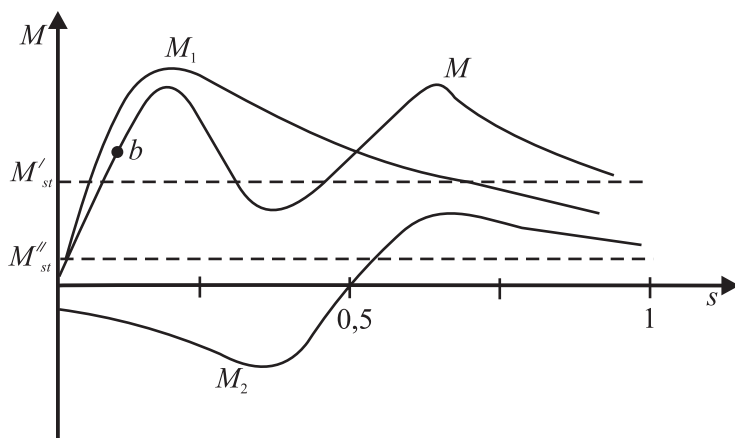
tizlik bilen hereket edýär. Bu magnit meýdan statorda $f_3 = (1 - 2 \cdot s) \cdot f_1$ ýygyllykly elektrik hereketlendiriji güýji we I_{12} togy döredýär.

Setiň garşylygynyň hereketlendirijiniň garşylygy bilen deňeşdirilende örän azlygy sebäpli, I_{12} tok setiň üsti arkaly gysga birleşdirilen diýlip kabul edilýär. I_{22} we I_{12} toklar hereketlendirijide ters yzygiderliligiň Φ_2 aýlanýan magnit akymyny döredýär. I_{12} tok bilen Φ_2 magnit akymy ters yzygiderliligiň M_2 aýlaýjy momentini döredýär. Netijede rotoryň fazalarynyň garşylyklarynyň simmetrik ýagdaýy saklanylmayan wagtynda hereketlendirijide iki sany aýlaýjy moment ýüze çykýar. Hereketlendirijiniň M aýlaýjy moment M_1 we M_2 momentleriň algebraik jemine deňdir:

$$M = M_1 + M_2 = \left[3 \cdot \left(\underline{I}'_{21} \right)^2 \cdot \frac{R'_2}{s} \pm 3 \cdot \left(\underline{I}_{12} \right)^2 \cdot \frac{R'_2}{1-2s} \right] \cdot \frac{1}{\omega_1}.$$

2.51-nji suratda hereketlendirijiniň rotorynyň simmetrik däl faza garşylyklaryndaky $M = f(s)$ baglanyşyklary görkezilendir.

2.51-nji suratdadan görnüşi ýaly $s = 0,5$ -deň bolanda ters yzygiderliligiň aýlanýan magnit meýdanynyň giňişlikdäki burç tizligi $\omega_1 \cdot (1 - 2s) = 0$ bolýar. Bu ýagdaýda ters yzygiderliligiň meýdany statorda hiç hili elektrik hereketlendiriji güýji we togy döretmeýär ($I_{12} = 0$). Netijede, $M_2 = 0$ bolar.



2.51-nji surat. Rotoryň faza garşylyklarynyň simmetriýasyz wagtyndaky $M = f(s)$ baglanyşygy

Haçan-da $s > 0,5$ bolanda bu meýdan giňişlikde göni yzygiderliligiň magnit meýdanynyň hereketiniň tersine tarap hereket edýär. M_2 moment statory rotoryň hereketiniň tersine tarap aýlajak bolýar. Emma statoryň hereket etmeýändigini sebäpli, ol rotora onuň aýlaw hereketiniň ugruna tarap reaksiýa güýjüni döredýär. Netijede, $s > 0,5$ bolanda göni we ters yzygiderliligiň momentleri goşulýar. $s < 0,5$ bolanda ters yzygiderliligiň momentiniň alamaty otrisatelidir. Jemleýji M momentiň M_1 we M_2 momentleriň algebraik jemine deňdigi sebäpli, typmanyň ululygynyň $s \approx 0,5$ töwereginde $M = f(s)$ baglanyşykda momentiň aşak gaýtmaklygy ýüze çykýar. Simmetrik dældiginiň örän

uly ýagdaýlarynda (meselem: rotoryň bir fazadaky togy $I = 0$ bolanda) $s \approx 0,5$ töwereginde M momentiň ululygynyň otrisatel bolmagy hem mümkin. Bu ýagdaý mehanizmiň M_{st} statiki garşylyk momentiniň ululygy $M'_{st} = \text{const} > M$ bolanda hereketlendirijiniň herekete gelip bilmän togtamak mümkinçiliginiň bardygyny görkezýär.

Eger-de hereketlendiriji $M''_{st} = \text{const}$ ýükde işe goýberilýän bolsa, onda ol herekete geler we häsiýetnamanyň “b., nokadynda uzak wagtlap işleýär. Statoryň togunyň I_{11} we I_{12} toklaryň jemine deňligi hem-de olaryň ýygylyklarynyň $f_1, (1 - 2 \cdot s) \cdot f_1$ biri-birine ýakynlygy sebäpli bu ýagdaýda I_1 toguň ululygynyň üýtgäp durmagyna getirýär.

Sinusoidal däl naprýaženiýeli setden iýmitlenýän asinhron hereketlendirijiler.

Asinhron hereketlendirijileriň aýlaw ýygylygyny sazlamak üçin ulanylýan shemalarda, esasan, ýarymgeçirijili özgerdijiler peýdalanylýar. Ýarymgeçirijili özgerdijilerden iýmitlenýän hereketlendirijilere adatça sinusoidal däl görnüşli naprýaženiýeler berilýär. Analiz üçin sinusoidal däl naprýaženiýeleri garmoniki hatarlara dargadyrlar we her bir garmonikanyň täsiri aýratynlykda hasaplanylýar. Soňra, üsti-üstine goýmak usulyny ulanmak arkaly olar jemlenilýär. Köplenç ýagdaýda hereketlendirijiniň iýmitlenýän sinusoidal däl naprýaženiýesi abssissa okuna görä simmetrik bolýar. Şonuň üçin hatara dargadylanda garmonikalaryň diňe jübüt däl düzüjileri alynýar. Naprýaženiýäniň wagta görä üýtgeýän ýokary ýygylykly garmonikalary biri-birinden amplitudalary we fazalarynyň gezekleşip gelşi hem-de garmonikanyň tertip belgisine ($f_k = K j_1$) bagly bolan f_k ýygylyklary boýunça tapawutlanýarlar. Garmonikanyň tertip belgisiniň ösmegi bilen onuň amplitudasy K esse peselýär. Ýokary ýygylykly garmonikalaryň tertip belgisine görä fazalarynyň özara gezekleşip gelişleri göni we ters bolýarlar. Tertip belgisi $6n - 1$, ($n = 1; 2; 3; \dots$) deň bolan garmonikalaryň, adatça, 1-nji garmonikanyňka görä ters fazalaryň gezekleşip gelşi bardyr. Meselem, 1-nji garmonikanyň B fazasy A fazasyna görä 120° -a süýşýän bolsa, 5-nji garmonika üçin bu süýşme $5 \cdot 120 = 360 + 240^\circ$ bolýar. Tertip belgisi $6n + 1$ bolan garmonikalaryň fazalarynyň göni gezekleşip gelşi bardyr. Meselem,

7-nji garmonikanyň naprýaženiýeleriniň faza tapawudy $7 \cdot 120 = 840 = 2 \cdot 360 + 120^\circ$ bolýar. Üçünji we üçe kratnyý bolan garmonikalaryň dürli fazalarynyň öz aralarynda hiç hili fazalar tapawudy ýokdur. Ýagny olar öz fazalary boýunça biri-biri bilen gabat gelyärler. Tertip belgileri $(6n - 1)$ ýa-da $(6n + 1)$ bolan garmonikalaryň döredýän toklary aýratynlykda statorda aýlanýan magnit meýdanlaryny emele getirýärler. Olaryň emele getirýän magnit meýdanlarynyň burç tizlikleri 1-nji garmonikanyň magnit meýdanynyň burç tizliginden K gezek tapawutlanýarlar.

Eger-de hereketlendirijiniň rotory $\omega = \omega_0 \cdot (1 - s)$ tizlik bilen hereket edýän bolsa, onda onuň K garmonikanyň meýdanyna görä typma koeffisiýenti aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$s_K = \frac{k\omega_0 \pm \omega_0(1-s)}{k\omega_0} = 1 \pm \frac{1}{k} \cdot (1-s). \quad (2.69)$$

Aňlatmada $(-)$ alamat K garmonikanyň meýdany rotoryň ugryna tarap hereket edýän bolsa goýulýar, meýdan rotoryň hereketiniň tersine tarap hereket edýän bolsa, onda $(+)$ alamaty alynýar.

Hereketlendirijiniň kadaly iş düzgüninde 1-nji garmonikanyň magnit meýdanyna görä rotoryň typma koeffisiýentiniň $(s \approx 0,015 \div 0,05)$ örän kiçiligi sebäpli, $s \approx 0$ diýip kabul edilse $s_k = 1 \pm \frac{1}{k}$ diýip ýazyp biliris. Görnüşi ýaly, s_k -nyň ululygy 1-e ýakyndyr. Meselem, 5-nji garmonika üçin $s_k = 1 + \frac{1}{5} = 1,2$; 7-nji garmonika üçin $s_k = 1 - \frac{1}{7} = 0,86$ we ş.m. Garmonikanyň statorda döredýän magnit meýdany bilen rotoryň togunyň özara täsiri netijesinde moment döreýär. Döreýän momentler garmonikanyň belgisine baglylykda rotoryň hereketiniň ugruna we tersine tarap täsir edýärler.

Tertip belgisi $6n + 1$ deň bolan garmonikalar rotoryň hereketiniň ugruna tarap, $6n - 1$ bolanlary bolsa rotoryň hereketiniň tersine tarap moment döredýärler. Ýokary ýygylýan garmonikalaryň döredýän magnit meýdanlarynyň ululyklarynyň örän kiçiligi sebäpli, olaryň döredýän momentlerini hasaba alardan has az bolup, olar jemleýji momentniň örän az bölegini düzýärler.

Üçünji garmonikanyň faza toklarynyň fazalarynyň wagta görä biri-birleri bilen gabat gelýändigini sebäpli, olaryň döredýän jemleýji magnit hereketlendiriji güýçleri we aýlanan magnit meýdany nola deňdir. Şeýlelikde, 3-e kratnyý bolan garmonikalar aýlaýjy moment döretmeýärler. Şeýle-de statoryň sarymlary “Ýyldyz” görnüşli birikdirilende 3-nji garmonikanyň toklarynyň hereket etmegi üçin hiç hili konturyň ýoklugy sebäpli, asinhron hereketlendirijilerde bu garmonika döremeýär.

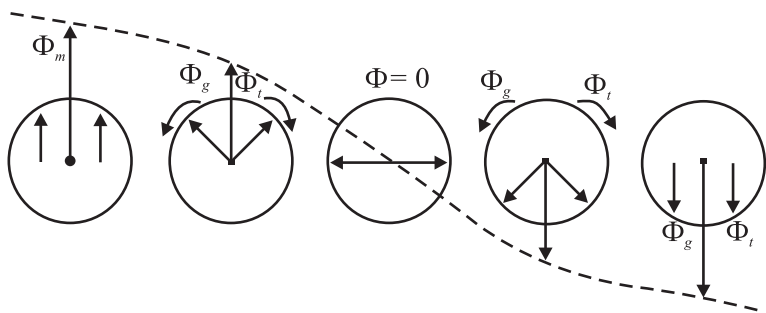
Ýokary ýygyllykly garmonikalaryň alamatlary üýtgeýän momentleri hem bardyr. Olar bir garmonikanyň döredýän togy bilen beýleki bir garmonikanyň döredýän magnit meýdanynyň arasynda ýüze çykýar. Emma olaryň amplitudalarynyň örän kiçiligi sebäpli, bu momentler örän kiçidir. Hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäniň düzüminde ýokary ýygyllykly garmonikanyň bolmagy we ol garmonikalaryň typma koeffisiýentleriniň $s_{kr} \approx 1$ ýakyn ululygynda gysga utgaşma düzgünine ýakyn ýagdaýda işleýändigini sebäpli energiýanyň goşmaça ýitgileriň döremegine getirýär. Sebäbi bu ýagdaýda statoryň sarymlaryndan ýokary garmonikalaryň döredip biljek in uly toklary geçýär. Netijede, hereketlendirijiniň sarymlaryndaky ýitgiler öňkiden $10 \div 25\%$ töweregi ýokarlanýar. Bu ýagdaýda maşynyň temperatura-synyň rugsat berilýän çäkden ýokary geçmeginiň önüni almak üçin onuň kuwwatyny peseltmek zerurlygy ýüze çykýar. Sinusoidal däl naprýaženiýede hereketlendirijide bolýan hadysalary mukdar taýdan analiz etmek üçin 1-nji garmonikanyňka meňzeş çalşyрма shemalar-dan peýdalanylýar. Garmonikalaryň çalşyрма shemalary biri-birinden öz parametrleri boýunça tapawutlanýarlar.

2.2. Birfazaly asinhron hereketlendirijiler

Birfazaly sinusoidal toguň setinden iýmitlenýän asinhron elektrik hereketlendirijilere birfazaly asinhron elektrik hereketlendirijiler diýilýär. Olar, esasan, awtomatikada aýlaw hereketiniň ululygy we ugry üýtgedilmeýän pes kuwwatly mehanizmleri herekete getirmek üçin ulanylýar. Birfazaly asinhron hereketlendirijiler statordan we rotordan durýar. Rotor

öz gurluşy boýunça gysga birleşdirilen rotorly üçfazaly asinhron hereketlendirijiniň rotoryndan hiç hili tapawutlanmaýar. Statoryň 2/3 böleginde işçi sarym, galan 1/3 böleginde bolsa goýberiji sarym ýerleşdirilýär. Goýberiji sarymyň oky bilen işçi sarymyň oky öz aralarynda 90° burçy emele getirýär. İşçi sarym birfazaly sinusoidal toguň setine birikdirilýär. İşçi sarymyň togunyň statorda döredýän magnit hereketlendiriji güýji hereketlendirijiniň işlemegi üçin esasy şertleriň biri bolan aýlanan magnit meýdanyny döredip bilmeýär, ýagny bu magnit meýdan maksimal ululygy $+\Phi_{\max} \div -\Phi_{\max}$ aralykda pulsirlenýän magnit meýdanyny döredýär. Netijede, hereketlendiriji bu ýagdaýda işe goýberilende ol herekete gelip bilmeýär. Emma rotora daşdan mehaniki täsir bolan ýagdaýynda herekete gelýär we belli bir aýlaw ýygrylyk bilen hereket edip başlaýar. Şeýlelikde, birfazaly hereketlendirijini işe goýbermek üçin rotora daşdan mehaniki täsir etmek ýa-da gysga wagtylyk hem bolsa statorda aýlanan magnit meýdanyny döretmek zerurlygy ýüze çykýar.

Birfazaly hereketlendirijiniň işleýşine düşünmek üçin pulsirlenýän Φ_{\max} magnit akymy ululyklary boýunça özara deň, biri-biriniň garşysyna tarap deň ýygrylyk bilen aýlanan iki sany göni we ters magnit akym-laryna dargadalyň: $\Phi_{göni} = \frac{\Phi_{\max}}{2}$; $\Phi_{ters} = \frac{\Phi_{\max}}{2}$ (2.52-nji surat).



2.52-nji surat. Pulsirlenýän Φ_{\max} magnit akymynyň göni we ters aýlanan magnit akym-laryna dargadylyşy

Bular bir minudyň dowamynda aşadaky ýaly aýlawy ýerine ýetirýärler:

$$n_{göni} = n_{ters} = \frac{60 \cdot f}{p} = n_1. \quad (2.70)$$

Analizi ýeňilleşdirmek üçin, magnit akymalaryň rotoryň hereketiniň ugry bilen gabat gelyänini $\Phi_{göni}$ göni, tersine tarap hereket edýänini bolsa Φ_{ters} ters diýip şertleşeliň. Rotoryň n aýlaw ýygylgynyň aýlanýan magnit meýdanynyň sinhron n_1 aýlaw ýygylgynydan azlygy sebäpli, onuň $\Phi_{göni}$ göni aýlanýan magnit meýdanyna görä $s_{göni}$ göni typmasy:

$$s_{göni} = \frac{(n_1 - n)}{n_1} = s. \quad (2.71)$$

Rotoryň, Φ_{ters} ters aýlanýan magnit meýdanyna görä typmasy:

$$s_{ters} = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} = \frac{n_1 + n_1 - n_1 + n}{n_1} = \frac{2n_1}{n_1} - \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 2 - s_{göni} \quad (2.72)$$

$\Phi_{göni}$ we Φ_{ters} aýlanýan magnit akymalary rotorda deňşililikde $E_{2göni}$ we E_{2ters} elektrik hereketlendiriji güýçleri indusirleýär. Olar bolsa öz gezeginde rotoryň zynjyrynda $I_{2göni}$ we I_{2ters} toklary döredýär. Rotoryň togunyň ýygylgynyň s typma koeffisiýentine baglydygy ($f_2 = s \cdot f_1$) sebäpli I_{2ters} ters toguň ýygylgysy $I_{2göni}$ göni toguň ýygylgysy has uludyr. Bir mysala seredeliň:

Goý, hereketlendirijiniň sinhron aýlaw ýygylgylary $n_1 = 1500$ aýl/min; rotoryň aýlaw ýygylgysy $n_2 = 1450$ aýl/min; $f_1 = 50$ Gs deň diýeliň. Onda:

$$s_{göni} = \frac{(n_1 - n)}{n_1} = \frac{(1500 - 1450)}{1500} = 0,033;$$

$$f_{2göni} = s_{göni} \cdot f_1 = 0,033 \cdot 50 = 1,8 \text{ Gs};$$

$$s_{ters} = \frac{(n_1 + n)}{n_1} = \frac{(1500 + 1450)}{1500} = 1,96;$$

$$f_{2ters} = s_{ters} \cdot f_1 = 1,96 \cdot 50 = 98 \text{ Gs}.$$

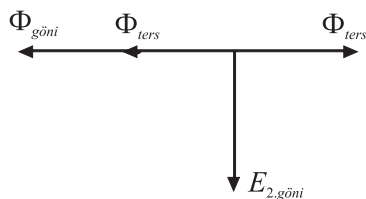
Şu sebäpli rotoryň I_{2ters} ters toga görkezýän induktiw garşylygy ($X_{2ters} = 2nf_{ters}L$) onuň $I_{2göni}$ göni toga görkezýän induktiw garşylygynydan birnäçe esse uludyr. Şeýle-de I_{2ters} ters tok öz häsiýeti boýunça ($R_2 \ll X_{2ters}$) arassa induktiw häsiýetli toga ýakyndyr. Şonuň üçin bu toguň döredýän magnit meýdany göni yzygidedrliğin döredýän magnit meýdanyny magnitsizlendirmäge sarp bolýar (2.53-nji surat).

Netijede, ters tarapa aýlanýan magnit meýdan we onuň ýüze çykarýan M_{ters} momenti göni yzygiderliligiň magnit meýdanyny we onuň aýlaýjy momentini gowşadýar: Netijede rotor M momentiň täsirinde hereket edýär:

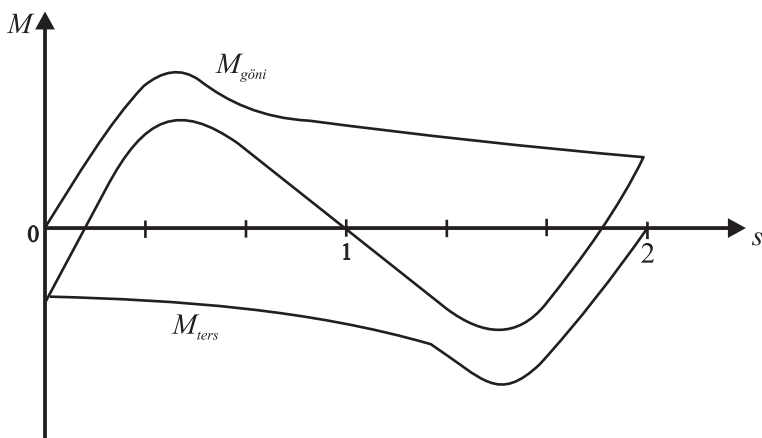
$$M = M_{göni} - M_{ters}. \quad (2.73)$$

Bu ýerde: $M_{göni}$ göni tarapa hereket edýän elektromagnit momenti.

$M = f(s)$ baglanyşygyň grafigi 2.54-nji suratda görkezilendir. Bu baglanyşyk $M_{göni} = f(s)$ we $M_{ters} = f(s)$ iki baglanyşygyň netijesinde alynýar.



2.53-nji surat. Göni we ters magnit akymynyň diagrammasy

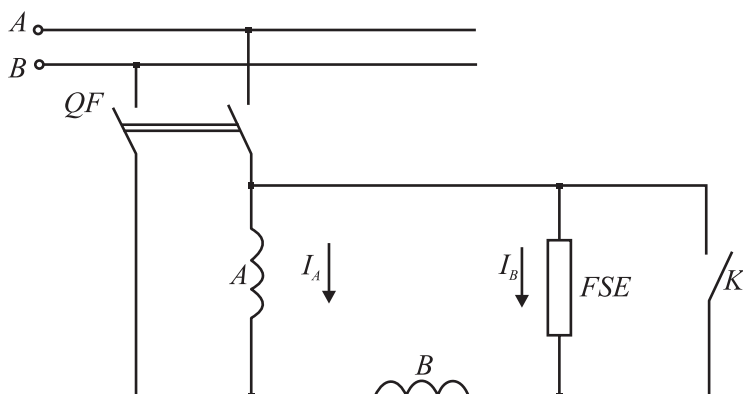


2.54-nji surat. Göni $M_{göni} = f(s)$ we ters $M_{ters} = f(s)$ baglanyşyklar

2.54-nji suratdan görnüşi ýaly, s -iň kiçi ululyklarynda, ýagny hereketlendirijiniň öz nominalyna ýakyn ýükünde, M aýlaýjy moment, esasan, $M_{göni}$ moment tarapyndan döredilýär. Hereketlendiriji işe goýberilen pursatynda $M_{göni}$ we M_{ters} momentleriň ululyklary boýunça özara deňdigi, ugurlary boýunça bolsa biri-birine garşydygy sebäpli, hereketlendirijiniň $M_{başl}$ başlangyç momenti nola deňdir. Şol sebäpli, hereketlendiriji işe goýberilen pursatynda ol öz-özünden herekete gelip bilmeýär. Şeýlelikde, hereketlendirijini işe girizmek üçin hökman: $M_{göni} = M_{ters}$ deňligi bozmak zerurlygy ýüze çykýar.

2.2.1. Birfazaly asinhron hereketlendirijileri işe goýbermegiň şertleri

$M = f(s)$ baglanyşygyň grafiginden görnüşi ýaly (2.54-nji surat), hereketlendirijiniň döredýän goýberiş momenti nola deňdir, ýagny $M_{baş} = 0$. Şol sebäpli in bolmanda hereketlendiriji işe goýberilen pursatynda onuň statorynda magnit meýdan pulsirlenýän däl-de, aýlanýan magnit meýdan bolmaly. Birfazaly hereketlendirijilerde aýlanýan magnit meýdanyny almak üçin, köplenç, statorda oky işçi sarymyň okuna görä 90° burç bilen ýerleşdirilen goýberiji sarym peýdalanylýar. Bu sarymlaryň ikisi hem 2.55-nji suratda görkezilen shema boýunça birfazaly sinusoidal toguň çeşmesine birikdirilýär.



2.55-nji surat. Birfazaly asinhron hereketlendirijini işe goýbermek üçin shema, (A – işçi we B – işe goýberiji sarymlar)

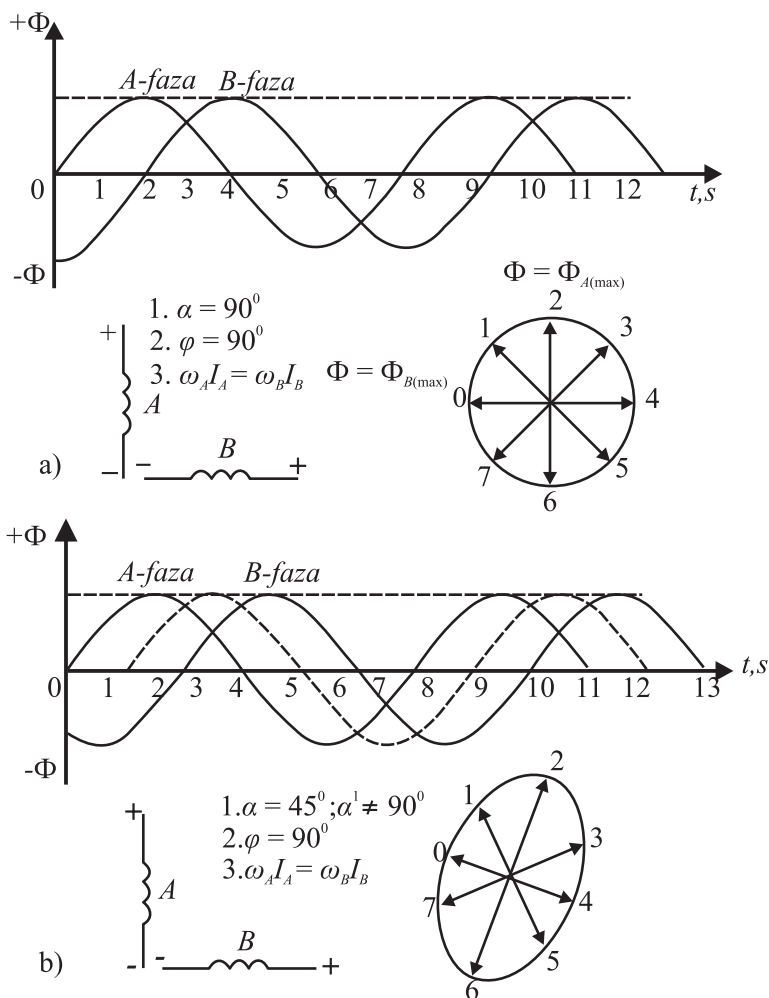
Aýlanýan magnit meýdanyny almak üçin işçi sarymyň I_A we goýberiji sarymyň I_B toklarynyň öz fazalary boýunça biri-birinden tapawutlanmagy zerurdyr. Onuň üçin goýberiji sarymyň zynjyryna, düzüminde aktiw garşylyk, induktiwlik ýa-da sygym elementini saklaýan faza süýşürji element (FSE) birikdirilýär. Hereketlendiriji herekete gelip özüniň nominal aýlaw ýygylgyna ýakyn baranda FSE ýörite merkezden daşlaşýan açar ýa-da rele arkaly zynjyrdan aýrylýar. Statorda töwerek boýunça aýlanýan magnit meýdanyny almak üçin aşakdaky üç sany şerti ýerine ýetirmeli:

1) İşçi we goýberiji sarymlaryň oklary biri-birine görä 90° burçy emele getirmeli, ($\alpha = 90^\circ$).

2) İşçi we goýberiji sarymlaryň toklarynyň wagta görä fazalar tapawudy 90° -a deň bolmaly, ($\varphi = 90^\circ$).

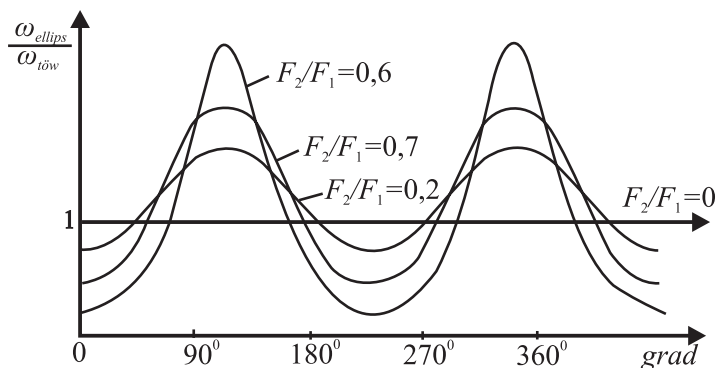
3) İşçi we goýberiji sarymlaryň döredýän magnit hereketlendiriji güýçleri özara deň bolmaly, ($F_A = F_B$; ($\omega_A I_A = \omega_B I_B$); $\Phi = \text{const}$).

Üç şertiň üçüsi hem ýerine ýetirilende statorda töwerek boýunça aýlanýan magnit meýdanynyň alnyşy 2.56-njy *a* suratda görkezilendir.



2.56-njy surat. Bifazaly asinhron hereketlendirijiniň statorynda aýlanýan magnit meýdanyň alnyşy

Eger-de bu şertleriň biri takyk ýerine ýetirilmese, onda statoryň aýlanýan magnit akymynyň godografy töwerek şekilini däl-de, ellipisi emele getirýär (2.56-njy b surat). Şeýle-de bu ýagdaý aýlanýan magnit meýdanynyň pursat tizliginiň wagta görä üýtgemegine getirýär (2.57-nji surat).



2.57-nji surat. Aýlanýan magnit meýdanynyň pursat tiizliginiň wagta görä üýtgeýşi

2.57-nji suratda ω_{tow} töwerek boýunça deňölçegli aýlanýan magnit meýdanynyň burç tizligi, ω_{ellips} ellips boýunça deňölçegsiz aýlanýan magnit meýdanynyň burç tizligi, F_1 göni tarapa aýlanýan magnit meýdanynyň magnitlendiriji güýji, F_2 ters tarapa aýlanýan magnit meýdanynyň magnitlendiriji güýji. 2.57-nji suratda göni we ters tarapa aýlanýan magnit meýdanlaryň magnitlendiriji güýçleriniň F_2/F_1 gatnaşygyna bagly rotoryň pursat tizliginiň üýtgemegi hem görkezilendir. Grafklardan görnüşi ýaly, F_2/F_1 gatnaşygyň ösmegi pursat tizligiň has hem tapawutlanmagyna getirýär. Ellipsoidal meýdana, iki sany biri-biriniň garşysyna hereket edýän göni we ters aýlanýan magnit meýdanlaryň jemi hökmünde seredilýär. Ters tarapa hereket edýän magnit meýdan mydama hereketlendirijide garşylyk momentini döredýär we onuň işçi häsiýetnamalaryna oňaýsyz täsir edýär.

Birfazaly hereketlendirijide töwerek boýunça aýlanýan magnit meýdanyny, onuň sarymlarynyň oklarynyň islendik özara ýerleşen burçynda hem almak mümkindir. Onuň üçin, sarymlaryň magnit hereketlendiriji güýçleriniň ($\omega_A I_A = \omega_B I_B$) deň ýagdaýynda, α we β burçlaryň jeminiň: $\alpha + \varphi = 180^\circ$ deň bolmagy ýeterlikdir. Mysal üçin,

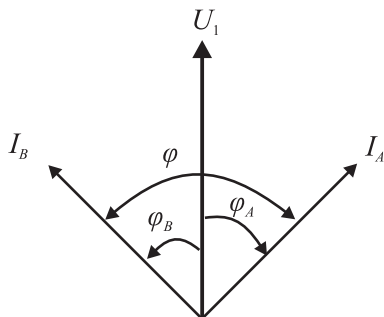
$\alpha = 60^\circ$ bolanda işçi sarymyň I_A we goýberiji sarymyň I_B toklarynyň fazalar tapawudy $\varphi = 180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$ bolmaly. Emma bu ýagdaýda hem töwerek boýunça aýlanýan magnit meýdanynyň ululygynyň kiçelýändigini sebäpli, hereketlendirijiniň energetiki görkezijileri peselýär. Bifazaly hereketlendirijilerde faza süýşürji element hökmünde aktiw garşylygyň we induktiwligiň ulanylmagy energiýa taýdan köp ýagdaýda garaşylýan netijäni bermeýär. Şu sebäpli praktikada köplenç bu maksat üçin c-sygymlý kondensatorlar ulanylýar. Kondensatoryň sygymy, hereketlendiriji işe goýberilen pursatynda ($s = 1$) goýberiji sarymyň togy öz fazasy boýunça naprýaženiýeden φ_B burç öňe düşer ýaly edip alynýar, ýagny $\varphi = \varphi_B - \varphi_A = 90^\circ$ bolar ýaly edilýär. Bu ýerde: φ_A – işçi sarymyň togy bilen naprýaženiýäniň arasyndaky fazalar tapawudy.

Eger-de işe goýberiliş pursatynda sarymlaryň magnit hereketlendiriji güýçleri özara deň bolsa ($F_A = F_B$) onda hereketlendiriji belli bir başlangyç moment bilen herekete gelip başlaýar. Kondensatorly bifazaly hereketlendirijiniň toklaryň diagrammasy 2.58-nji suratda görkezilendir.

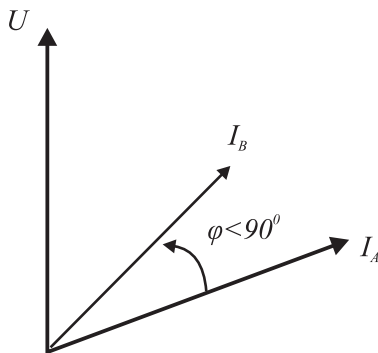
Şeýlelikde, faza süýşürji elementleriň içinde kondensator garaşylýan netijäni berýär. Şeýle-de kondensator diňe bir töwerek boýunça aýlanýan magnit meýdanyny almaga ýardam etmek bilen çäklenmän, aýlaýjy momenti setden alynýan toguň minimal ululygyny döretmäge hem mümkinçilik berýär. Emma faza süýşürji element hökmünde ulanylýan kondensatoryň tutýan göwrüminiň uludygy, şeýle hem sygymyň käbir ululyklarynda işe goýberiji sarymyň zynjyrynyň düzümine girýän elementlerde naprýaženiýäniň setiň naprýaženiýesinden $U_c = U_1 \sqrt{1 + K^2}$ esse ýokary geçýändigini sebäpli, onuň ulanylyşynda käbir çäklendirmeler ýüze çykýar ($K = \omega_B / \omega_A$ transformasiýa koeffisiýenti). Meselem, kuwwaty 200 Wt bolan hereketlendiriji işe goýberilen pursaty töwerek boýunça aýlanýan magnit meýdanyny almak üçin sygymy $c = 30$ mkF bolan kondensator gerek.

Kabir halatlarda faza süýşürji element hökmünde kondensator bilen bir hatarda aktiw garşylyk hem ulanylýar. Hereketlendiriji işe goýberilşen pursatynda goýberiji sarymyň sete az wagtlyk birikdirilýändigini sebäpli, onuň aktiw garşylygy uly bolar ýaly ol inçe simden saralýar. Şeýle-de bu sarymyň induktiwligini aýyrmak üçin onuň sarymy bifilýar saralýar. Netijede, goýberiji sarym işçi sarymdan özüniň

uly aktiw garşylygy bilen tapawutlanýar. Bu ýagdaýda I_A we I_B toklaryň fazalar tapawudy 90° -a ýetmeýän hem bolsa, bu usul uly goýberiş momenti talap etmeýän mehanizmleri herekete getirmek üçin ulanylýan hereketlendirijilerde peýdalanylýar (2.59-njy surat).



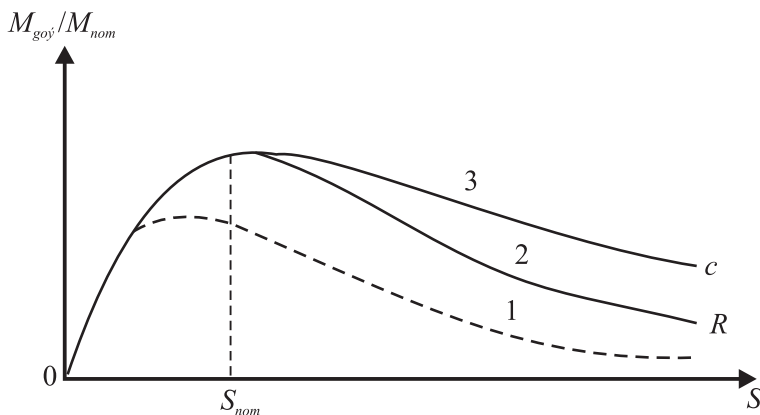
2.58-nji surat. Kondensatorly asinhron hereketlendirijiniň toklarynyň diagrammasy



2.59-nji surat. Aktiw garşylykly asinhron hereketlendirijiniň toklarynyň diagrammasy

Bu hereketlendirijiler üçin: $\frac{M_{goý}}{M_{nom}} = 1,0 \mid 1,5$ we $\frac{I_{goý}}{I_{nom}} = 5 \mid 9$.

2.60-njy suratda faza süýşürji elementsiz (1), faza süýşürji element hökmünde aktiw garşylyk (2), sygym (3) ulanylýan hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamalary görkezilendir.



2.60-njy surat. Birmfazaly asinhron hereketlendirijiniň faza süýşürji elementsiz (1), aktiw garşylykly (2), kondensatorly (3) mehaniki häsiýetnamalary

Kondensatorly hereketlendirijilerde töwerek boýunça aýlanýan magnit meýdanyny almak üçin gerek sygymyň ululygy mümkin bolan üç usulda aşakdaky ýaly kesgitlenýär:

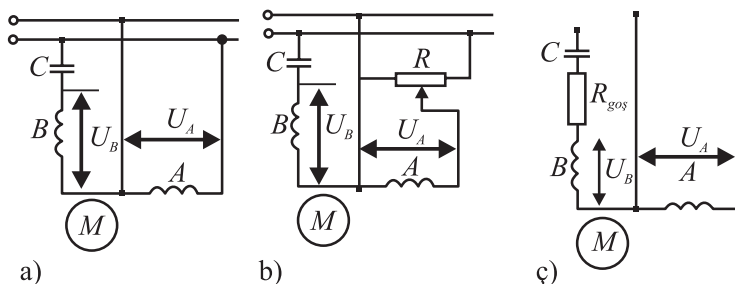
U_1 naprýaženiýäniň berlen ululygynda hereketlendirijiniň transformasiýa koeffisiýenti $K = \operatorname{tg} \varphi_A$ bolanda kondensatoryň sygymy:

$$C_{\text{işci}} = \frac{I_A \cdot \cos \varphi_A \cdot 10^6}{2\pi f_1 U_1 \cdot K}, \quad (2.74)$$

bu ýerde φ_A – işçi sarymyň I_A togy bilen U_1 naprýaženiýäniň arasyndaky fazalar tapawudy; $K = \frac{\omega_B \cdot K_B}{\omega_A \cdot K_A}$; ω_A we ω_B degişlilikde A we B

sarymlaryň sargylarynyň sany; K_B we K_A degişlilikde B we A sarymlaryň sarym koeffisiýentleri.

Seredilýän ýagdaý üçin hereketlendirijiniň birikdiriliş shemasy 2.61-nji *a* suratda görkezilendir.



2.61-nji surat. Kondensatorly birfazaly asinhron hereketlendirijileriň birikdiriliş shemalary

2) Hereketlendirijiniň $K = \frac{\omega_B \cdot K_B}{\omega_A \cdot K_A}$ transformasiýa koeffisiýentinde we naprýaženiýeleriň $\frac{U_A}{U_B} = \frac{\operatorname{tg} \varphi_A}{K}$ gatnaşygynda töwerek boýunça aýlanýan magnit meýdanyny almak üçin gerek bolan sygym:

$$C_{\text{işci}} = \frac{I_A \cdot \cos \varphi_A \cdot 10^6}{2\pi f_1 U_1 \cdot K}. \quad (2.75)$$

Bu ýagdaý üçin hereketlendirijiniň birikdiriliş shemasy 2.61-nji *b* suratda görkezilendir.

3) (U_1) napryáženíýäniñ we hereketlendirijiniñ transformasiýa $K < \operatorname{tg} \varphi_A$ koeffisiýentinde, sygyrna hem-de oña yzygider birikdirilýän $R_{\text{goş}}$ goşmaça garşylyk degişlilikde aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$C_{\text{işci}} = \frac{I_A \cdot 10^6}{2\pi f \cdot U_1 \cdot K \cdot \cos \varphi_A \cdot (K \cdot \operatorname{tg} \varphi_A + 1)}, \quad (2.76)$$

$$R_{\text{goş}} = \frac{U_1 \cdot K}{I \cdot \cos \varphi_A} \cdot (\operatorname{tg} \varphi_A - K). \quad (2.77)$$

Bu ýagdaý üçin hereketlendirijiniñ birikdiriliş shemasy 2.61-nji ç suratda görkezilendir. (2.74), (2.75) we (2.76) aňlatmalardan görnüşi ýaly töwerek boýunça aýlanýan magnit meýdanyny almak üçin gerek bolan kondensatoryň C sygymy K koeffisiýentiň (birinji ýagdaý), U_A/U_B gatnaşygyň (ikinci ýagdaý) hem-de $R_{\text{goş}}$ goşmaça garşylygyň (üçünji ýagdaý) diňe bir ululygynda döredip bilýär.

Hereketlendirijiniñ iş düzgüniniñ üýtgemegi (onuň okuna goýlan ýüküň üýtgemegi) φ_A fazalar tapawudynyň üýtgemegine getirýär. Bu bolsa öz gezeginde töwerek boýunça aýlanýan magnit meýdanynyň ellipsoidal görnüşe geçmegine we hereketlendirijiniñ energetiki görkezijileriniň pese düşmegine getirýär.

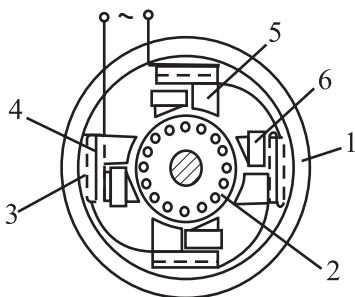
Töwerek boýunça aýlanýan magnit meýdany bolan kondensatorly hereketlendirijiniñ kuwwat koeffisiýenti $\cos \varphi = 0,8 \div 0,95$, peýdaly täsir koeffisiýenti $\eta = (60 \div 70\%)$ -e ýetirýär. Emma bu hereketlendirijiniñ goýberiliş momentiniñ nominal momentine bolan gatnaşygy $M_{\text{goş}}/M_{\text{nom}} \approx 0,5$. Şeýle ýagdaý hereketlendiriji işe goýberilen pursatynda aýlanýan magnit meýdanyň ellipsoidal dældigi bilen düşündirilýär. Hereketlendirijiniñ goýberiş momentini ýokarlandyrmak üçin kondensatora parallel goşmaça $C_{\text{goş}}$ goşmaça kondensator birikdirilýär. Goşmaça kondensatoryň sygymy $C_{\text{işci}}$ işçi sygymyňkydan has uly bolmaly ($C_{\text{goş}} = (2 \div 3) C_{\text{işci}}$). Hereketlendiriji nominal aýlaw ýygylýgyna ýakyn baranda $C_{\text{goş}}$ goşmaça sygym zynjyrdan ýörite rele arkaly aýrylýar. Hereketlendirijä kondensator birikdirilen hereketlendirijiniñ maksimal goýberiliş momentini almak üçin gerek bolan kondensatoryň reaktiw garşylygy we sygymy degişlilikde aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$X_C = X_B + \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}; \quad (2.78)$$

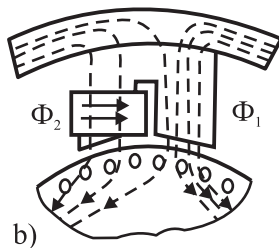
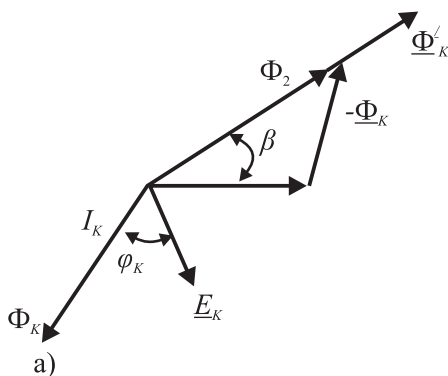
$$C = \frac{1}{2\pi f \cdot X_c}. \quad (2.79)$$

2.2.2. Polýuslary ekranlanan birfazaly asinhron hereketlendirijiler

Polýuslary ekranlanan birfazaly asinhron hereketlendiriji statordan (1) we gysga birleşdirilen rotordan (2) ybaratdyr. Statoryň polýuslarynyň açyk göze görünüp duran konstruksiýasy bar. Polýuslaryň serdeçniginde (3) birfazaly sinusoidal toguň setinden ýymitlenýän sarymlar (4) ýerleşdirilýär. Bu sarymlar özara yzygider birikdirilýär. Polýuslaryň uçlary ýörite pazyň (5) kömegi arkaly iki sany özara deň bolmadyk bölege bölünýär. Polýusyň uçlarynyň kiçi bölegine mis simden saralan gysga birleşdirilen sarym (ekran) (6) geýdirilýär (2.62-nji surat).



2.62-nji surat. Polýuslary ekranlanan birfazaly asinhron hereketlendirijiniň elektromagnit shemasy



2.63-nji surat. Statoryň magnit akymalarynyň diagrammalara (a), polýuslary ekranlanan we ekranlanmadyk bölekleriň ýerleşdirilişi

Hereketlendirijiniň statorynda aýlanýan magnit meýdanyny almak üçin wagta görä we giňişlikde biri-birinden belli bir burça süýşürilen, azyndan iki sany magnit meýdanyň bolmagy zerurdyr. Seredilýän hereketlendirijide bu mesele aşakdaky ýaly çözülýär.

Statoryň sarymlary sinusoidal toguň setine birikdirilen wagtynda sarymda pulsirlenýän magnit akymy emele gelýär (2.63-nji b surat). Bu akymyň polýusyň ekranlanmadyk böleginden geçýänini Φ_1 bilen, ekranlanan böleginden geçýänini bolsa Φ_2 bilen belläliň. Φ_2 magnit akymy gysga birleşdirilen sarymda (ekranda) E_K elektrik hereketlendiriji güýji indusirleýär. E_K elektrik hereketlendiriji güýjüň täsirinde I_K tok döredýär. Bu tok Φ_K magnit akymyny döredýär (2.63-nji a surat).

Diagrammadan görnüşi ýaly, Φ_K magnit akymy Φ'_2 akym bilen bilelikde (2.60-njy a surat). Polýusyň ekranlanan böleginde jemleýji $\Phi_2 = \Phi'_2 + \Phi_K$ akymy döredýär. Bu akym Φ_1 akymdan öz fazasy boýunça β burça tapawutlanýar. Φ_1 we Φ_2 magnit akymalaryň giňişlikde wagta görä fazalar tapawudynyň bolmagy statorda aýlanýan magnit meýdanynyň döremegine getirýär. Emma Φ_1 we Φ_2 akymalaryň ululyklary boýunça tapawutlanmagy we β burçuň 90° -dan tapawutly bolmagy, emele gelýän aýlanýan magnit meýdanynyň ellipsoidal däl bolmagyna getirýär. Netijede, hereketlendirijiniň goýberiş momentleri pes bolýar. Kähalatlarda magnit akymalaryň ululyklaryny özara deňlemek üçin polýuslaryň ekranlanmadyk bölegi bilen rotoryň arasyndaky howa boşluk giň edilip taýýarlanýar.

Seredilýän hereketlendirijileriň parametrleri degişlilikde:

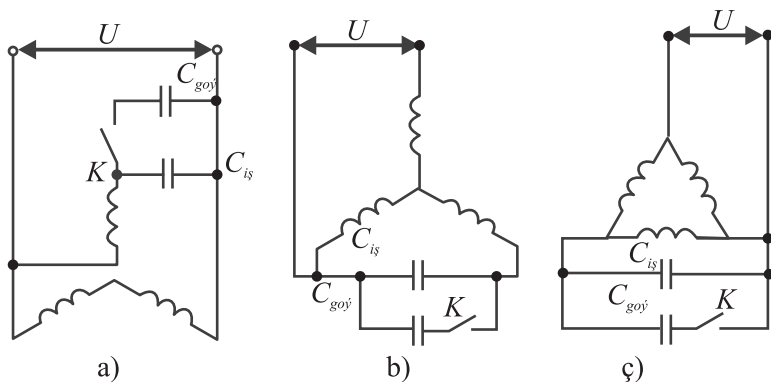
$$\frac{M_{goy}}{M_n} \leq 0,6; \quad \frac{M_{max}}{M_{nom}} = 1,1 \mid 1,3;$$

$$\eta = 10 \mid 40\%; \quad \cos \varphi = 0,4 \mid 0,6.$$

Energiýanyň esasy ýitgileri hereketlendirijiniň gysga birleşdirilen sarymlarynda ýüze çykýar. Ekranlanan polýusly hereketlendirijilerde aýlaw hereketiniň ugruny üýtgedip bolmaýandygy sebäpli, köplenç rotoryň oky onuň iki tarapyndan hem daşyna çykarylýar.

2.2.3. Üçfazly asinhron hereketlendirijileri birfazly hereketlendiriji hökmünde ulanmak

Üçfazly asinhron hereketlendirijiler 2.64-nji suratdaky shemalar boýunça birfazly toguň setinden iýmittenip hem işläp bilýärler.



2.64-nji surat. Üçfazly asinhron hereketlendirijileriň birfazly toguň setine birikdirmek üçin shemalar

Ýygylgy $f = 50$ Gs-e deň bolan sinusoidal toguň setine birikdiriljek hereketlendirijä gerek bolan $C_{i\dot{\varsigma}ci}$ işçi sygymyň ululygy 2.64-nji suratdaky *a*, *b* we *ç* shemalar üçin deňişlilikde takmynan aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$C_{i\dot{\varsigma}ci} = 2700 \frac{I_1}{U}, (\text{mkF}); \quad C_{i\dot{\varsigma}ci} = 2800 \frac{I_1}{U}, (\text{mkF}); \quad C_{i\dot{\varsigma}ci} = 4800 \frac{I_1}{U}, (\text{mkF})$$

bu aňlatmalarda I_1 – hereketlendirijiniň faza togy, U – setiň naprýaženiýesi.

Hasaplanyp alnan $C_{i\dot{\varsigma}ci}$ işçi sygymlarda hereketlendirijiniň faza togunyň onuň nominal togundan ýokary geçmegine ýol berilmeýär.

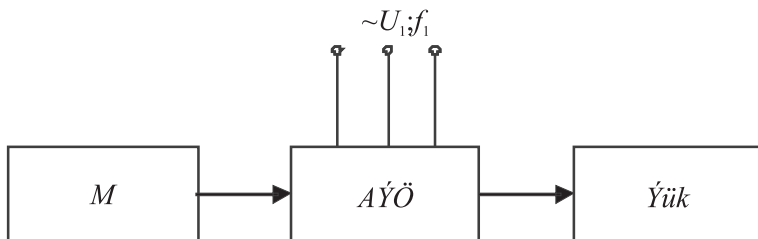
Eger-de hereketlendiriji uly goýberiş momentli mehanizmleri herekete getirýän bolsa, onda $C_{i\dot{\varsigma}ci}$ işçi sygyma parallel goşmaça $C_{gos} \approx (2,5 \div 3) C_{i\dot{\varsigma}ci}$ sygym birikdirilýär. Bu ýagdaýda hereketlendirijiniň goýberiş momenti onuň nominal momentine deň bolýar. Hereketlendirijiniň goýberiş momentini onuň maksimal momentine ýetirmek üçin kondensatoryň C_{gos} goşmaça sygymy: $C_{gos} \approx 8C_{i\dot{\varsigma}ci}$ çenli ýetirilýär.

Ekspluatasiýa döwründe hereketlendirijiniň durnukly işlemegi üçin kondensatoryň $C_{işçi}$ işçi sygymy bilen onuň naprýaženiýesiniň hem dogry saýlanyp alynmagy zerurdyr. Kondensatoryň naprýaženiýesiniň gerekinden aşa uly alynmagy onuň göwrüminiň we togunyň ýokarlanmagyna hem-de onuň tiz hatardan çykmagyna getirýär. Kondensatoryň naprýaženiýesi 2.64-nji a , b we ϵ suratlardaky shemalar üçin degişlilikde: $U_k \approx 1,3U_C$, $U_k \approx 1,15U_C$ edilip alynýar. Kondensatory üýtgeýän toguň zynjyrynda ulanmak üçin, ondaky naprýaženiýe ika bölünýär. Meselem, ýazgy: $U = 600$ W bolsa, ol üýtgeýän tok üçin: $U = \frac{600}{2} = 300$ W diýip kabul edilýär.

2.3. Ýörite niýetlenen asinhron maşynlar

2.3.1. Asinhron ýygylýk özgerdijiler

Asinhron maşyny ýygylýk özgerdiji hökmünde peýdalanmagyň mümkinçiligi rotorda ýüze çykýan toguň ýygylýgy üçin ýazylýan: $f_2 = sf_1$ deňlikden gelip çykýar. Typma koeffisiýentini üýtgetmek arkaly f_2 ýygylýgy f_1 ýygylýk bilen deňeşdirilende ýokarlandyrmak ($s > 1$) ýa-da peseltmek ($s < 1$) mümkindir. Asinhron ýygylýk özgerdijiler (AÝÖ), esasan, ýygylýgy 50 Gs₂-den 100 Gs₂-e we 150 Gs₂-e ýokarlandyrmak üçin peýdalanylýar. Bu ýygylýklar aýlaw ýygylýgy $n > 3000$ aýl/min ýokary bolan asinhron hereketlendirijileri iýmitlendirmek üçin peýdalanylýar. Asinhron ýygylýk özgerdijiniň gurluşy 2.65-nji suratda görkezilendir.



2.65-nji surat.
Asinhron ýygylýk özgerdijiniň gurluşy

Asinhron ýygýlyk özgerdiji AÝÖ kontakt halkaly asinhron hereketlendirijiden we ony herekete getirýän M hereketlendirijiden ybaratdyr. Asinhron ýygýlyk özgerdijiniň statoryna f_1 ýygýlykly üçfazaly üýtgeýän tok berilýär we onuň rotoryndan kontakt halkalaryň we çotgalaryň kömegi arkaly f_2 ýygýlykly üýtgeýän tok alynýar. Rotoryň zynjyryndan daşa berilýän kuwwatyň bir bölegi statorda ýüze çykýan elektromagnit kuwwatyň hasabyna, galan bölegi bolsa M hereketlendiriji tarapyndan berilýän mehaniki kuwwatyň hasabyna alynýar.

Rotoryň doly aktiw kuwwaty:

$$P_{E.2} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot \sum R_2, \quad (2.80)$$

bu aňlatmada $\sum R_2$ – rotoryň we ondan iýmitlenýän ýüküň garşylyklarynyň jemi.

Rotora elektromagnit meýdanynyň üsti arkaly berilýän kuwwat:

$$P_{12} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot \frac{\sum R_2}{s} = P_{E.2} \cdot \frac{1}{s}. \quad (2.81)$$

Özgerdijä hereketlendiriji tarapyndan berilýän kuwwat:

$$P_2 = P_{E.2} - P_{12} = P_{E.2} \cdot \left(1 - \frac{1}{s}\right). \quad (2.82)$$

Bu kuwwatlaryň arasyndaky gatnaşyk aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$\frac{P_{12}}{P_2} = \frac{1}{(s-1)}.$$

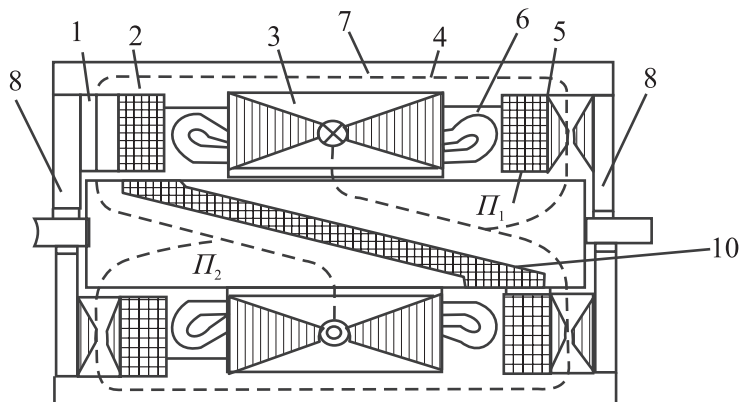
Eger-de $s = 2$ diýsek $f_2 = 2f_1$, $P_{12} = P_2$ bolar. Eger f_2 ýygýlygy sazlamaklyk zerur bolmasa onda ýygýlyk özgerdijini herekete getirmek üçin gysga birleşdirilen rotorly asinhron hereketlendiriji peýdalanylýar.

2.3.2. Selsinler

Selsinler özara mehaniki baglanyşygy bolmadyk iki we ondan köp oklary sinhron öwürmek ýa-da aýlamak üçin ýörite niýetlenen

elektrik maşyny bolup, olar taýýarlanylşy boýunça kontaktly we kontaktsyz görnüşlere bölünýärler. Kontaktly selsinleriň statorynda birfazaly sarym ýerleşdirilýär we ol üýtgeýän toguň setine birikdirilýär. Bu saryma oýandyryjy sarym diýip at berilýär. Rotorynyň pazlarynda oklary giňişlikde biri-birine görä 120° burç bilen ýerleşdirilen üç sany birmeňzeş sarymlar ýerleşdirilýär. Bu sarymlaryň bir uçlary “Ýyldyz” görnüşli, beýleki uçlary bolsa kontakt halkalara birikdirilýär. Kontakt halkalaryň üstüne degip duran hereketsiz çotgalaryň kömegi arakly rotor daşky zynjyra birikdirilýär. Rotoryň sarymlaryna sinhronlaşdyryjy sarymlar diýilýär. Statoryň we rotoryň serdeçnikleri elektrotehniki polat plastinkalardan ýygnaýlar. Kähalatlarda sinhronlaşdyryjy sarymlar statorda, oýandyryjy sarymlar bolsa rotorda ýerleşdirilýär.

Häzirki döwürde köpçülikleýin kontaktsyz selsinler peýdalanylýar. Bu görnüşli selsinlerde kontakt halkalar ýok, bu bolsa olaryň ygtybarlylygyny we takyklygyny ýokarlandyrýar. Kontaktsyz selsinlerde oýandyryjy we sinhronlaşdyryjy sarymlar statorda ýerleşdirilýär. Rotorda bolsa hiç-hili sarym ýerleşdirilmeýär (2.66-njy surat).

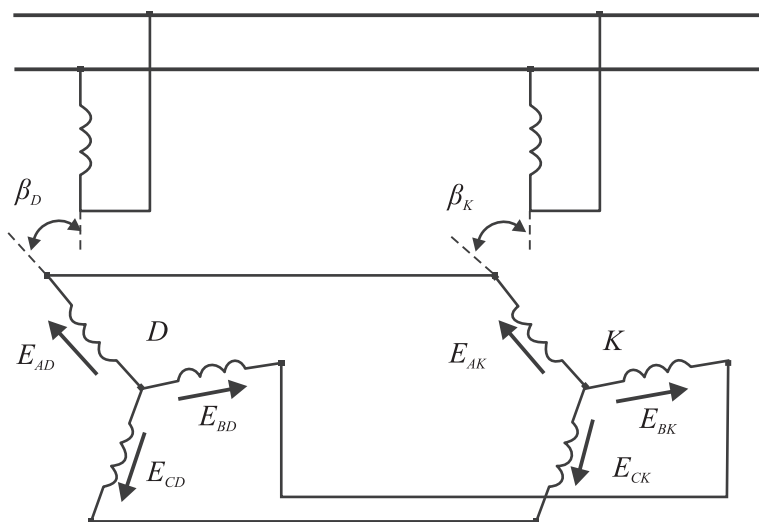


2.66-njy surat. Kontaktsyz selsiniň gurluşy

Rotor polat plastinkalardan ýygnaýan iki sany Π_1 we Π_2 paketlerden (5) ybarat bolup olaryň aralyklary keseligine magnit däl material (10) bilen bölünendir. Netijede, rotoryň magnit meýdany iki bölekden ybarat bolýar.

Rotoryň paketleriniň plastinkalary onuň okuna parallel ýerleşdirilýär. Statoryň magnitgeçiriji paketiniň adaty konstruksiýasy bolup onuň pazlarynda sinhronlaşdyryjy sarymlar (6) ýerleşdirilýär. Oýandyryjy sarymlar (2) halka görnüşli iki sany sarymlardan ybarat bolup olaryň oklary rotoryň oky bilen gabat gelýär. Oýandyryjy sarymyň döredýän magnit akymlary Π_1 polýusdan Π_2 polýusa diňe gapdal tarapky ganatyň (8) we polat plastinkalardan taýýarlanan daşky magnitgeçirijileriň (7) hem-de statoryň dişleriniň we onuň ýarmolarynyň üsti arkaly geçýär. Soňra ilki başdaky Π_1 polýusyna gelýär. Statoryň dişli böleginde oýandyryjy sarymlar tarapyndan döredilen magnit akymlary sinhronlaşdyryjy sarymlaryň sargylaryny kesip geçýär we olarda elektrik hereketlendiriji güýji indusirleýär. Emele gelen elektrik hereketlendiriji güýç statordan daşyna çykarylýar. Rotoryň ýerleşişiniň üýtgemegi bilen statoryň sarymlaryndaky elektrik hereketlendiriji güýjüň ululyklary hem üýtgeýär.

Selsinler özleriniň niýetlenilişine we iş düzgünlerine baglylykda indikator, transformator hem-de differensial iş düzgünlerinde işleýän selsinlere bölünýärler. Indikator iş düzgüninde işleýän selsinleriň shemasy 2.67-nji suratda görkezilendir.

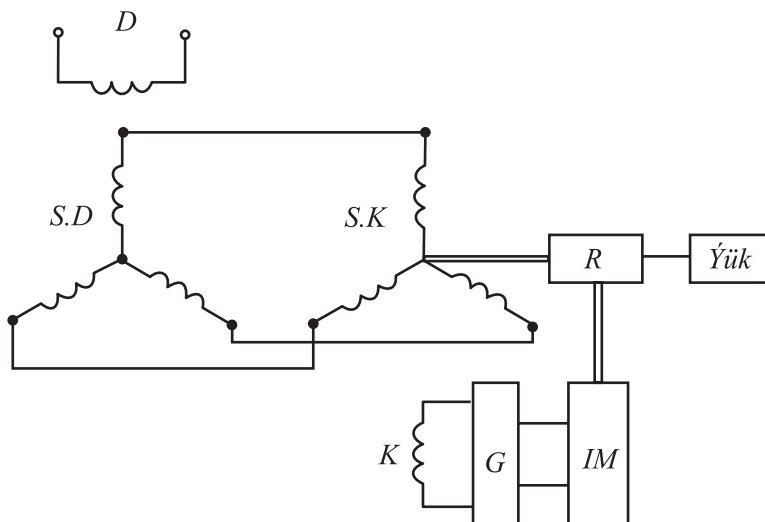


2.67-nji surat. Indikator iş düzgüninde işleýän selsinleriň birikdiriliş shemasy

Bu selsinleriň birine datçik (D), beýlekisine bolsa kabulediji (K) diýilýär. Kähallatlarda bir datçik birnäçe kabulediji selsinleri dolandyryr. Indikator iş düzgüninde aralyga burç hereketi geçirilýär. Bu ýagdaýda kabulediji selsiniň okuna hiç-hili garşylyk momentini döredýän mehanizm birikdirilmeýär. Datçigiň rotorynyň oky belli bir burça gysardylanda onuň rotorynyň sarymlarynda emele gelýän elektrik hereketlendiriji güýjüň ululygy kabulediji selsiniň rotorynyň deňişli fazasynda emele gelýän elektrik hereketlendiriji güýjüň ululygyndan tapawutlanýar we zynjyrdä deňleşdiriji tok ýüze çykýar. Deňleşdiriji toguň oýandyryjynyň magnit meýdany bilen emele getirýän momentiniň täsirinde kabulediji selsin datçik selsiniň ýagdaýyna çenli, ýagny tä deňleşdiriji tok nola deňleşýänçä öwrülýär. Onuň näçe burça öwrülendigini kabulediji selsiniň okuna birikdirilen peýkamý ýa-da ölçeyji abzalyň şkalasy görkezýär.

Transformator iş düzgüninde işleýän selsinler yzarlaýjy ulgamlarda peýdalanylýar. Gurluşy boýunça bu selsinler induksion iş düzgüninde işleýän selsinlerden hiç-hili tapawutlanmaýar.

Transformator iş düzgüninde işleýän selsinleriň shemasy 2.68-nji suratda görkezilendir.



2.68-nji surat. Transformator baglanyşykly selsinleriň birikdiriliş shemasy

Transformator iş düzgüninde işleýän kabulediji selsin üýtgeýän toguň setine birikdirilmän, ol „G“ güýçlendirijä birikdirilýär. Selsin datçik belli bir burça öwrülende selsin kabuledijide indusirlenýän signal güýçlendirilip işçi mehanizmi (IM) herekete getirýär. Ol hem öz gezeginde reduktoryň üstünden selsin kabuledijini K kabuledijiniň signaly nol ýagdaýa gelyänçä öwürýär.

2.4. Asinhron hereketlendirijilerde geçiş prosesleri

Asinhron elektrik hereketlendirijilerde geçiş prosesleri derňelende köplenç ýagdaýlarda elektromagnit prosesleriň elektromehaniki proseslerden has çalt bolup geçýänligi sebäpli, olar hasaba alynmaýar. Asinhron hereketlendirijiler işe goýberilende ýüze çykýan geçiş prosesler, esasan, olaryň işe goýberiliş şertlerine baglydyr.

Adatça, pes we orta kuwwatly asinhron hereketlendirijiler nominal naprýaženiýeli sete gönümel birikdirilip işe goýberilýär. Emma uly kuwwatly gysga birikdirilen rotorly asinhron hereketlendirijileriň goýberiliş toguny çäklendirmek ýa-da goýberiliş momentini ýokarlandyrmak maksady bilen peseldilen naprýaženiýede işe goýberilýär. Onuň üçin statoryň zynjyryna goşmaça rezistor, reaktor ýa-da tiristorly naprýaženiýe sazlaýjy gurluş birikdirilýär.

Faza rotorly asinhron hereketlendirijiler işe goýberilende rotoryň zynjyryna goşmaça goýberiji rezistor birikdirmek usuly ulanylýar. Rezistoryň işe goýberiji basgançaklarynyň sany we olaryň garşylyklarynyň ululygy işe goýberiliş şertleri bilen kesgitlenýär.

Goý, hereketlendiriji ýüksüz ($M_{st} = 0$) bir basgançakda ýa-da gönümel işe goýberilýär diýeliň. Bu ýagdaý üçin hereketlendirijiniň moment:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_{kr}} + \frac{s_{kr}}{s}}.$$

Aňlatma boýunça kesgitlenýär. Hereketlendirijiniň hereketi deňlemesini aşadaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\frac{2M_k}{\frac{s}{s_{kr}} + \frac{s_{kr}}{s}} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.83)$$

Belli bolşy ýaly: $\omega = \omega_0 (1 - s)$, şeýlelikde:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 \frac{ds}{dt}.$$

(2.83) deňlemedäki üýtgeýän ululyklary bölüp alarys:

$$dt = -\frac{J\omega_0}{2M_{kr}} \cdot \left(\frac{s_{kr}}{s} + \frac{s}{s_{kr}} \right) \cdot ds,$$

ýa-da:

$$dt = -\frac{T_M}{2} \cdot \left(\frac{s_{kr}}{s} + \frac{s}{s_{kr}} \right) \cdot ds, \quad (2.84)$$

bu ýerde $T_M = J\omega_0 / M_{kr}$ – elektromehaniki wagt hemişeligi.

Seredilýän ýagdaý üçin T_M elektromehaniki wagt hemişeligi J – inerisiýa momentli hereketlendirijiniň maksimal M_{kr} momentiniň täsiri astynda ω_0 sinhron burç tizligine çenli batlanýan wagtydyr.

(2.84) deňlemeden hereketlendirijiniň işe goýberiliş wagtyny kesgitleýäris:

$$t_{g,0} = \frac{T_M}{2} \int_{s_{ahyr}}^{s_{baş}} \left(\frac{s_{kr}}{s} + \frac{s}{s_{kr}} \right) ds. \quad (2.85)$$

Hereketlendiriji dynçlyk ýagdaýdan işe goýberilende ($s_{baş} = 1$):

$$t_{g,0} = \frac{T_M}{2} \left(\frac{1-s^2}{2s_{kr}} + s_{kr} \ln \frac{1}{s} \right). \quad (2.86)$$

Eger $s = 0$ diýip kabul etsek, onda $t_{g,0} = \infty$. Haçan-da hereketlendirijiniň typmaklygy özüniň durnuklaşan ululygyndan 0,05-den köp tapawutlanmasa hereketlendirijiniň işe goýberilişi tamamlandy diýip hasap edilýär.

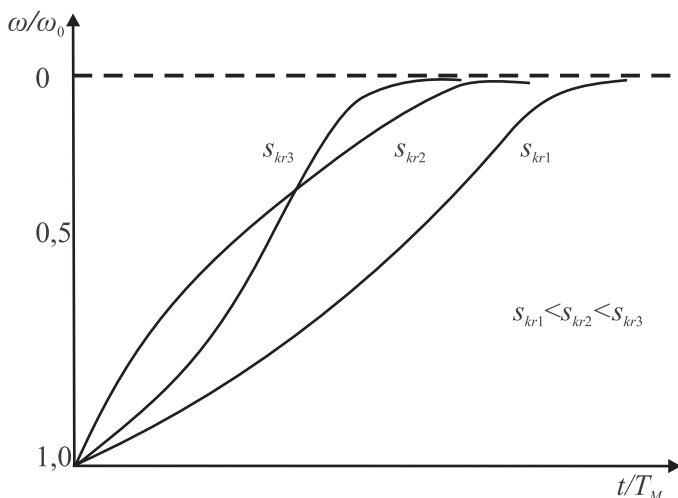
Onda hereketlendirijiniň ýüksüz işe goýberiliş wagty:

$$t_{g,0} = \frac{T_M}{2} \left(\frac{1 - 0.05^2}{2s_{kr}} + s_{kr} \ln \frac{1}{0.05} \right).$$

Bu deňlemäniň 0,05² ululygynyň 1-den has kiçidigi sebäpli, ony hasaba alman, işe goýberiş wagtyny oňnositel birlikde aňladalyň:

$$\frac{t_{g.0}}{T_M} = \frac{1}{4 \cdot s_{kr}} + 1,5 \cdot s_{kr}. \quad (2.87)$$

Şeýlelikde, otnositel işe goýberiliş wagty s_{kr} -niň ululygyna baglydyr, ol bolsa öz gezeginde rotoryň zynjyrynyň garşylygyna göni baglydyr (2.69-njy surat).



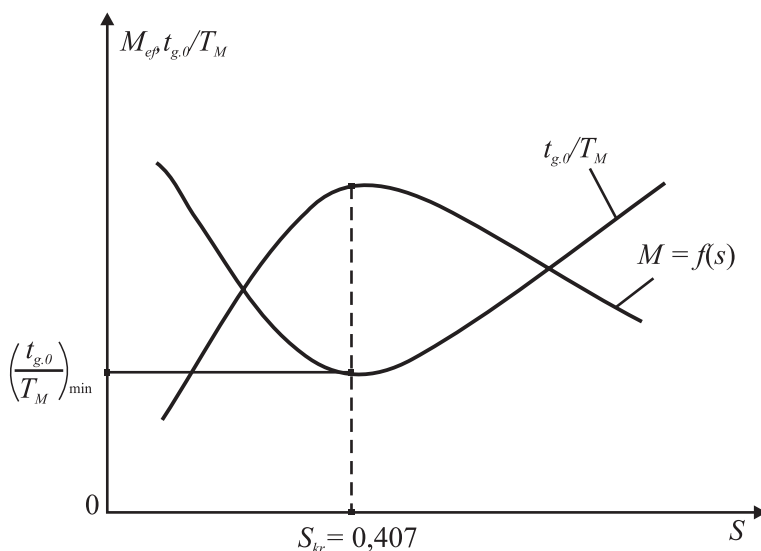
2.69-njy surat. Asinhron hereketlendirijiniň işe goýberilişinde s_k -niň dürli ululyklary üçin $\omega/\omega_0 = f(t/T_M)$ baglanyşygyň egrileri

(2.87) deňlemeden peýdalanyň, hereketlendirijiniň işe goýberilişiniň minimal wagtyň $s_{kr} = 0,407$ deňdigini kesgitlemek mümkin:

$$(t_{g.0}/T_M)_{\min} = 1,22.$$

İşe goýberilişin minimal wagty hereketlendirijiniň işe goýberilişiniň dowamyndaky momentiniň in effektiv ululygy bilen kesgitlenýär. Momentiň effektiv ululygy $M = f(s)$ egri bilen çäklenen (2.70-nji

surat) in uly meýdana deňdir. Effektiv moment diýip, hereketlendirijiniň işe goýberiliş wagtynyň onuň hakyky momentdäki işe goýberiliş wagtyna düşünilýär.



2.70-nji surat. Momentiň effektiv ululygy

Hereketlendirijiniň ýüksüz ($M_{st} = 0$) işe goýberiliş wagtyny effektiv momentiniň üsti bilen aşadaky aňlatma boýunça kesgitlenip bilner:

$$t_{g,0} = J\omega_0 / M_{ef.g}.$$

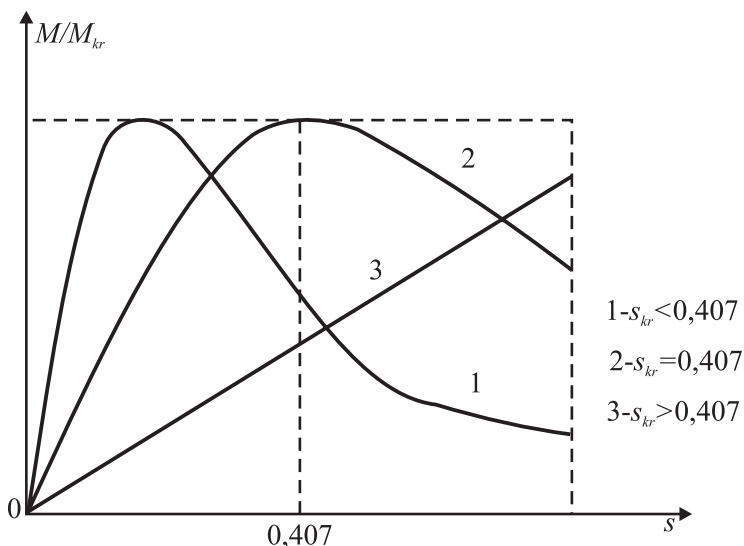
Bu ýerden işe goýberilişdäki effektiv momenti:

$$M_{ef.g} = J\omega_0 / t_{g,0}.$$

Eger-de bu aňlatma (2.87) deňlikden $t_{g,0}$ -yň ululygyny goýsak, käbir özgertmelerden soň alarys:

$$M_{ef.g} = M_{kr} \cdot s_{kr} / (0,25 + 1,5 \cdot s_{kr}^2). \quad (2.88)$$

2.71-nji suratda (2.88) aňlatma boýunça gurlan $M_{ef} = f(s_{kr})$ baglanyşyklar görkezilendir.



2.71-nji surat. s_{kr} -niň dürli ululyklaryna degişli $M/M_{kr} = f(s)$ baglanyşyklar

$s_{kr} = 0,407$ bolanda işe goýberilişdäki effektiv moment $0,81 \cdot M_{kr}$ -ä deň bolan maksimal ululyga eýedir. (2.71-nji suratdaky 2-nji egri çyzyk). Effektiv momentiniň maksimal ululygy (2.70-nji surata) hereketlendirijiniň işe goýberilişiniň minimal wagtyna deňdir.

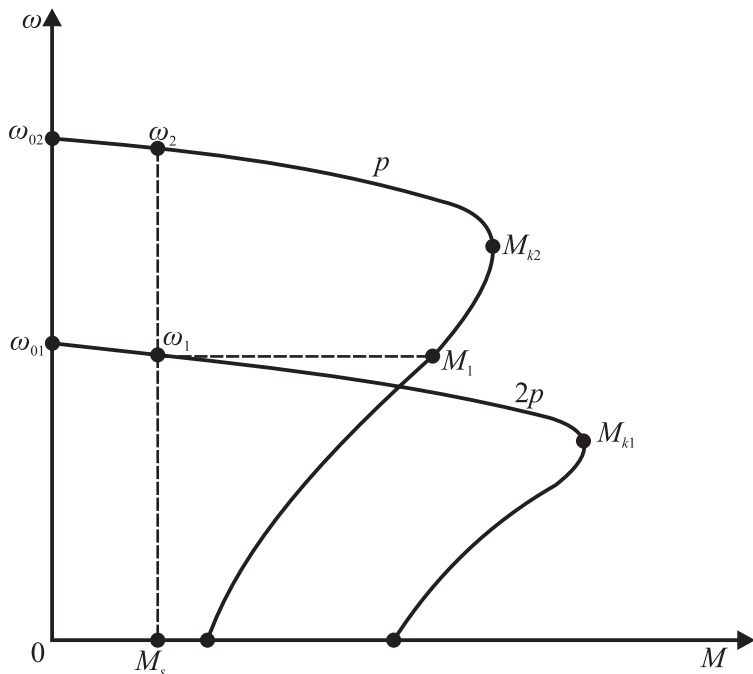
Iki tizlikli we köptizlikli asinhron hereketlendirijileriň basgançakly işe goýberilişinde statoryň sarymlary ilki başda polýuslaryň sany köp bolan ýagdaýda sete birikdirilýär. Hereketlendiriji polýuslaryň bu sanyna durnukly tizlige ýetenden soňra onuň polýuslary az sanyna geçirilýär. Hereketlendiriji ýene batlanyp, uly tizlige çenli ýetýär.

2.72-nji suratda iki tizlikli asinhron hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamalary görkezilendir.

Ilki başda hereketlendiriji M_s momentde polýus jübütleriniň sany $2p$ gabat gelýän häsiýetnama laýyklykda ω_1 burç tizligine çenli bat alýar. Soňra statoryň polýus jübütleriniň sany p sana geçirilýär we hereketlendiriji M_1 başlangyç moment bilen ω_2 burç tizligine çenli batlanyp başlaýar.

Işe goýberilişiniň birinji basgançagy üçin burç tizligiň wagta baglylykda üýtgeýişini (2.86) deňlemeden peýdalanyp gurmak mümkindir. Şonda hereketlendirijiniň typmasy $s = 1 \div 0,05$ aralykda üýtgeýär we $T_M = J\omega_0/M_{kr1}$,

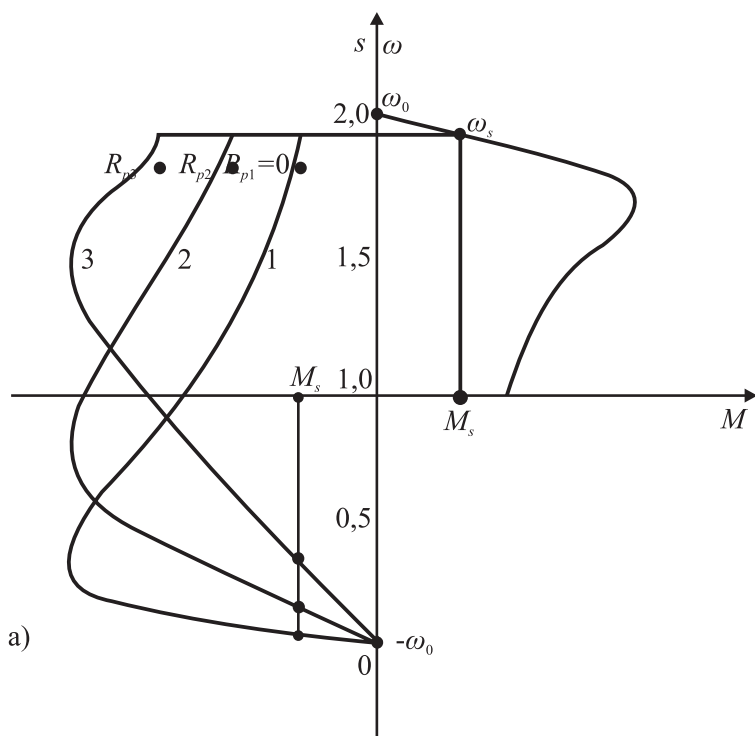
$s_{kr} = s_{kr1}$ -deň diýlip kabul edilýär. Ikinji basgançak üçin burç tizligiň üýtgeýiş egrisini hasaplamak üçin hem şol deňleme ulanylýar.



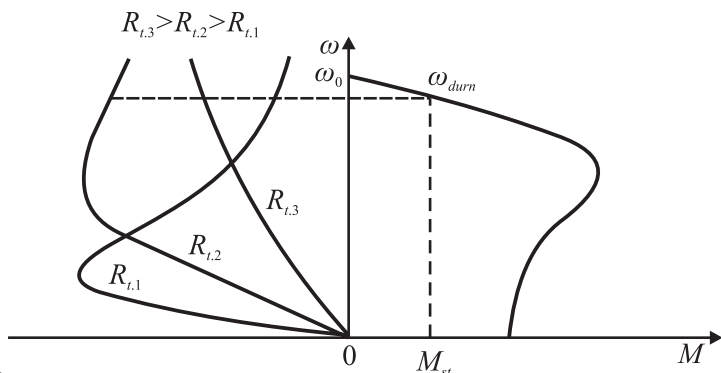
2.72-nji surat. Ikitizlikli asinhron hereketlendirijiniň ikibasgançakly iş goýberilişiniň mehaniki häsiýetnamalary

Ýöne typmaklygyň başlangyç ululygy 0,5-e ahyrky ululygy bol-
sa 0,05-e, şeýle-de $T_M = J\omega_{02}/M_{kr2}$, we $s_{kr} = s_{kr2}$ diýlip kabul edilýär.
Hereketlendirijileriň işe goýberilişiniň doly wagty birinji we ikin-
ji basgançaklardaky bat alma wagtlarynyň jemine deňdir. Seredilen
ýagdaý üçin basgançakly işe goýberilişiniň wagty, hereketlendirijileriň
bir basgançakda şol bir in uly burç tizligine çenli bat alma wagtyndan
azdyr. Hereketlendirijileriň polýus jübütleriniň başga sanlarynda hem
burç tizligiň wagat boýunça üýtgeýiş egrisini gurmak edil şuna meň-
zeşlikde amala aşyrylýar.

Asinhron hereketlendirijiniň aýlaw hereketiniň ugruny üýtgetmek
we garşylyklaýyn birikdirip tormozlamak üçin statora berilýän naprýaže-
niýäniň iki fazasynyň ýeri çalşyrylýar (2.73-nji a surat). Hereketlendiriji
iş düzgininden garşylyklaýyn birikdirip tormozlanma iş düzginine geçi-
lişini görkezýän $\omega = f(M)$ baglanyşyklar 2.73-nji a suratda görkezilendir.



a)



b)

2.73-nji surat

2.73-nji suratda 1-nji egrı çyzyk rotor gysga birikdirilip, tormozlanan ýagdaýyna degişlidir; 2-nji we 3-nji egriler bolsa rotoryň zynjyryna degişlilikde $R_{p2} < R_{p3}$ garşylykly rezistorlar birikdirilen ýagdaýyna degişlidir.

$M_{st} = 0$ bolanda we bu tormozlanmada $s = \frac{\omega_0 + \omega}{\omega_0}$ – bolýandygyny hasaba alyp hereketlendirijiniň hereketiniň deňlemesini aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$-\frac{2M_{kr}}{s_{kr} / s + s / s_{kr}} = J\omega_0 \frac{ds}{dt}.$$

Bu deňlemede käbir özgertmeleri geçirip umumy tormozlanma wagty üçin (2.85) deňlemä meňzeş aňlatmany almak mümkindir.

Tormozlanmada typmanyň $s_{bas} = 2$ -den, $s_{ahyr} = 1$ -e çenli aralykdaky ululyklarynda bolup geçýändigini hasaba alyp ýazyp bileris:

$$t_{t,0} = T_M \cdot (0,345 \cdot s_{kr} + 0,75 / s_{kr}). \quad (2.89)$$

Hereketlendirijiniň işe goýberiliş ýagdaýyna meňzeşlikde, garşylyklaýyn birikdirip tormozlanma wagtyňyň minimal ululygy ($s_{kr} = 1,47$ bolanda): $(t_{t,0} / T_M)_{\min} = 1,027$ deňdir.

2.73-nji a suratdaky 3-nji egri çyzyk $s_{kr} = 1,47$ bolanda tormozlaýjy momentniň effektiv ululygy iň uly ýagdaýa degişlidir. Garşylyklaýyn birikdirip tormozlanmadaky momentniň effektiv ululygy:

$$M_{ef,t} = M_{kr} S_{kr} / (0,75 + 0,345 S_{kr}^2). \quad (2.90)$$

Eger-de $s_{kr} = 1,47$ bolsa, onda tormozlanmada effektiv momentniň ululygy maksimala deňdir:

$$M_{ef,t,\max} = 0,98 \cdot M_{kr}.$$

Hereketlendirijiniň işe goýberilişindäki ýa-da garşylyklaýyn birikdirip tormozlanmadaky effektiv momentniň ululygy boýunça, M_{st} garşylyk momentniň hemişelik ýagdaýynda, hereketlendirijiniň ýük astyndaky işe goýberiliş ýa-da tormozlanýş wagty:

$$t_{g,p(t)} = J\omega / (M_{ef,g,p(t)} \mp M_{st}). \quad (2.91)$$

(2.91) deňlemede “–” alamat hereketlendirijiniň işe goýberiliş düzginine; “+” alamat bolsa onuň tormoz düzginine degişlidir. Hereketlen-

dirijiniň rewersirlenme wagty, garşylyklaýyn birikdirip tormozlanmanyň wagty bilen ters ugurdaky bat alma wagtyny goşup alynýar.

Asinhron hereketlendirijiniň dinamiki tormozlanmasy, köplenç ýagdaýda, hereketlendiriji işläp durka onuň stator sarymyna berilýän üýtgeýän togy hemişelik toguňky bilen çalşyrmak arkaly amala aşyrylýar.

Hereketlendirijiniň dinamiki tormozlanmasyna degişli häsiýetnamalar rotoryň zynjyryna R_T rezistorlar girizilip alynýar. R_{T1} häsiýetnama rezistorlaryň garşylygy $R_T = 0$ bolandaky ýagdaýa degişlidir (2.73-nji b surat).

Tormozlanma wagtynda statora berilýän hemişelik togy çäklendirmek üçin onuň zynjyryna $R_{d,t}$ goşmaça rezistor girizilýär.

Eger-de tormozlanma ýüksüz ýagdaýda amala aşyrylýan bolsa, onda elektrohereketlendirilişin hereketiniň deňlemesi:

$$-\frac{2M_{kr,t}}{s_{kr,t}/s + s/s_{kr,t}} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.92)$$

görnüşde ýazylýar.

Tormozlanmada $s = \frac{\omega}{\omega_0}$ bolýandygyny hasaba alyp we käbir özgertmeleri geçirip, tormozlanma wagtyny şeýle ýazyp bileris:

$$t_{t,din} = \frac{T_M}{2} \int_{baş}^{ahyr} \left(s_{kr,t} \ln \cdot s + \frac{s^2}{2s_{kr,t}} \right). \quad (2.93)$$

Haçan-da $s_{baş} = 1$, $s_{ahyr} = 0,05$ bolsa, onda (2.93) aňlatmany aşakdaky görnüşli alýar:

$$t_{t,din} = T_M \cdot \left(1,5 \cdot s_{kr,t} + \frac{1}{4 \cdot s_{kr,t}} \right), \quad (2.94)$$

bu ýerde $T_M = J\omega_0/M_{kr,t}$ – dinamiki tormozlanmadaky elektromekaniki wagt hemişeligi.

(2.94) aňlatma asinhron hereketlendirijiniň ýüksüz işe goýberiliş wagty üçin ýazylýan (2.87) aňlatma meňzeş bolandygy sebäpli, dinamiki tormozlanma wagtynda hereketlendirijiniň effektiw momentiniň ululygy (2.88) aňlatma meňzeş aňlatma boýunça kesgitlenýär.

Görnüşü ýaly, minimal tormozlanma wagty edil işe goýberilişdäki ýaly: $s_{kr,t} = 0,407$ ululygyna degişlidir.

Asinhron hereketlendirijiniň rekuperatiw tormozlanmasy haçanda onuň burç tizligi sinhron burç tizliginden ýokary bolanda mümkindir. Ikitizlikli ýa-da köptizlikli hereketlendirijileriň statorynyň polýus jübütleriniň sany üýtgedilip birikdirilende tormozlanmak hem mümkindir.

2.5. Asinhron maşynlar barada gysgaça taryhy maglumatlar

İşleýiş prinsipi „Aýlanýan magnetizm” hadysasyna esaslanan asinhron hereketlendirijiniň ilkinji konstruksiýasy 1824-nji ýylda F.D. Argo tarapyndan oýlanyp tapylypdyr. Ýagny ol tegelek mis diskiň daşynda hemişelik magnit aýlananda onuň herekete gelyändigini tejribede görüpdir. Bu hadysa 1831-nji ýylda M. Faradeý tarapyndan ylmy esasda düşündirilipdir.

1879-njy ýylda U. Beýli (Angliýa) hereket etmeýän gurluşyň, ýagny mis diskiň okundan deň daşlykda we bir derejede ýerleşdirilen dört sany elektromagnitiň kömegi arkaly aýlanýan magnit meýdanyny almagy başarypdyr. Elektromagnitlere belli bir tertipde impuls bermeklik üçin ýörite hemişelik toguň kommutatoryny peýdalanypdyr.

Häzirki döwürde ulanylýan birfazaly asinhron hereketlendirijilerde aýlanýan magnit meýdanynyň alnyş hadysasy 1888-nji ýylda biri-birinden habarsyz italýan alymy T. Ferraris hem-de serb oýlap tapyjysy N. Tesla tarapyndan açylypdyr. (N. Tesla zähmet çeken ömrüniň köp bölegini Amerikada geçiripdir). Olar tekizlikde oklary özara gönüburç bilen ýerleşdirilen iki sany sarymy fazalar tapawudy $\varphi - 90^\circ$ bolan üýtgeýän tok berlende ululygy boýunça üýtgemeýän aýlanýan magnit meýdanyny alyp bolýandygyny görkezipdirler.

Häzirki döwürde köpçülikleýin ulanylýan üçfazaly asinhron hereketlendirijileriniň gurluşy 1889-njy ýylda M.O. Doliwo-Dobrowolskiý tarapyndan oýlanyp tapylypdyr.

III. SINHRON MAŞYNLAR

Sinhron maşynlara sinhron generatorlar, sinhron hereketlendirijiler we sinhron kompensatorlar degişlidir. Senagatyň we transportyň dürli pudaklarynda elektrik energiýanyň çeşmesi hökmünde köpçülikleýin sinhron generatorlar peýdalanylýar. Generatorlar özüni herekete getirýän (suw, bug we.ş.m) hereketlendirijileriň mehaniki hereketini üçfazly toguň elektrik energiýasyna öwürýärler. Häzirki döwürde sinhron generatorlaryň kuwwaty 1200 MW we ondan hem ýokary geçýär. Sinhron hereketlendirijiler üçfazly toguň elektrik energiýasyny hemişelik aýlaw ýygyllykly mehaniki herekete öwürýärler. Hereketlendirijiler, esasan, örän ýokary kuwwatly mehanizimleri (nasoslary, kompressorlary, wentilýatorlary we ş.m.) herekete getirmek üçin geňden ulanylýar. Pes kuwwatly sinhron hereketlendirijiler, esasan, durnukly aýlaw ýygyllygy talap edýän mehanizimleri (elektrik sagatlarynda, awtomatiki usulda hat ýazýan abzallarda we ş.m.) herekete getirmek üçin peýdalanylýar. Sinhron kompensatorlar reaktiw kuwwatyň çeşmesi bolup elektrosetleriň kuwwat koeffisiýentlerini ýokarlandyrmak üçin peýdalanylýar.

Sinhron maşynlaryň nominal ululyklaryna aşakdakylar degişlidir:

1) Nominal kuwwat (generator we kompensator üçin doly kuwwat, kWA; hereketlendiriji üçin onuň okundaky kuwwat, kW);

2) Kuwwat koeffisiýenti;

3) Sarymlaryň birikdiriliş shemasy;

4) Liniýa naprýaženiýesi, W;

5) Aýlaw ýygyllyk, aýl/min (generatorlar üçin şeýle-de alyp gaçma tizligi);

6) Ýakoryň togunyň ýygyllygy, Gs;

7) Ýakoryň liniýa togy, A;

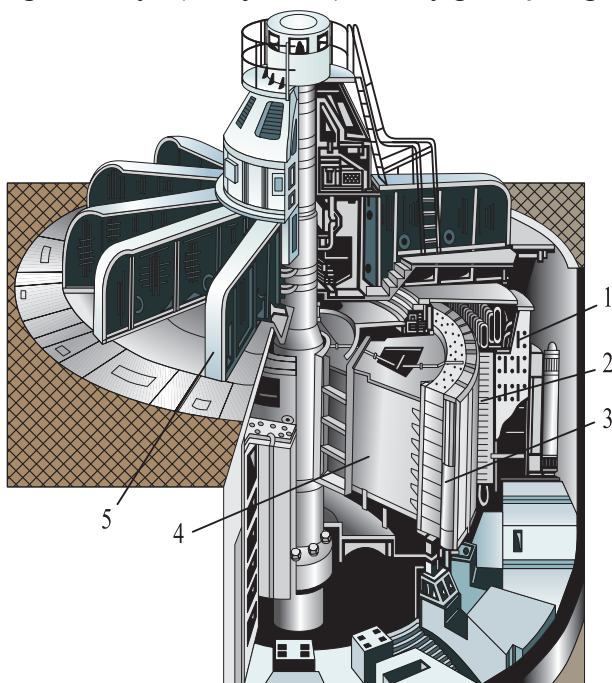
8) Oýandyryjy sarymyň nominal naprýaženiýesi we togy.

Bu ululyklaryň ählisi sinhron maşynyň korpusyna birikdirilen ýazgyda görkezilýär.

3.1. Sinhron generatorlar

3.1.1. Sinhron generatorlaryň gurluşy we işleýiş düzgüni

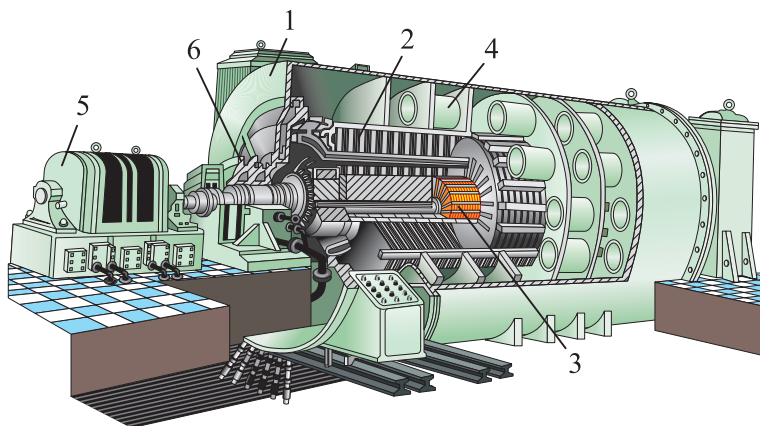
Konstruksiýalary boýunça sinhron generatorlar we hereketlendirijiler biri-birinden örän az tapawutlanýarlar. Generator, esasan, iki sany uly bölege: maşynyň esasy magnit akymyny döredýän oýandyryjy ulgam rotora we sarymlarynda üýtgeýän elektrik hereketlendiriji güýji indusirlenýän ýakora-statora bölünýärler. 3.1-nji suratda sinhron gidrogeneratoryň we turbogeneratoryň (3.2-nji surat) umumy görnüşleri görkezilendir.



3.1-nji surat. Sinhron gidrogeneratoryň umumy görnüşü.

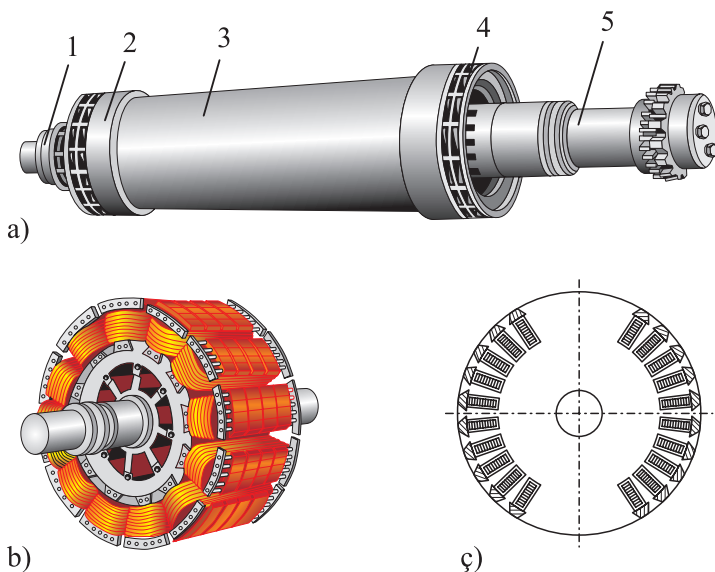
*1 – statoryň korpusy; 2 – statoryň serdeçnigi; 3 – rotoryň polýuslary;
4 – rotoryň halkasy; 5 – ýokarky krestowina*

Sinhron generatoryň statory öz konstruksiýasy boýunça üçfazaly asinhron hereketlendirijiniň statoryndan örän az tapawutlanýar. Rotor elektromagnit bolup, ol öz konstruksiýasy boýunça iki görnüşe: polýuslary açyk görünmeýän (a) we polýuslary açyk görüňýän (b) rotora bölünýär (3.3-nji surat). 3.2-nji ç suratda iki polýusly turbogeneratoryň rotorynyň keseligine kesilen görnüşü görkezilendir.



3.2-nji surat. Sinhron turbogeneratoryň umumy görnüşi.

1 – korpus; 2 – statoryň serdeçnigi; 3 – rotor; 4 – sowadyjy turba;
5 – oýandyryjy; 6 – podşipnik



3.3-nji surat. a – turbogeneratoryň rotorynyň umumy görnüşi
(1 – kontakt halkalar; 2 – bandaž halkalar; 3 – rotor; 4 – wentilýator; 5 – wal);
b – 12-polýusly gidrogeneratoryň rotorynyň umumy görnüşi;
ç – iki polýusly sinhron turbogeneratoryň rotorynyň keseligine kesilen görnüşi

Polýuslary aýyk görünüňan rotoryň sarymlary (3.3-nji b surat) ýörite sterženlerde ýerleşdirilýär. Rotor hereket edýän wagtynda onuň sarymlarynyň ýerinden gozganmazlygy üçin, sterženlere ýörite polýus uçluklary birikdirilýär. Stator bilen rotoryň arasyndaky howa boşlugynda rotor tarapyndan döredilýän magnit akymynyň sinusoidal ýaýramagyny üpjün etmek maksady bilen polýus uçluklary ýaý şekilli görnüşde ýerine ýetirilýär. Rotoryň şeýle görnüşli konstruksiýasy pes aýlaw ýygyllykly $n_0 = 50 \div 750$ aýl/min generatorlarda, ýagny suw turbinalaryň kömegi arkaly herekete getirilýän generatorlarda giňden peýdalanylýar.

Polýuslary aýyk görünmeýän generatorlaryň rotory tutuş massiw polat silindr bolup, onuň üstünden rotoryň okunyň ugryna ugurdaş, oýulyp ýasalan pazlarda oýandyryjy sarymynyň sargylary ýerleşdirilýär (3.2-nji a we ç suratlar). Şeýle gurluşy rotorlaryň mehaniki taýdan örän berkligi sebäpli, olar ýokary aýlaw ýygyllykly $n_0 = 1500 \div 3000$ aýl/min bug turbinalaryň kömegi arkaly herekete getirilýän generatorlarda ulanylýar.

Rotoryň gurluşynyň ikisinde oýandyryjy sarymlaryň uçlary rotoryň okunda ýerleşdirilen kontakt halkalara birikdirilýärler. Bu halkalar biri-birinden hem-de rotoryň okundan izolirlenendirler. Halkalara jebis degip duran, hereket etmeýän çotgalaryň üsti arkaly oýandyryjy sarymlar hemişelik toguň çeşmesine birikdirilýärler.

Oýandyryjy sarymlary hemişelik tok bilen iýmitlendirilýän rotor herekete getirilen wagtynda, onuň döredýän magnit akymynyň esasy bölegi statoryň fazalarynyň sarymlaryny kesip geçýär we olarda fazalary boýunça biri-birinden 120° tapawutlanýan üç sany sinusoidal elektrik hereketlendiriji güýçler indusirlenýär. Aýlaw ýygyllygynyň ýokarlanmagy bilen turbogeneratorlaryň agramynyň we göwrüminiň peselýändigini sebäpli, ýylylyk elektrik stansiýalarda aýlaw ýygyllygy $n_0 = 3000$ aýl/min deň bolan iki polýusly turbogeneratorlar peýdalanylýar. Iki polýusly generatoryň, statorynda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjüň ýygyllygy $f = n_0/60 = 3000/60 = 50$ Gs.

Gidroturbinalar bilen herekete getirilýän sinhron generatorlaryň aýlaw ýygyllygynyň ony herekete getirýän suwuň ýokary galdyrylan derejesine baglydygy sebäpli, olaryň aýlaw ýygyllygy köplenç ýag-

daýda $50 \div 750$ aýl/min aralygynda bolýar. Şonuň üçin gidrogenera-
torlardan senagat ýygylýkly ($f = 50$ Gs) üýtgeýän naprýaženiýe almak
üçin, olaryň rotory polýuslary özara gezekleşip gelýän köp polýusly
görnüşde taýýarlanylýar (3.3-nji b surat). Seredilýän konstruksiýa-
da rotor $360^\circ/p$ burça öwrülende (bu ýerde p – polýus jübütleriniň
sany) statorda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýji doly bir
sikili ýerine ýetirýär. Şeýlelikde, p sany polýus jübüti bolan rotor, bir
minudyň dowamynda n aýlawy ýerine ýetirýän bolsa, onda statorda
emele gelýän elektrik hereketlendiriji güýjüň ýygylýgy:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} i. \quad (3.1)$$

Üçfazly toguň sinhron generatorynda statoryň silindiriniň iç
ýüzüniň tutýan meýdanyny effektiv ulanmak maksady bilen stato-
ryň we rotoryň polýus jübütleriniň sany mydama biri-birine deň edip
alynýar. Generatorsimmetrik häsiýetli üçfazly ýük birikdirilende
ýüze çykýan toklar, statorda aýlaw ýygylýgy:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} i \quad (3.2)$$

deň bolan aýlanýan magnit meýdanyny döredýär. (3.1) aňlatmadan f -iň
ululygyny (3.2) goýup, rotoryň we statoryň magnit meýdanlarynyň deň
aýlaw ýygylýklarynyň bardygy görünýär. Şol sebäpli, üýtgeýän toguň
şeýle görnüşli maşynlaryna *sinhron maşynlar* diýip at berilýär. Sinhron
sözi türkmençä geçirilende *deň ýygylýkly* diýen manyny berýär.

3.1.2. Sinhron generatorlaryň oýandyrylyş shemalary

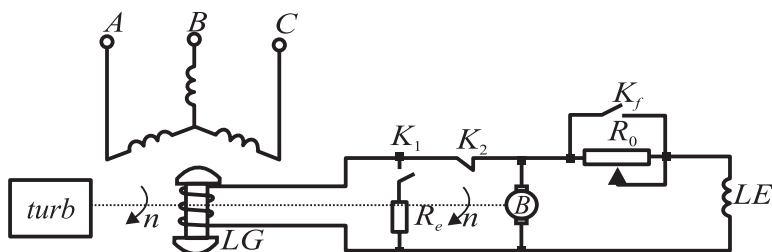
Sinhron generatorlaryň oýandyryjy sarymlaryny hemişelik tok
bilen iýmitlendirmek üçin ýörite elektromaşynly we statiki (ýarym-
geçirijili) oýandyryjy ulgamlar peýdalanylýar. Oýandyryjy ulgamlar
sinhron generatorlaryň islendik iş düzgüninde onuň naprýaženiýesi-
niň ululygyny hemişelik saklamak üçin oýandyryjy sarymyň togu-
ny çalt sazlamagy we generator işden çykarylanda onuň oýandyryjy
sarymynyň magnit meýdanynyň energiýasyny, energiýanyň beýleki

görnüşlerine (meselem, ýylylyk energiýasyna) operatiw öwürmegi üpjün etmelidir.

Sinhron generatorlaryň elektromaşynly oýandyryş ulgamy 3.4-nji suratda görkezilendir.

Shemada LG-sinhron generatornyň oýandyryjy sarymy, LE-hemişelik toguň generatorynyň oýandyryjy sarymy.

Elektromaşynly oýandyrylyşda hemişelik toguň çeşmesi hökmünde öz-özünden oýandyrylýan ýa-da baglanyşykly oýandyrylýan hemişelik toguň generatorlary peýdalanylýar. Hemişelik toguň generatory hereketi sinhron generatornyň okundan alýar. Hemişelik toguň generatorynyň kuwwaty sinhron generatornyň kuwwatynyň $0,3 \div 3\%$ -ini düzýär. Uly kuwwatly sinhron generatorlaryň oýandyryjy toklarynyň $1000 - 10000$ A-e çenli ýetýänligi sebäpli, olaryň toklary hemişelik toguň generatorlarynyň naprýaženiýesiniň üsti arkaly sazlanýlar. Öz gezeginde hemişelik toguň generatorynyň naprýaženiýesi onuň oýandyryjy sarymyna yzygider birikdirilen R_{oy} rezistor arkaly sazlanýlar (3.4-nji surat).



3.4-nji surat. Sinhron generatornyň elektromaşynly oýandyrylyş shemasy

Sinhron generatornyň oýandyryjy toguny forsirlemek (güýçlendirmek) üçin shemadaky R_{oy} rezistor K_f açar arkaly gysga utgaşdyrylýar. Bu ýagdaýda sinhron generatornyň oýandyryjy sarymyna berilýän naprýaženiýe onuň nominal naprýaženiýesinden $1,8-2$ esse ýokary bolýar. Naprýaženiýäni $1,5-2$ essä çenli ýokarlandyrmak bir sekunda golaý wagtyň dowamynda bolup geçýär.

Sinhron generator işden çykarylanda, onuň oýandyryjy sarymynyň magnit meýdanynyň energiýasyny, ýylylyk energiýasyna öwürmek üçin oňa garşylygy oýandyryjy sarymyň R garşylygyndan takmynan 5 esse uly bolan ($R_e = 5R$) rezistor birikdirilýär. Genera-

tory işden çykarmak üçin K_2 açaryň ýapyk wagty K_1 açar arkaly R_e rezistor birikdirilýär. Soňra K_2 açar açylýar. Şeýle etmek bilen sinhron generatoryň oýandyryjy sarymyň magnit meýdanynyň energiýasy R_e rezistorda ýylylyk energiýasyna öwrülýär. Eger-de sinhron generatoryň oýandyryjy zynjyrynyň togy R_e rezistoryň birikdirilmedik ýagdaýynda kesilse oýandyryjy toguň ululygynyň örän çalt peselmegi netijesinde onuň sarymynda nominal naprýaženiýeden has ýokary we sarymyň izolýasiýasy üçin howply $e = -L \frac{di}{dt}$ elektrik hereketlendiriji güýji ýüze çykýar. Şeýle-de R_e rezistor birikdirilmedik wagty K_2 açar açylsa onda onuň kontakt polýuslarynyň arasynda, oýandyryjy sarymyň magnit meýdanynyň energiýasynyň hasabyna ýokary temperaturaly duganyň emele gelmegine we kontaktyň hatardan çykmagyna getirýär.

Uly kuwwatly sinhron generatorlarda oýandyryjy sarymyň energiýasynyň R_e rezistorda ýylylyk energiýasyna öwürilmegi $i = I \cdot e^{-\frac{t}{T}}$ tok boýunça häsiýetlendirilýär. Bu aňlatmada $T = \frac{L}{R + R_e}$ wagt hemişeligi, (L – oýandyryjy sarymyň induktiwligi). Oýandyryjy toguň sönmegi üçin takmynan bir sekunt töweregi wagt gerek bolýar. Statiki oýandyrylyş uly kuwwatly sinhron generatorlaryň oýandyryjy sarymlaryny hemişelik tok bilen iýmitlendirmek üçin peýdalanylýar.

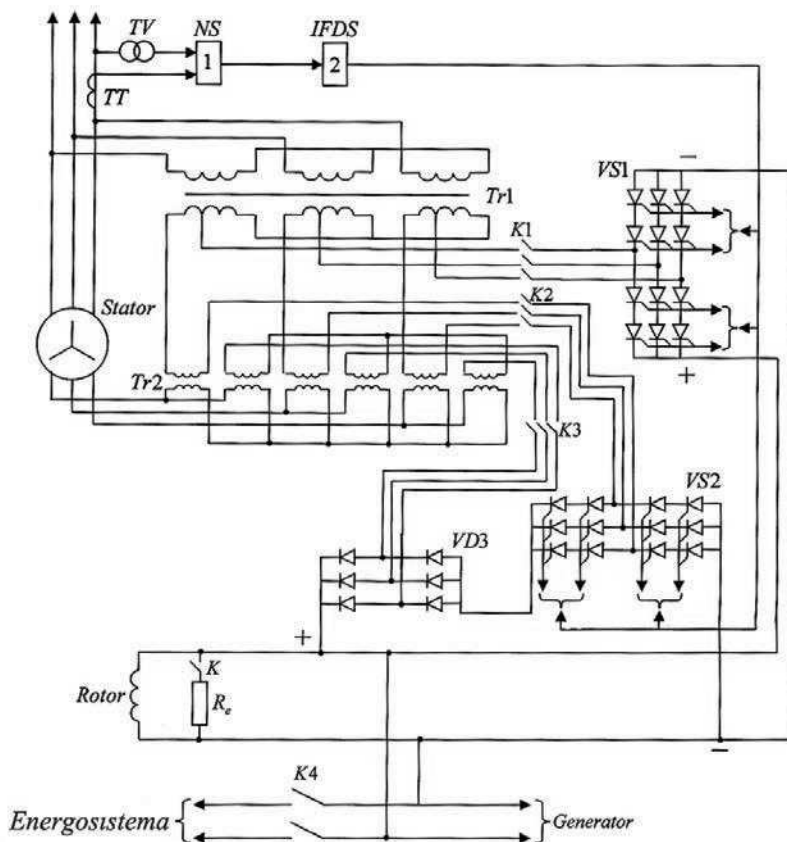
Sinhron genaratorlaryň statiki oýandyrylyş shemasy 3.5-nji suratda görkezilendir.

Bu ulgam elektromaşynly ulgamdan özüniň kuwwatynyň ýokarylygy we ygtybarlylygy bilen tapawutlanýar. Statiki oýandyrylyş shemalaryň öz-özünden oýandyrylýan, *baglanyşyksyz* we *kontaktsyz* görnüşleri hem bar.

Öz-özünden oýandyrylýan shemada (3.5-nji surat) oýandyryjy saryma gerek bolan energiýa $Tr1$ göneldiji transformatoryň kömegi arkaly sinhron generatoryň özünden alýar. Alnan energiýa dolandyrylýan VS1 tiristorly göneldijä berilýär.

Göneldilen hemişelik toguň energiýasy generatoryň oýandyryjy sarymyna berilýär. Generator ilki başda oýandyrmak üçin maşynyň magnit ulgamynda saklanyp galan galyndy magnit akymyndan ýa-da

energoulgamyň elektrik energiýasyndan peýdalanylýar. Oýandyryjy sarymyň toguny sazlamak üçin *TV* naprýaženiýe we *TT* tok transformatorlardan alnan signallary naprýeženiýäni awtomatiki sazlaýjy (*NS*) özgerdijidäki standart signallar bilen deňeşdirilip impuls fazaly dolandyryjy ulgam (*IFDS*) berilýär. Ondan alynýan signallar *VS1* göneldijiniň düzümindäki tiristorlaryň dolandyryjy elektrodlaryna berilýär.



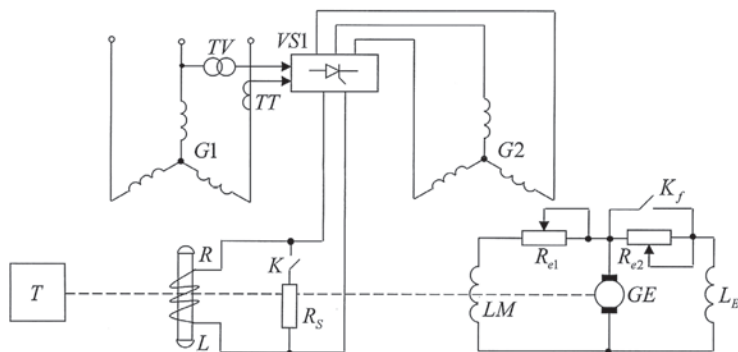
3.5-nji surat. Sinhron generatoryň statiki oýandyrylyş shemasy

Generatorda forsirlenme ýagdaý ýüze çykanda, oýandyryjy saryma gerek bolýan energiýa *VS1* göneldijiden we oňa parallel birikdirilen, ýakoryň faza sarymlarynyň neýtral nokadynyň öňýanynda

ýerleşdirilen $T2$ yzygider transformatorlardan iýmitlenýän $VS2$ hem-de $VS3$ göneldijilerden alynýar.

Oýandyryjy sarymyň magnit meýdanynyň energiýasyny ýylylyk energiýasyna özgertmek edil elektromaşynly shemadaky ýaly R_e rezistor arkaly ýerine ýetirilýär. Onuň üçin $K1$; $K2$; $K3$ açarlaryň ýapyk wagty K açar birikdirilýär (3.5-nji surat). Soňra $K1$; $K2$; $K3$ açarlar açylýar.

Baglanyşyksyz oýandyrylýan statiki shemada generatoryň oýandyryjy sarymy üçin gerek bolýan hemişelik tok generatoryň okuna birikdirilen üçfazly üýtgeýän toguň G_2 generatoryndan alynýar (3.6-njy surat).



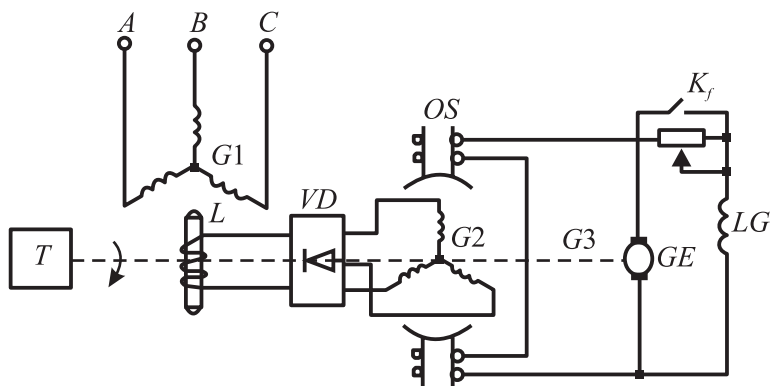
3.6-njy surat. Baglanyşyksyz oýandyrylýan statiki oýandyrylyş shemasy

Üçfazly oýandyryjy $G2$ generatoryň LM sarymy esasy $G1$ generatoryň okuna birikdirilen özbaşdak oýandyrylýan hemişelik toguň GE generatoryndan iýmitlenýär. $G2$ generatordan alnan üçfazly toguň elektrik energiýasy $VS1$ tiristorly göneldijide göneldilenden soňra $G1$ generatoryň oýandyryjy sarymyna berilýär.

Generatoryň naprýaženiýesini sazlamak TV naprýaženiýe we TT tok transformatorlaryndan alynýan signallary standart signallar bilen deňeşdirilenden soňra $VS1$ göneldijiniň düzümindäki tiristorlara bermek arkaly awtomatiki usulda ýerine ýetirilýär. Forsirmek üçin hemişelik toguň generatorynyň oýandyryjy zynjyryndaky R_{e2} rezistory K_f açar bilen gysga utgaşdyrylýar.

Statiki oýandyrylyş shemanyň çotgasyz görnüşinde (3.7-nji surat) üçfazly oýandyryjy $G2$ generatoryň statory we üçfazly göneldiji sinhron generatoryň okunda ýerleşdirilýär hem-de ekspluatasiýa döwründe n_1 sinhron aýlaw ýygyllyk bilen aýlanýar.

Göneldijiden alynýan hemişelik tok sinhron generatoryň oýandyryjy sarymyna berilýär. Üçfazly oýandyryjy generatoryň hereket etmeýän *OS* oýandyryjy sarymyna berilýän energiýa *GE* hemişelik toguň generatoryndan ýa-da *G1* sinhron generatoryň özünden alynýar.



3.7-nji surat. Sinhron generatoryň çotgasyz oýandyrylýan shemasy

3.1.3. Sinhron generatoryň boş iş düzgüni

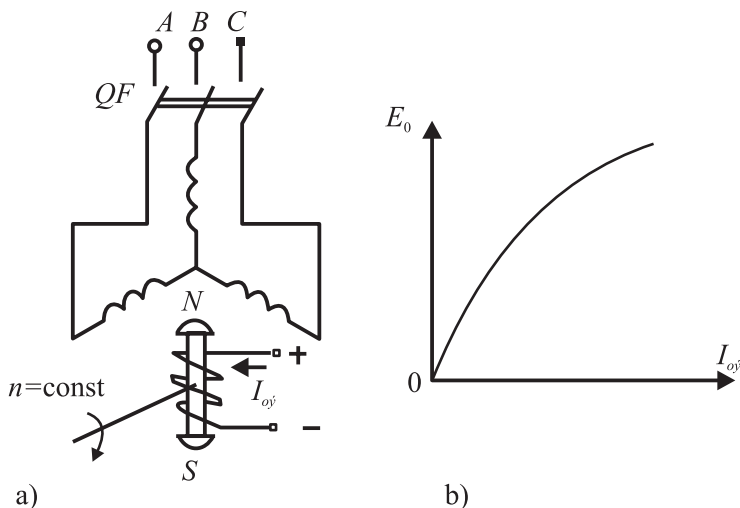
Sinhron generatora ýük birikdirilmedik ýagdaýynda statoryň sarymlaryndan hiç hili tok geçmeýär (3.8-nji a surat). Şol sebäpli, generatoryň magnit meýdany diňe rotoryň oýandyryjy sarymy tarapyndan döredilýär. Bu ýagdaýda, statoryň her bir fazasynda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýji rotoryň Φ_{oy} magnit akymy arkaly aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$E_0 = 4,44\omega f \Phi_{oy} = 4,44\omega \frac{p \cdot n}{60} \Phi_{oy} = c \Phi_{oy} \cdot n, \quad (3.3)$$

bu aňlatmada ω – statoryň bir faza sarymynyň sargy sany, c – generatoryň konstruktiw koeffisiýenti.

(3.3) aňlatmadan görnüşi ýaly, rotor hemişelik aýlaw ýygylýk ($n = \text{const}$) bilen herekete getirilen wagtynda statorda indusirlenýän E_0 elektrik hereketlendiriji güýji diňe oýandyryjy sarymyň Φ_{oy} magnit akymyna baglydyr. Φ_{oy} magnit akymynyň ululygy bolsa, öz gezeginde rotoryň oýandyryjy I_{oy} toguna baglydyr. Statorda indusirlenýän E_0

elektrik hereketlendiriji güýjüň I_{oy} toga bolan baglanyşygy 3.8-nji b suratda görkezilendir.



**3.8-nji surat. Sinhron generatoryň shemasy (a)
we onuň boş iş häsiýetnamasy (b)**

$E_0 = f(I_{oy})$ baglanyşyga generatoryň boş iş häsiýetnamasy diýilýär. Häsiýetnamadan görnüşi ýaly, I_{oy} oýandyryjy toguň ululygy belli bir derejä baranda, onuň E_0 elektrik hereketlendiriji güýji bilen arasyndaky göni çyzykly baglanyşyk saklanylmaýar. Bu hadysa generatoryň magnitgeçiriji ulgamynyň doýgun ýagdaýa barýanlygy bilen düşündirilýär.

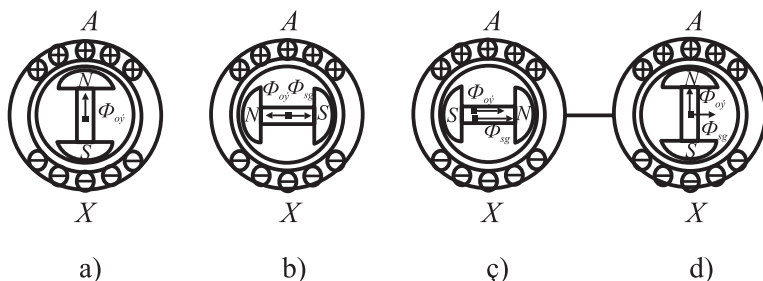
3.1.4. Sinhron generatoryň ýükli iş düzgüni. Ýakoryň reaksiýasy

Generatora ýük birikdirilen wagtynda, statorda ýüze çykýan üç-fazaly tok aýlanýan magnit meýdany döredýär. Şeýlelikde, generator ýükli işleýän döwründe, onuň magnit meýdany statoryň we rotoryň magnit meýdanlary tarapyndan bilelikde döredilýär.

Statoryň magnit meýdanynyň maşynyň esasy magnit meýdanyna we onuň hem öz gezeginde generatoryň iş düzgünine edýän täsirine ýakoryň reaksiýasy diýilýär.

Ýakoryň reaksiýasy, generatordan iýmitlenýän ýüküň häsiýetine baglydyr. Şol sebäpli generatora aýratynlykda induktiw, sygym we aktiw häsiýetli ýükler birikdireliň hem-de statoryň döredýän magnit meýdanynyň rotoryň magnit meýdanyna edýän täsirlirine seredeliň. Analizi ýeňilleşdirmek üçin statoryň Φ_{st} magnit akymynyň ugry, togy maksimal ululyga eýe bolan fazanyň oky bilen gabat gelýär diýip şertleşeliň.

Şeýlelikde, statoryň fazalarynda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýçler özüniň maksimal ululygyny rotoryň polýuslary göni fazanyň üstüne gelende alýar diýip kabul edeliň (3.9-njy a surat).



3.9-njy surat. Sinhron generatorda ýakoryň reaksiýasy

Ýüksüz (a) we induktiw häsiýetli (b), sygym häsiýetli (ç), hem-de aktiw häsiýetli (d) ýüklerde.

Generatora arassa induktiw häsiýetli ýük birikdirilen wagtynda statoryň fazalarynda ýüze çykyan toklar öz fazasy boýunça deňişli E elektrik hereketlendiriji güýjünden $\varphi = 90^\circ$ yza galýarlar. Netijede, I tok özüniň maksimal ululygyny, haçan-da rotoryň polýusy bu fazanyň ýerleşýän tekizliginden bir aýlawyň dördten bir ($1/4$) bölegi aralyga öňe tarap öwrülende alýar. Bu ýagdaý 3.9-njy b suratda „AX“ fazanyň mysalynda görkezilendir. Şeýlelikde, statoryň üstünden induktiw häsiýetli tok geçýän wagtynda, Φ_{st} we Φ_{oy} magnit akymalary göni biri-biriniň garşysyna ugrukdyrylandyrlar. Netijede, statoryň magnit akymy rotoryň magnit akymyny magnitsizlendirýär.

Generatora sygym häsiýetli ýük birikdirilende statoryň üstünden geçýän I – tok öz fazasy boýunça E elektrik hereketlendiriji güýçden $\varphi = 90^\circ$ öňe düşýär. Netijede, statoryň togy özüniň maksimal ululygyny, rotoryň polýusy bu fazanyň ýerleşýän tekizligine ýetmegine bir

doly aýlawyň dörtdeň bir bölegine deň bolan aralyk galanda alýar. Bu ýagdaý 3.9-njy φ suratda “AX” fazanyň mysalynda görkezildi. Seredilýän ýagdaýynda, Φ_{st} we Φ_{oy} magnit akymalary ugurlary boýunça biri-birine gabat gelýärler. Şeýlelikde, statoryň Φ_{st} magnit akymy rotoryň Φ_{oy} magnit akymyny güýçlendirýär.

Seredilýän ýagdaýlaryň ikisinde rotora täsir edýän elektromagnit güýçleriniň ululyklary boýunça özara deňligi, ugurlary boýunça bolsa, garşylyklydygy sebäpli, generator özüni herekete getirýän turbina hiç hili garşylyk momentini döretmeýär. Şeýlelikde, generatora özüni herekete getirýän turbina tarapyndan berilýän kuwwat örän az bolup, ol diňe generatordaky ýitgileriň öwezini dolmak üçin sarp edilýär.

Generatora aktiw häsiýetli ýük birikdirilende statoryň üstünden geçýän I toguň öz fazasy boýunça E elektrik hereketlendiriji güýç bilen gabat gelýändigini sebäpli Φ_{st} we Φ_{oy} magnit akymalary biri-birine görä özara perpendikulýar ýerleşýärler (3.9-njy d surat).

Netijede, rotoryň her bir geçiriji simine ugurlary boýunça goşulýşan elektromagnit güýçler täsir edýär we generator özüni herekete getirýän turbina garşylyk momentini döredýär.

Köplenç ýagdaýlarda generatordan aktiw-induktiv häsiýetli ýükleriň iýmittenýändigini sebäpli, statoryň I togy öz fazasy boýunça E elektrik hereketlendiriji güýçden φ ($0 < \varphi < 90^\circ$) burça yza galýar. Şonuň üçin generatorda bolýan hadysalaryň analizini ýeňilleşdirmek maksady bilen $I \cos \varphi$ we $I \sin \varphi$ düzüjilere dargadylýar. $I \cos \varphi$ düzüjä generator tarapyndan özüni herekete getirýän turbina görkezilýän mehaniki reaksiýa, $I \sin \varphi$ bolsa generatoryň esasy Φ_{oy} magnit akymyny gowşadyjy magnit reaksiýa hökümünde seredilýär.

3.1.5. Sinhron generatoryň diagrammasy

Sinhron generatora ýük birikdirilen wagtynda, statorda döreýän Φ_{st} magnit akymynyň esasy bölegi statoryň we rotoryň magnitgeçirijileri hem-de olaryň arasyndaky howa boşlugyň üsti boýunça geçýär. Bu akym statorda E_{st} elektrik hereketlendiriji güýji indusirleýär. Statoryň magnit akymynyň galan bölegi (Φ_δ) diňe statoryň sargylaryny kesip geçýär we olarda E_δ elektrik hereketlendiriji güýji indusirleýär. Φ_δ we E_δ deňişlilikde ýaýran magnit akymy we elektrik hereketlen-

diriji güýç. Şeýle-de, rotoryň Φ_{oy} magnit akymy tarapyndan statorda E_0 elektrik hereketlendiriji güýji indusirleýär. Ýokarda aýdylanlara esaslanyp Kirhgofyň ikinji kanunynyň esasynda, ýükli işleýän generatoryň naprýaženiýesi üçin aşakdaky aňlatmany ýazyp bileris:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + \underline{E}_{st} + \underline{E}_\delta - R_{st} \cdot \underline{I}, \quad (3.4)$$

bu aňlatmada R_{st} – statoryň sarymynyň aktiw garşylygy, I – statoryň togy. Real ýagdaýda, statoryň R_{st} aktiw garşylygynyň örän azlygy sebäpli, ondaky $R_{st} \cdot I$ naprýaženiýe peselmesi hasaba alynmaýar we (3.4) aňlatma aşakdaky görnüşde ýazylyar:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 + \underline{E}_{st} + \underline{E}_\delta. \quad (3.5)$$

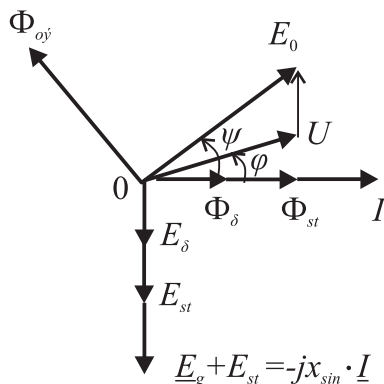
Generator boş işleýän wagtynda Φ_{st} we Φ_δ magnit akymalaryň nola deňligi sebäpli:

$$\underline{U} = \underline{E}_0. \quad (3.6)$$

Aktiw-induktiv häsiýetli ýüki bolan generatoryň diagrammasy 3.10-njy suratda görkezilendir.

Statorda indusirlenýän E_0 elektrik hereketlendiriji güýç öz fazasy boýunça Φ_0 magnit akymyndan 90° yza galýar.

I tok bolsa, seredilýän ýagdaýda, E_0 elektrik hereketlendiriji güýçden ψ burça yza galýar. Φ_{st} we Φ_δ magnit akymalaryň statoryň toguna proporsionaldygy sebäpli, olar öz fazalary boýunça I tok bilen gabat gelýärler.



3.10-njy surat. Aktiw-induktiv häsiýetli ýüki bolan sinhron generatoryň diagrammasy

Statorda indusirlenýän E_{st} we E_δ elektrik hereketlendiriji güýçler Φ_{st} -den we Φ_δ -den 90° burça yza galýar. Generatoryň U naprýaženiýesi (3.5) aňlatmanyň esasynda gurulýar. Köplenç hasaplamalarda E_{st} we E_δ elektrik hereketlendiriji güýçleriň jemine, generatoryň statorynyň *sinhron garşylygy* diýip atlandyrylýan X induktiv garşylykdaky naprýaženiýe peselmesi hökminde seredilýär:

$$\underline{E}_{st} + \underline{E}_\delta = -jx \cdot \underline{I}. \quad (3.7)$$

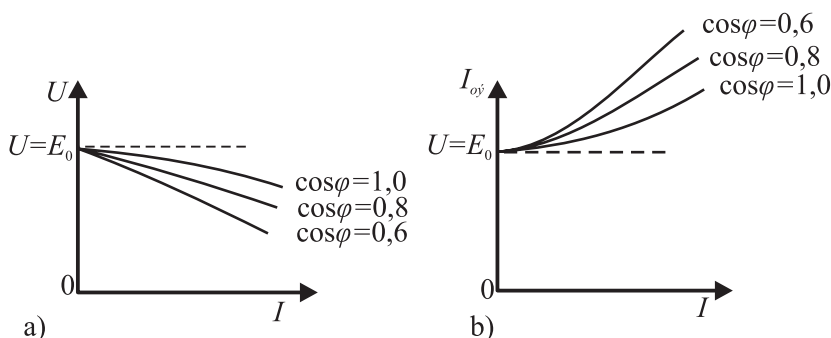
(3.7) aňlatmany hasaba alyp (3.5) deňligi aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - jx \cdot \underline{I}. \quad (3.8)$$

3.10-njy suratdaky diagrammadan görnüşi ýaly, generatoryň U naprýaženiýesi öz fazasy boýunça I tokdan, φ burça öňe düşýär. Egerde generatordan iýmitlenýän ýüküň aktiw-sygym häsiýeti bar bolsa, onda I tok öz fazasy boýunça U naprýaženiýeden φ burça öňe düşer.

3.1.6. Sinhron generatoryň daşky we sazlaýjy häsiýetnamalary

Sinhron generator ýükli işleýän wagtynda, ýüküň häsiýetine we onuň togunyň ululygyna baglylykda U naprýaženiýäniň ululygynyň, E_0 elektrik hereketlendiriji güýçden nähili derejede tapawutlanýandygyny bilmek, amaly taýdan örän ähmiyetlidir. Bu tapawudy generatoryň daşky häsiýetnamasy diýip atlandyrylýan $U = f(I)$ baglanyşyk görkezýär. 3.11-nji *a* suratda kuwwat koeffisiýentleri $\cos \varphi = 0,6; 0,8; 1,0$ bolan aktiw-induktiv häsiýetli ýükler üçin generatoryň daşky häsiýetnamasy görkezilendir.



3.11-nji surat. Sinhron generatoryň daşky (a) we sazlaýjy (b) häsiýetnamalary

Häsiýetnamalardan görnüşi ýaly, ýüküň togunyň ösmegi bilen generatoryň naprýaženiýesi peselýär. Bu peselmeklik statoryň togy

tarapyndan döredilýän Φ_{st} magnit akymyň generatoryň Φ_{oy} esasy magnit akymyna edýän täsiri we generatoryň sarymlaryndaky naprýaženiýe peselmesi bilen düşündirilýär.

$\cos \varphi$ kuwwat koeffisiýentiniň peselmegi statoryň togunyň reaktiw böleginiň ösmegine, ol hem öz gezeginde naprýaženiýäniň has hem peselmegine getirýär.

Generatoryň naprýaženiýesini belli bir derejede saklamaklyk I_{oy} oýandyryjy toguň ululygyny üýtgetmek arkaly ýerine ýetirilýär. Meselem, ýüküň $\cos \varphi$ kuwwat koeffisiýentiniň peselýän wagtynda generatoryň naprýaženiýesini hemişelik ($U = \text{const}$) saklamak üçin oýandyryjy sarymyň toguny ýokarlandyrmak ýeterlikdir. Generatoryň naprýaženiýesiniň hemişelik ululygynda I_{oy} oýandyryjy toguň statoryň I toguna bolan $I_{oy} = f(I)$ baglanyşygyna generatoryň *sazlaýjy häsiýetnamasy* diýilýär. 3.11-nji *b* suratda ýüküň kuwwat koeffisiýentleriniň $\cos \varphi = 0,6; 0,8; 1,0$ bolan ýagdaýlary üçin generatoryň sazlaýjy häsiýetnamalary görkezilen. Häzirki döwürde sinhron generatorlaryň naprýaženiýesini hemişelik saklamaklyk ýörite awtomatlaşdyrylan sazlaýjy gurluşlaryň kömegi arkaly amala aşyrylýar.

3.1.7. Sinhron generatorlaryň özara parallel işe goýberilişi

Elektrik energiýanyň öndürilişiniň özüne düşýän gymmatyny arzanlatmak, energiýany az ýitgiler bilen ulanyjylara geçirmek hem-de olary kadaly energiýa bilen üpjün etmek maksady bilen birnäçe elektrik stansiýalar bir energetiki ulgama birikdirilýär. Adatça, stansiýalaryň her biri birnäçe generatordan durýar we olar özara parallel işleýärler. Generatorlary özara parallel işe goýbermek üçin ýa-da işläp duran generatorlara goşmaça parallel generator birikdirmek üçin birnäçe şertleri ýerine ýetirmeli.

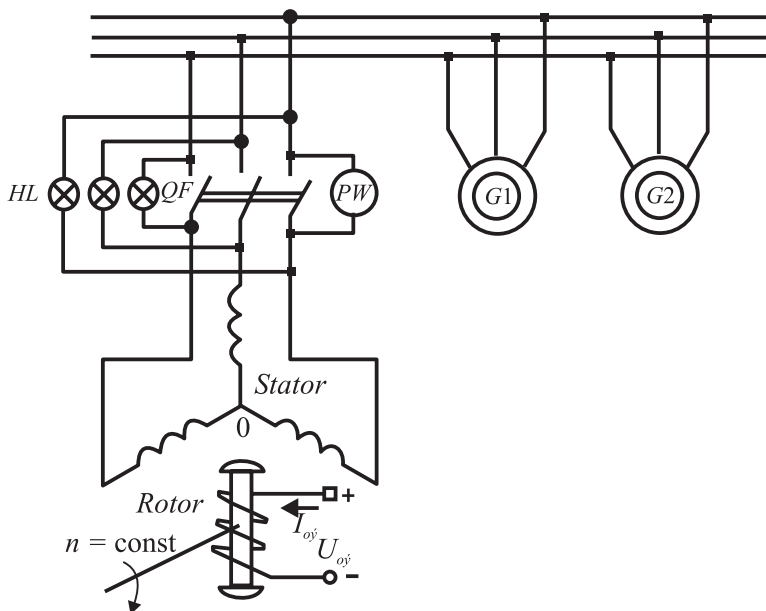
İşe goýberilýän sinhron generatoryň we işläp duran generatorlaryň (energoulgamyň) deň ýygylýkly naprýaženiýeleri bolmalydyr ($f_{gen} = f_{set}$).

İşe goýberilýän generatoryň naprýaženiýesi öňki işläp duran generatorlaryň naprýaženiýesine deň bolmalydyr ($U_{gen} = U_{set}$).

İşe goýberilýän we işläp duran generatorlaryň naprýaženiýeleriniň fazalarynyň gezekleşip gelişleri deň bolmalydyr.

Generatory parallel işe goýbermek üçin şeýle şertleriň ýerine ýetirilmegine *sinhronlaşdyrmak* diýilýär.

Sinhronlaşdyrmak generatoryň ähli (A, B, C) fazalary üçin ýerine ýetirilýär. Ýagny işe goýberilýän generatoryň we ulgamyň A, B we C fazalary biri-birine hökman gabat gelmeli. 3.12-nji suratda üçfazaly sinhron generatoryň energoulgama görä sinhronlaşdyrylyşy üçin niýetlenen shemasy görkezilendir.



3.12-nji surat. Generatorlary sinhronlaşdyrmagyň ýönekeýleşdirilen shemasy

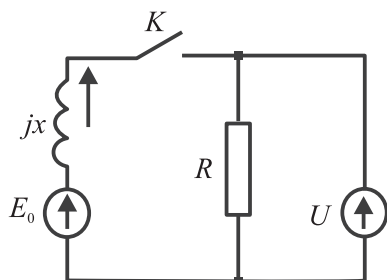
Işe goýberilýän generatoryň naprýaženiýesiniň ýygylgyny energoulgamyň naprýaženiýesiniň ýygylgyna deňlemek üçin generatory herekete getirýän turbinanyň (bug, suw we ş.m.) aýlaw ýygylgy üýtgedilýär. Generatoryň naprýaženiýesini ulgamyň naprýaženiýesine deňlemeklik ($U_{gen} = U_{set}$) oýandyryjy sarymyň I_0 toguny üýtgetmek arkaly ýerine ýetirilýär.

Generatoryň we ulgamyň bir atly faza degişli naprýaženiýeleriniň biri-birine fazalary boýunça gabat gelýändigini ýa-da gelmeýändigini ýörite woltmetirleriň we üç sany lampanyň kömegi arkaly anyklanylýar (3.12-nji surat). Işe goýberilýän generator ulgama görä doly sinhron-

laşan ýagdaýynda woltmetr nol görkezýär, lampalar bolsa sönýärler. Bu ýagdaýda generator ulgama görä parallel işe goýberilip bilner. Eger-de lampalar ýanyp-sönýän bolsalar, onda işe goýberilýän generatoryň naprýażeniýesiniň ýygylgynyň energoulgamyň ýygylgyna deň däldegi, lampalaryň ikisiniň ýa-da üçüsiniň ýanyp durmagy bolsa fazalaryň gezekleşip gelişleriniň gabat gelmeýändigini görkezýär.

3.1.8. Sinhron generatoryň reaktiw kuwwatynyň sazlanlyşy

Energoulgama görä parallel işe goýberilýän sinhron generatora ýüze çykýan hadysalary analiz etmek üçin, ony özüne energiýa taýdan ekwiwalent bolan shema bilen, energoulgam bolsa U naprýażeniýeli ekwiwalent generator bilen çalşyrylýar (3.13-nji surat).



3.13-nji surat. Energoulgama görä parallel işe goýberilýän sinhron generatoryň shemasy

Shemada generatoryň togunyň položitel ugry E_0 elektrik hereketlendiriji güýjüň ugry bilen gabat gelýär diýip kabul edilýär. Şeýle-de, analiz wagty energoulgamyň düzümine girýän generatorlaryň bilelikde öndürýän kuwwatlarynyň olara görä parallel işe goýberilýän generatoryň öndürýän kuwwatyndan onlarça esse uludygy sebäpli, ulgamyň naprýażeniýesi generatoryň naprýażeniýesine bagly däl diýip kabul edilýär. Şonuň

üçin parallel işe goýberilýän generatoryň islendik iş düzgüninde onuň naprýażeniýesi ulgamyň naprýażeniýesine deňdir. Ýagny generatoryň naprýażeniýesi onuň oýandyryjy sarymynyň toguna bagly däl diýip kabul edilýär. Generatoryň U naprýażeniýesi bilen E_0 elektrik hereketlendiriji güýjüň we I toguň arasynda:

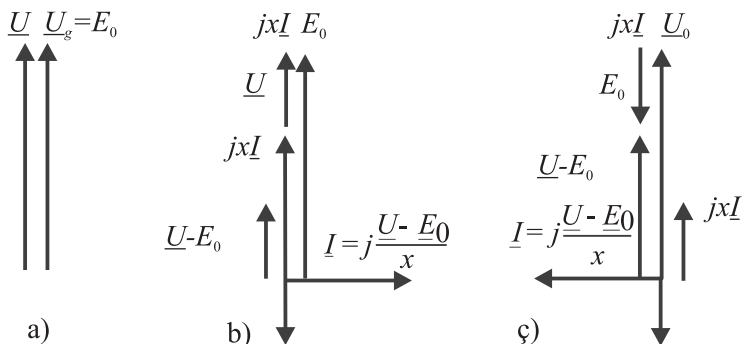
$$\underline{E}_0 = \underline{U} + jx \cdot \underline{I}, \quad (3.9)$$

baglanyşygyň bardygy sebäpli, onuň toguny aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}_0 - \underline{U}}{jx} = j \frac{\underline{U} - \underline{E}_0}{x}. \quad (3.10)$$

(3.10) aňlatmadan görnüşi ýaly, \underline{U} naprýaženiýäniň we jx reaktiw garşylygyň berlen ululyklarynda \underline{I} tok \underline{E}_0 elektrik hereketlendiriji güýje hem-de \underline{E}_0 -yň \underline{U} naprýaženiýe bilen emele getirýän fazalar tapawudyna baglydyr. Sinhronlaşma wagtynda generatoryň \underline{E}_0 elektrik hereketlendiriji güýjüniň energoulgamyň naprýaženiýesine deňlenýändigini sebäpli, statoryň togy nola deň bolýar.

Netijede, bu ýagdaýda generator özünden energoulgama hiç hili energiýa bermeyär we ondan energiýa almaýar. $\underline{E}_0 = \underline{U}$ bolan ýagdaýa degişli diagramma 3.14-nji a suratda görkezilendir. Sinhronlaşmadan soňra oýandyryjy toguň üýtgemegi generatoryň \underline{E}_0 elektrik hereketlendiriji güýjüň üýtgemegine, ol hem öz gezeginde statorda \underline{I} toguň ýüze çykmagyna getirýär.



3.14-nji surat. Oýandyryş sarymyň toguň generatoryň iş düzgünine edýän täsirini görkezýän diagrammalar

Eger-de generator ulgamdan aýratyn özbaşdak işleýän bolsa, onda oýandyryjy toguň üýtgemegi generatoryň \underline{U} naprýaženiýesiniň üýtgemegine getirer. Uly kuwwatly energoulgama görä parallel işleýän generatoryň naprýaženiýesiniň onuň islendik iş düzgününde üýtgemän galýandygy sebäpli, generatoryň jemleýji magnit akymy hem ululygy boýunça hemişelik galýar. Netijede sinhronlaşmadan soň $\underline{I}_{oý}$ oýandyryjy toguň ösmegi, $\Phi_{oý}$ magnit akymynyň ösmegine getirýändigini sebäpli, statoryň Φ_{st} magnit akymy oýandyryjy sarymyň

Φ_{oy} magnit akymyny magnitsizlendirmäge sarp bolýar. Ýagny statoryň togy induktiw häsiýete eýe bolýar. Bu ýagdaýda energoulgamdan ulanyjylara berilýän reaktiw energiýanyň belli bir bölegini generator öndürüp başlaýar. Ýagny generator induktiw häsiýetli reaktiw energiýanyň çeşmesi bolup hyzmat edýär. Bu ýagdaý üçin gurlan diagramma 3.14-nji *b* suratda görkezilendir.

Diagrammadan görnüş i ýaly, oýandyryjy toguň ösmegi E_0 elektrik hereketlendiriji güýjüň U naprýaženiýeden uly bolmagyna hem-de statoryň togunyň öz fazasy boýunça U -dan 90° burça yza galmagyna getirýär. Sinhronlaşmadan soň generatoryň oýandyryjy toguň peselmegi Φ_{oy} magnit akymynyň hem peselmegine getirýär. Emma generatoryň jemleýji magnit akymynyň hemişelik galýandygy sebäpli, statoryň togy tarapyndan döredilýän Φ_{st} magnit akymy Φ_{oy} magnit akymyny güýçlendirmäge sarp bolýar. Netijede statoryň üstünden sygym häsiýetli tok akyp başlaýar. Ýagny statoryň I togy öz fazasy boýunça U naprýaženiýeden 90° burça öňe düşýär. Şeýlelikde, generator energoulgama sygym häsiýetli reaktiw energiýa berip başlaýar. Bu ýagdaý üçin gurlan diagramma 3.14-nji *ç* suratda görkezilen. Ýokarda seredilen ýagdaýlaryň ikisinde hem statoryň I togy bilen E_0 elektrik hereketlendiriji güýçleriň arasynda 90° burça deň bolan fazalar tapawudy emele gelýändig i sebäpli generatoryň öndürýän aktiw kuwwaty nola deňdir ($P = 3 E_0 \cdot I \cos \varphi = 0$). Netijede, generatoryň oýandyryjy togunyň ululygyny üýtgetmek arkaly energoulgama parallel işleýän generatoryň diňe reaktiw kuwwatyny sazlamak mümkin:

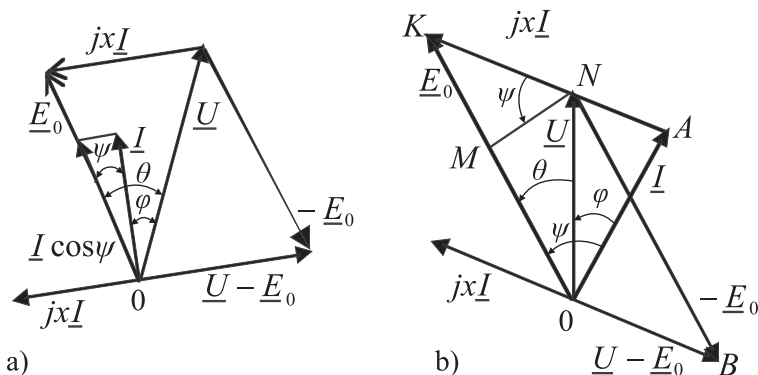
$$Q = 3E_0I \sin \varphi. \quad (3.11)$$

3.1.9. Sinhron generatoryň aktiw kuwwatynyň sazlanlyşy

Energoulgama görä boş işleýän sinhron generatoryň oýandyryjy togy $E_0 = U$ şerti kanagatlandyryan wagtynda generatoryň öndürýän aktiw kuwwaty nola deňdir ($P = 3 E_0 I \cos \varphi = 0$). Generatoryň energoulgamyň öndürýän aktiw kuwwatynyň belli bir bölegini öndürmegi üçin onuň rotoryna goşmaça tizlenme berilýär. Bu operasiýa turbinary herekete getirýän suwuň ýa-da buguň mukdaryny köpeltmek

arkaly ýerine ýetirilýär. Goşmaça tizlenme alandan soňra rotoryň polýuslary, özüniň boş işleýän wagtyndaky ýagdaýyna görä θ burça öňe tarap (aýlaw hereketiň ugruna) öwrülýär.

Netijede, rotoryň Φ_0 magnit akymy tarapyndan statorda indusirlenýän E_0 elektrik hereketlendiriji güýç generatoryň jemleýji magnit akymy tarapyndan döredilýän U -dan fazasy boýunça θ burça öňe düşýär. Şeýle ýagdaýa deňişli diagramma 3.15-nji *a* suratda görkezilendir.



3.15-nji surat. Sinhron generatoryň $E_0 = U$ we $E_0 > U$ ýagdaýlara deňişli diagrammalary

$(U - E_0)$ tapawudyň nola deň däldegi sebäpli, statorda ýüze çykýan I tok öz fazasy boýunça $(U - E_0)$ tapawutdan 90° burça öňe düşýär. Statorda ýüze çykýan I tok bilen E_0 -dan arasynda ψ fazalar tapawudynyň emele gelmegi generatoryň $P = 3E_0 I \cos \psi$ mukdardaky aktiw kuwwaty energoulgama berip başlamagyna getirýär. Eger-de generatory herekete getirýän buguň ýa-da suwuň mukdary öňkünden hem köpeldilse, rotoryň öňe tarap öwrülme θ burçy has hem ösýär. Bu bolsa generator tarapyndan energoulgama berilýän aktiw kuwwatyň ýene-de ösmegine getirýär.

Generatoryň öndürýän aktiw kuwwatynyň θ burça bolan baglanyşygy üçin aňlatmany 3.15-nji suratdaky $E_0 > U$ ýagdaý üçin gurlan diagrammadan peýdalanyp aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$MN = U \sin \theta = xI \cdot \cos \psi ; \quad (3.12)$$

$$P = 3E_0 I \cdot \cos \psi = 3 \frac{E_0 U}{x} \sin \theta. \quad (3.13)$$

(3.13) aňlatmadan görnüşi ýaly, U naprýaženiýäniň hem-de oýandyryjy sarymyň I_{oy} togunyň üýtgemeyän ululyklarynda $U = \text{const}$; $I_{oy} = \text{const}$; $E_0 = \text{const}$ generatoryň öndürýän aktiw kuwwaty $\sin \theta$ burça göni baglydyr.

3.15-nji b suratda görkezilen diagrammadan peýdalanyň $OA = E_0 \cos \psi = U \cos \varphi$ aktiw kuwwatyň aňlatmasyny aşakdaky görnüşde hem ýazyp bileris:

$$P = 3E_0 I \cos \psi = 3U \cdot I \cos \varphi. \quad (3.14)$$

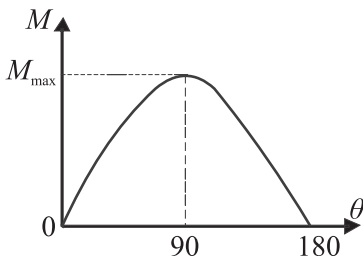
Şeýlelikde, statorda ýitirilýän $3R_{st} \cdot I^2$ – aktiw kuwwatyň örän azlygy sebäpli, generatoryň energoulgama berýän aktiw kuwwaty onuň elektromagnit kuwwatyna deň: $3UI \cos \varphi = 3E_0 I \cos \psi$ – diýip kabul edilýär.

3.1.10. Sinhron generatoryň energoulgama görä parallel işleýşiniň durnuklylygy

Generatoryň özüni herekete getirýän turbina görkezýän M_{st} statiki garşylyk momentini P elektromagnit kuwwat arkaly aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$M = \frac{9,55 \cdot P}{n_0} = \frac{9,55 \cdot 3E_0 U}{n_0 x} \sin \theta = M_{\max} \cdot \sin \theta, \quad (3.15)$$

bu ýerde M_{\max} maksimal elektromagnit moment.



3.16-njy surat. Sinhron generatoryň burç häsiýetnamasy

$M = f(\theta)$ baglanyşyga sinhron generatoryň *burç häsiýetnamasy* diýilýär we ol 3.16-njy suratda görkezilendir.

Generatoryň energoulgama görä durnukly işlemegi üçin $dM/d\theta > 0$ şerti kanagatlandyrmaly. Bu şert diňe θ burçyň ösýän çäginde M elektromagnit moment hem ösýän bolsa mümkindir. Ol generatory herekete getirýän turbinaýň aýlaýjy momenti bilen gene-

ratoryň oňa döredýän M_{st} statiki garşylyk momentiniň arasyndaky deňagramlylygy saklamak üçin zerurdyr. Momentleriň arasynda deňagramlylyk saklanylmadyk ýagdaýynda generator n_0 sinhron aýlaw ýylylygyny $dM/d\theta$ näçe uly boldugyça, (ýa-da θ burçuň ululygy näçe kiçi boldugyça) şonça-da, çalt alýar. Eger-de $\theta > 90^\circ$ bolsa, onda generatoryň işlemek mümkinçiligi tamamlanýar.

3.1.11. Sinhron generatorlaryň simmetrik däl iş düzgünleri

Elektrik çeşmelerinden iýmitlenýän birfazaly ýükleriň fazalar boýunça deň bölünmezligi kähalatlarda elektrik geçiriji liniýalarda bir ýa-da iki fazaly gysga utgaşmalar sinhron generatorlarda simmetrik däl iş düzgünleriniň ýüze çykmagyna getirýär. Sinhron generatorlaryň simmetrik däl iş düzgünlerini analiz etmek üçin onuň naprýaženiýeleri hem-de toklary göni, ters we nol yzygiderliligiň simmetrik düzüjilerine dargadylýar.

Meselem, generatoryň faza naprýaženiýeleri: göni, ters we nol yzygiderliligiň naprýaženiýeleriniň jemi görnüşinde kesgitlenilýär:

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= \underline{U}_{A1} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{A0}; \\ \underline{U}_B &= \underline{U}_{B1} + \underline{U}_{B2} + \underline{U}_{B0}; \\ \underline{U}_C &= \underline{U}_{C1} + \underline{U}_{C2} + \underline{U}_{C0}.\end{aligned}\tag{3.16}$$

(3.16) deňlemeler ulgamynyň düzümine girýän göni, ters we nol yzygiderliligiň naprýaženiýeleri degişlilikde:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{A1} &= \frac{\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C}{3}; & \underline{U}_{B1} &= a^2\underline{U}_{A1}; & \underline{U}_{C1} &= a\underline{U}_{A1}; \\ \underline{U}_{A2} &= \frac{\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C}{3}; & \underline{U}_{B2} &= a\underline{U}_{A1}; & \underline{U}_{C2} &= a^2\underline{U}_{A1}; \\ \underline{U}_{A0} &= \underline{U}_{B0} = \underline{U}_{C0} = \frac{\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C}{3}.\end{aligned}\tag{3.17}$$

Göni yzygiderliligiň naprýaženiýesi oýandyrylyş ulgamynyň magnit meýdany bilen ýakoryň göni yzygiderliliginiň togunyň magnit meýdanlary tarapyndan bilelikde döredilýär. Göni yzygiderliligiň to-

gunyň magnit meýdany rotor bilen sinhron aýlanýar. Şol sebäpli, göni yzygiderliligiň naprýaženiýesiniň deňlemesi edil generatoryň simmetrik iş düzgünlerindäki ýaly ýazylýar. Generatoryň magnit ulgamyň doýgun däl ýagdaýy üçin:

$$\underline{U}_{A1} = \underline{E}_f - z_1 \underline{I}_{A1}. \quad (3.18)$$

Aňlatmada E_f oýandyryjy ulgamyň magnit akymy tarapyndan ýakoryň faza sarymlarynda indussirlenýän elektrik hereketlendiriji güýç, $z_1 = T_1 + jx_1$ – göni yzygiderliligiň toguna ýakoryň faza sarymlarynyň görkezýän kompleks garşylygy, I_{A1} ýakoryň A fazasynyň göni yzygiderliliginiň togy.

A fazanyň ters we nol yzygiderliliginiň naprýaženiýeleri deňlikde:

$$\underline{U}_{A2} = -z_2 \underline{I}_{A2}; \quad (3.19)$$

$$\underline{U}_{A0} = -z_0 \underline{I}_{A0}. \quad (3.20)$$

Aňlatmalarda z_2 we z_0 ýakoryň faza sarymlarynyň ters we nol yzygiderliliginiň I_{A2} hem-de I_{A0} toklaryna görkezýän kompleks garşylyklary.

(3.18), (3.19) we (3.20) deňliklerden peýdalanyň, generatoryň faza naprýaženiýeleriniň deňlemelerini oýandyryş ulgamy tarapyndan indussirlenýän E_f elektrik hereketlendiriji güýjüň hem-de toguň simmetrik düzüjileri arkaly aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

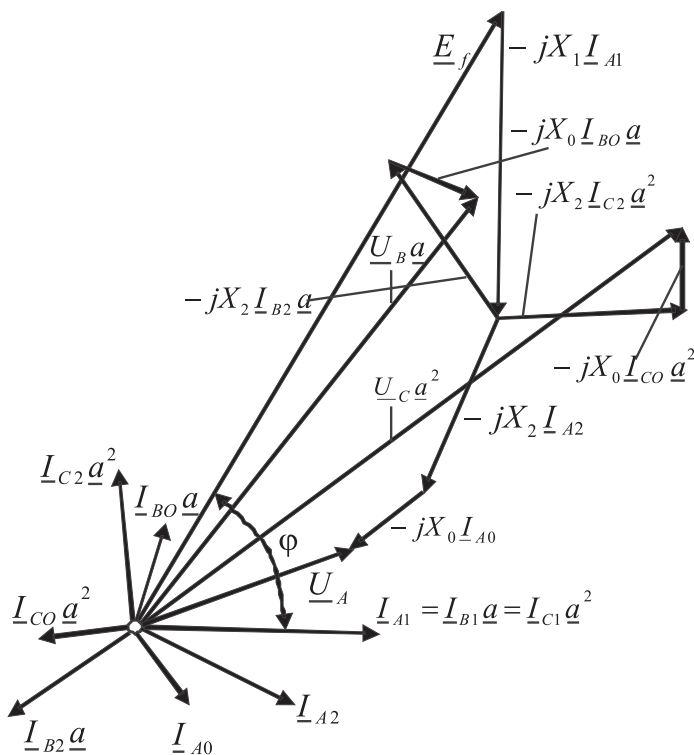
$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{E}_f - z_1 \underline{I}_{A1} - z_2 \underline{I}_{A2} - z_0 \underline{I}_{A0}; \\ \underline{U}_B &= a^2 (\underline{E}_f - z_1 \underline{I}_{A1}) - z_2 \underline{I}_{B2} - z_0 \underline{I}_{B0}; \\ \underline{U}_C &= a (\underline{E}_f - z_1 \underline{I}_{A1}) - z_2 \underline{I}_{C2} - z_0 \underline{I}_{C0}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

(3.21) deňlemeler ulgamy generatoryň simmetrik däl iş düzgüni üçin onuň faza naprýaženiýelerini E_f elektrik hereketlendiriji güýjüň we toklaryň simmetrik düzüjileri arkaly kesgitlemäge hem-de onuň diagrammasyny gurmaga mümkinçilik berýär. Emma gurulýan diagrammanyň örän çylşyrymlydygy sebäpli, ony ýönekeýleşdirmek

üçin (3.21) deňlemeler ulgamynyň ikinji deňligini (a), üçünjisini (a^2) köpeldip, indiki deňlemeler ulgamy alynýar:

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= \underline{E}_f - \underline{z}_1 \underline{I}_{A1} - \underline{z}_2 \underline{I}_{A2} - \underline{z}_0 \underline{I}_{A0}; \\ \underline{U}_B &= \underline{E}_f - \underline{z}_1 \underline{I}_{A1} - a \left(\underline{z}_2 \underline{I}_{B2} \right) - a \left(\underline{z}_0 \underline{I}_{B0} \right); \\ \underline{U}_C &= \underline{E}_f - \underline{z}_1 \underline{I}_{A1} - a^2 \left(\underline{z}_2 \underline{I}_{C2} \right) - a^2 \left(\underline{z}_0 \underline{I}_{C0} \right)\end{aligned}\quad (3.22)$$

naprýaženiýeleriň (3.22) deňlemeler ulgamy boýunça gurlan diagrammasy 3.17-nji suratda görkezilendir.



3.17-nji surat. Sinchron generatoryň naprýaženiýeleriniň simmetrik däl iş düzgüni üçin diagramma

Simmetrik ýükde $\underline{U}_A = a\underline{U}_B = a^2\underline{U}_C = \underline{U}_{A1}$ bolýar. Diagramma simmetrik däl ýükde \underline{U}_A , $a\underline{U}_B$, $a^2\underline{U}_C$ ululyklaryň degişli faza toklaryna baglylykda biri-birinden nähili tapawutlanýandygyny görkezýär.

Ters yzygiderliligiň fazalarynyň ($A \rightarrow C \rightarrow B$) gezekleşip gelşi göni yzygiderliligiňkiden iki fazasynyň ýerleriniň ($A \rightarrow C \rightarrow B$) çalyşýandygy bilen tapawutlanýar. Şol sebäpli, ters yzygiderliligiň faza toklarynyň emele getirýän aýlanýan magnit meýdany rotoryň aýlanma hereketiniň ters ugry boýunça sinhron ω_2 burç tizlik bilen aýlanýar ($\omega_2 = -\omega_1$). Şonuň üçin ters yzygiderliligiň aýlanýan magnit meýdanynyň hereket edýän rotora görä typma koeffisiýenti:

$$s_2 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2} = \frac{\omega_2 + \omega_2}{\omega_2} = 2. \quad (3.23)$$

$$\text{Göni yzygiderlilik üçin: } s_1 = \frac{\omega_1 - \omega_1}{\omega_1} = 0.$$

Ters yzygiderliligiň aýlanýan magnit meýdany polýuslary açyk görünmeýän generatoryň massiw polatdan taýýarlanan rotorynda köwlenme toklaryny emele getirýär. Bu bolsa rotorda goşmaça energiýa ýitgileriniň döremegine sebäp bolýar. Şonuň üçin ters yzygiderliligiň R_2 aktiw garşylygy göni yzygiderliligiň R_1 aktiw garşylygyndan uludyr ($R_2 > R_1$). Emma rotorda ýüze çykýan köwlenme toklarynyň döredýän magnit meýdanynyň ters yzygiderliligiň magnit meýdanyny gowşadýandygy sebäpli, $x_2 < x_1$ bolýar.

Ters yzygiderliligiň magnit meýdany rotoryň oýandyrylyş sarymlarynda ýygylgy $f_2 = 2f_1$ bolan elektrik hereketlendiriji güýç indussirleýär. Bu bolsa öz gezeginde statorda indussirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjüň wagta göre üýtgemeginiň sinusoidal görnüşden tapawutlanmagyna getirýär.

Eger-de statoryň sarymlary neýtral simli birikdirilen bolsa ýada sarymlaryň neýtral nokady ýere birikdirilen bolsa, onda simmetrik däl ýükde nol yzygiderliligiň toklarynyň ýüze çykmagy mümkindir. Bu toklaryň fazalar boýunça ululyklarynyň özara deňligi ($\underline{I}_{A0} = \underline{I}_{B0} = \underline{I}_{C0}$) sebäpli, olar aýlanýan däl-de pulsirlenýän magnit meýdanyny döredýärler. Şonuň üçin olar liniýa naprýaženiýeleriniň simmetrik ýagdaýyna täsir edip bilmeýärler. Emma generatoryň faza naprýaženiýeleriniň simmetrik ýagdaýyna täsir edýärler.

3.2. Sinhron hereketlendirijiler

3.2.1. Sinhron hereketlendirijiniň işleýiş düzgüni

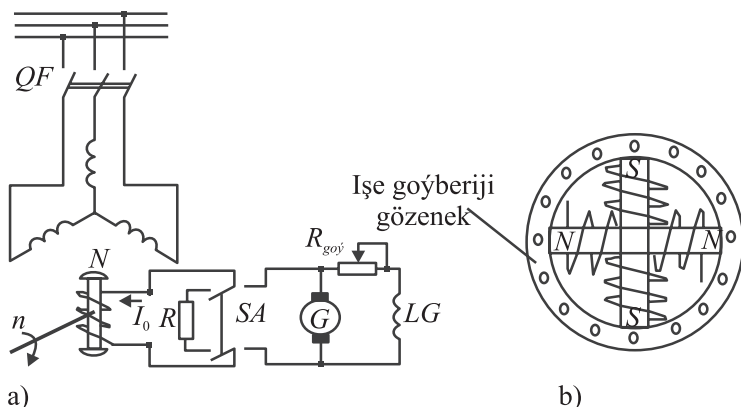
Sinhron maşyny hereketlendiriji hökmünde ulanmak üçin, onuň statory üçfazly toguň setine, rotoryň oýandyryjy sarymy bolsa, hemişelik toguň çeşmesine birikdirilýär. Emma hereketlendiriji işe goýberilende statoryň aýlanýan magnit meýdanynyň N we S polýuslarynyň hereketsiz duran rotoryň polýuslaryna görä, örän uly tizlik bilen ýerlerini çalyşyandyklary sebäpli, belli bir inersiýa momenti bolan rotora ululyklary boýunça deň, ugurlary boýunça garşylykly güýçler täsir edýär. Statoryň magnit meýdany 1 minudyň dowamynda 3000 aýlawy ýerine ýetirýän bolsa ($n_0 = 3000$ aýl/min), onda onuň polýuslary rotoryň polýuslarynyň golaýyndan 1 sekuntda 50 gezek geçýär. Netijede, rotoryň işe goýberiliş momenti nola deň bolýar $M_{goý} = 0$ we ol dynçlyk ýagdaýyndan gozganyp bilmeýär. Sinhron hereketlendirijiniň işe goýberiliş momentiniň nola deňdigi sebäpli, ony işe goýbermek üçin: 1) asinhron işe goýbemek; 2) hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäniň ýygylgyny üýtgetmek; 3) herekete getiriji hereketlendirijilerden peýdalanmak ýaly usullar peýdalanylýar. Bu usullaryň hemmesinde rotor sinhron aýlaw ýygylgyna ýakyn ýygylga çenli ýetirilýär we şondan soňra ol sinhronlaşma girizilýär.

Sinhron hereketlendirijileri asinhron işe goýbermek usuly

Önümçilikde shemasy 3.18-nji *a* suratda görkezilen *sinhron hereketlendirijiniň asinhron işe goýberilişi* diýip atlandyrylýan usuly giňden peýdalanylýar.

Şeýle usul bilen işe goýberilýän sinhron hereketlendirijiniň rotory özüniň oýandyryjy sarymyndan başga-da, edil asinhron hereketlendirijiniň gysga birleşdirilen rotorynyňka meňzeş, *işe goýberiji gözenek* diýip atlandyrylýan sarym bilen üpjün edilýär (3.8-njy *b* surat).

İşe goýberiji sarymyň sterženleri rotoryň polýus uçlyklarynda ýerleşdirilýär we olar biri-biri bilen ýörite halkalaryň kömegi arkaly birikdirilýärler. Hereketlendirijini şu usul bilen işe goýbermek üçin, ilki bilen onuň oýandyryjy sarymy SA açaryň kömegi arkaly R rezistora birikdirilýär. Adatça, R rezistoryň garşylygy oýandyryjy sarymyň aktiw garşylygyndan $10 \div 15$ esse uly edip alynýar. Soňra QF awtomatyň kömegi arkaly stator üçfazly toguň setine birikdirilýär.



3.18-nji surat. Sinhron hereketlendirijiniň asinhron işe goýberiliş shemasy (a) we rotory (b)

Şol ýagdaýda sinhron hereketlendiriji edil asinhron hereketlendiriji ýaly hereket edip başlaýar. Rotoryň aýlaw ýygylgy hereketlendirijiniň n_0 sinhron aýlaw ýygylgyna ýakyn ýygylk ($n \geq 0,95 n_0$) bilen durnukly hereket edip başlandan soň SA açaryň kömegi arkaly rotoryň oýandyryjy sarymyny hemişelik toguň çeşmesine birikdirilýär. Rotoryň sarymlary hemişelik toguň çeşmesine birikdirileninden soňra ýüze çykýan sinhronlaşdyryjy momentniň täsirinde hereketlendiriji n_0 sinhron aýlaw ýygylk bilen hereket edip başlaýar.

Hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäniň ýygylgyny üýtgetmek usuly

Bu usul sinhron hereketlendirijiniň naprýaženiýesiniň ýygylgyny noldan nominala çenli erkin üýtgedip bolýan wagtynda mümkindir. Eger-de hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäniň ýygylgy kem-kemden ýokarlandyrylsa statorda emele gelýän aýlanýan magnit meýdanynyň $\left(n_0 = \frac{60f}{p} \right)$ sinhron aýlaw ýygylgy hem şoňa görä ýokarlanýar. Bu bolsa rotoryň aýlaw ýygylgynyň kem-kemden ýokarlanmagyna getirýär. Şeýle usul bilen hereketlendiriji herekete girizilende ol işe goýberiş pursadynyň dowamynda sinhron iş düzgüninde işleýär.

Herekete goýberiji hereketlendiriji arkaly işe goýbermek usuly

Bu usulda sinhron hereketlendirijiniň rotory hemişelik toguň çeşmesine birikdirilmeýär we ony ýörite herekete getiriji hereketlendiriji-

niň kömegi arkaly özüniň nominal aýlaw ýygylgyna ýakyn ýygylga çenli herekete getirilýär. Hereketlendiriji nominal aýlaw ýygylgyna golaý baranyndan soňra onuň statory üçfazly naprýaženiýäniň setine, rotorynyň sarymlary bolsa hemişelik toguň çeşmesine birikdirilýär we hereketlendiriji sinhronlaşma ýagdaýyna girýär. Soňra rotory herekete getiriji asinhron hereketlendiriji bilen sinhron hereketlendirijiniň arasyndaky mehaniki baglanyşyk aýrylýar.

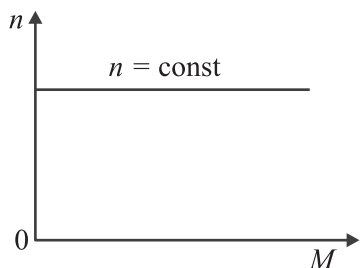
Kuwwatly sinhron hereketlendirijiler işe goýberilen pursatynda statorda ýüze çykýan $I_{\text{goý}}$ togy çäklendirmek maksady bilen, hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäni ýörite awtotransformator arkaly peseltmek usuly hem ulanylýar.

Sinhron hereketlendirijiniň mehaniki we işçi häsiýetnamalary

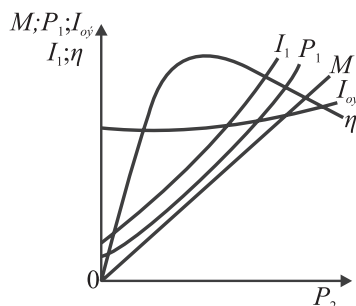
Sinhron hereketlendirijiniň rotorynyň aýlaw ýygylgynyň onuň aýlaýjy momentine görä hemişelik galýandygy sebäpli, mehaniki häsiýetnama göni çyzygy berýär (3.19-njy surat).

Sinhron hereketlendirijileriň işçi häsiýetnamalary setiň naprýaženiýesiniň we onuň ýygylgynyň hemişelik ululyklaryndan alynýar ($U = U_n = \text{const}; f = f_n = \text{const}$).

Hereketlendirijiniň $M = f(P_2); I_1 = f(P_2); P_1 = f(P_2); I_{\text{oy}} = f(P_2); \eta = f(P_2)$ işçi häsiýetnamasy 3.20-nji suratda görkezilendir.



3.19-njy surat. Sinhron hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamasy



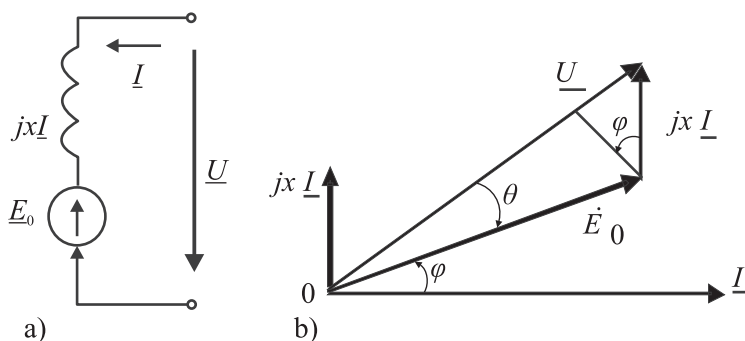
3.20-nji surat. Sinhron hereketlendirijiniň işçi häsiýetnamalary

Sinhron hereketlendirijiniň ω burç tizliginde M aýlaýjy moment bilen P_2 mehaniki kuwwatyň arasynda göni baglanyşygyň $\left(M = \frac{P_2}{\omega} \right)$

barlygy sebäpli M moment P_2 kuwwata görä ösýär. Hereketlendiriji boş iş düzgüninde maşynyň mehaniki we magnit ýitgilerini deňagramlaşdyrmak üçin setden aktiw kuwwat alýar. Şol sebäpli, hereketlendirijiniň boş iş düzgüninde statoryň togy nola deň däl. P_2 kuwwatyň ösmegi bilen hereketlendirijiniň setden alýan P_1 kuwwaty we I_1 togy hem ösýär. Sinhron hereketlendirijiniň η peýdaly täsir koeffisiýentiniň P_2 kuwwata bolan $\eta = f(P_2)$ baglanyşygy hem edil beýleki elektrik maşynlaryňka meňzeşdir.

3.2.2. Sinhron hereketlendirijiniň diagrammasy we onuň burç häsiýetnamasy

Sinhron hereketlendirijiniň çalşyрма shemasynda (3.21-nji a surat) statoryň togunyň položitel ugry setiň naprýaženiýesiniň ugry bilen gabat gelýär diýip kabul edilýär.



3.21-nji surat. Hereketlendirijiniň çalşyрма shemasy (a) we diagrammasy (b)

3.21-nji a suratdaky shema $\underline{U} = \underline{E}_0 + jx \cdot \underline{I}$ deňleme we 3.21-nji b suratda görkezilen diagramma degişlidir. Sinhron generator we hereketlendiriji üçin gurlan diagrammalar özara deňeşdirilende U we E_0 ululyklaryň arasyndaky θ burçuň öz alamaty boýunça tapawutlanýandygyny görmek kyn däl. Ýagny sinhron hereketlendirijide E_0 öz fazasy boýunça U -dan θ burça yza galýar. Bu hadysa hereketlendirijä işçi mehanizm tarapyndan döredilýän garşylyk momentiniň täsirinde rotoryň we onuň magnit meýdanynyň statoryň aýlanýan magnit meýdanyndan θ burça yza galýandygy bilen düşündirilýär.

Hereketlendirijiniň üçfazly toguň setinden kabul edýän aktiw kuwwatynyň $P_1 = 3UI \cos \varphi$ aňlatmasyny $xI \cos \varphi = E_0 \sin \theta$ deňligi hasaba alyp (3.20-nji b surat) aşakdaky görnüşde ýazyp bileris.

$$P_1 = 3UI \cos \varphi = \frac{3E_0 U}{x} \sin \theta. \quad (3.24)$$

(3.24) aňlatmadan peýdalanyň sinhron hereketlendirijiniň aýlaýjy momentini aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

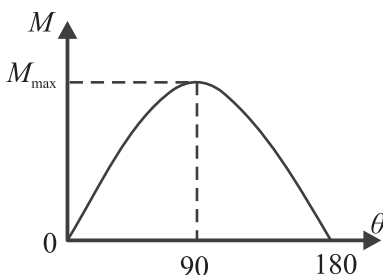
$$M = \frac{9,55 \cdot P_1}{n_0} = \frac{9,55 \cdot 3E_0 U}{n_0 \cdot x} \sin \theta = M_{\max} \cdot \sin \theta. \quad (3.25)$$

(3.25) aňlatmadan görnüşi ýaly, ($E_0 = \text{const}$; $U = \text{const}$) hereketlendirijiniň aýlaýjy momenti θ burça göni baglydyr. $M = f(\theta)$ baglanyşyga sinhron hereketlendirijiniň *burç häsiýetnamasy* diýilýär we ol 3.22-nji suratda görkezilendir.

$M = f(\theta)$ häsiýetnamasyndan görnüşi ýaly, θ burç $0 \div 90^\circ$ çenli aralykda üýtgände hereketlendiriji durnukly işleýär we bu ýagdaýda ($dM/d\theta > 0$) bolýar. Ýagny bu aralykda hereketlendirijiniň okuna goýlan ýük näçe ýokarlandygyça, onuň aýlaýjy momenti hem awtomatiki usulda şoňa görä bagly ösýär.

Eger-de $\theta > 90^\circ$ bolsa, onda hereketlendirijiniň okuna goýlan M_{st} – statiki garşylyk momenti hereketlendirijiniň aýlaýjy momentinden uly bolýar we ol işlemesini bes edýär. Hereketlendiriji nominal ýükünde we oýandyryjy togunda işlände θ burç $25 \div 30^\circ$ töwerekde bolýar. Hereketlendiriji gysga wagytlaýyn öz nominal ýükünden $2 \div 2,5$ esse uly ýüki hem herekete getirip bilýär:

$$\left(\lambda = \frac{M_{\max}}{M_n} = \frac{1}{\sin \theta} = 2,5 \div 2 \right).$$



3.22-nji surat. Sinhron hereketlendirijiniň burç häsiýetnamasy

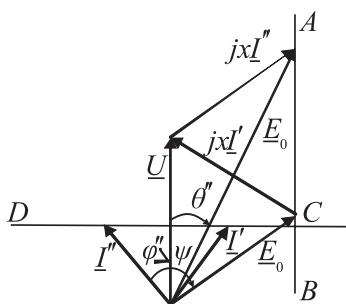
3.2.3. Sinhron hereketlendirijiniň oýandyryjy togunyň onuň iş düzgünine täsiri

Işçi mehanizm tarapyndan döredilýän M_{st} statiki garşylyk momentiniň berlen ululygynda hereketlendirijiniň üçfazly toguň se-tinden kabul edýän P_1 aktiw kuwwaty oýandyryjy toga bagly däl-dür. Emma $U = \text{const}$ ýagdaýda oýandyryjy toguň üýtgemegi E_0 elektrik hereketlendiriji güýjüň ululygynyň üýtgemegine, ol hem öz gezeginde statoryň togunyň, kuwwat koeffisiýentiniň we θ burçuň üýtgemegine getirýär. Aktiw kuwwatyň hemişelik ($P_1 = 3UI \cos \varphi = \frac{3E_0 U}{x} \sin \theta = \text{const}$) ululygynda $E_0 \sin \theta$ köpeltmek hasyly hem hemişelik $\left(E_0 \sin \theta = \frac{P \cdot x}{3U} = \text{const} \right)$ galýar. Şol sebäpli,

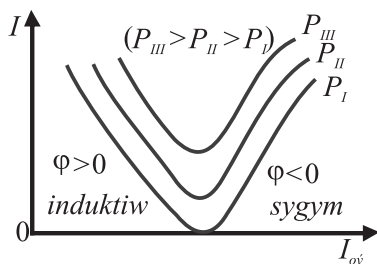
3.23-nji suratda görkezilen diagrammada E_0 -yň gutarýan uçlary U -a parallel bolan AB kesim boýunça süýşýär.

Şeýlelikde, U we E_0 ululyklaryň özara ýerleşişleri boýunça jxI hem-de I toguň ululygyny we ugruny kesgitlemäge mümkinçilik döredýär. Şeýle-de diagrammadan toklaryň gutarýan uçlarynyň naprýaženiýä perpendikulyar bolan CD göni çyzyk boýunça süýşýändigini we özüniň minimal ululygyny $\cos \varphi$, ($\varphi = 0$) ýagdaýda alyandygyny görmek kyn däl-dür.

Eger-de oýandyryjy tok öz nominalyndan uly bolsa ($E_0 > U$) statoryň I_{st} tok öz fazasy boýunça U naprýaženiýeden öňe düşýär (3.23-nji surat).



3.23-nji surat. Sinhron hereketlendirijiniň oýandyryş togunyň dürli ululyklary üçin gurlan diagramması



3.24-nji surat. Sinhron hereketlendirijiniň U görnüşli häsiýetnamasy

Netijede, hereketlendiriji setden P_1 aktiw kuwwat bilen bilelikde sygym häsiýetli reaktiw kuwwaty hem kabul edýär. Eger-de oýandyryjy tok öz nominalyndan pes bolsa ($U > E_0$), Hereketlendiriji setden P_1 aktiw kuwwat bilen birlikde induktiw häsiýetli reaktiw kuwwaty hem kabul edýär. Hereketlendirijiniň islendik iş düzgüni üçin, statoryň togy bilen, oýandyryjy togunyň arasyndaky baglanyşygy 3.24-nji suratda görkezilendir.

3.24-nji suratdaky $I = f(I_{oy})$ baglanyşyga sinhron hereketlendirijiniň U görnüşli häsiýetnamasy diýilýär. Baglanyşygyň çep şahasynyň induktiw häsiýetli, sag tarapynyň bolsa sygym häsiýetli kuwwat koeffisiýentleri bardyr. Hereketlendirijiniň U görnüşli häsiýetnamasyndan görnüşi ýaly sinhron hereketlendirijiniň setden kabul edýän togy onuň okuna goýlan mehaniki ýüke we oýandyryjy toga baglydyr.

Senagatyň dürli pudaklarynda ulanylýan mehanizmleri herekete getirmek üçin köpçülikleýin asinhron hereketlendirijiler peýdalanylýar. Olaryň bolsa aktiw-induktiv häsiýetli kuwwat koeffisiýenti bardyr. Şonuň üçin kärhanalaryň umumy kuwwat koeffisiýentlerini ýokarlandyrmak maksady bilen sygym häsiýetli kuwwat koeffisiýentleri bolan sinhron hereketlendirijiler (sinhron kompensatorlar) peýdalanylýar. Senagatda peýdalanmak üçin niýetlenen sinhron hereketlendirijileriň kuwwat koeffisiýentleri $\cos \varphi = 0,8 \div 0,9$ töwereginde bolýar.

Önümçilikde peýdalanylýan hereketlendirijileriň beýleki görnüşleri (asinhron hereketlendirijiler we hemişelik toguň hereketlendirijileri) bilen deňeşdirilende sinhron hereketlendirijileriň şu aşakdaky artykmaçlyklary bardyr:

- hereketlendirijiniň okuna goýlan ýüküň dürli ululyklarynda onuň durnukly aýlaw ýygylgynyň bolmagy;
- sinhron hereketlendirijiniň aýlaýjy momentiniň setiň naprýaženiýesine az bagly bolmagy;
- hereketlendirijiniň sygym häsiýetli kuwwat koeffisiýenti bilen işleýän wagtynda senagat kärhanalaryň umumy kuwwat koeffisiýentleriini ýokarlandyrmaga mümkinçilik bermegi;
- sinhron hereketlendirijiniň aşakdaky ýaly ýetmezçilikleri bardyr;
- hereketlendirijiniň işlemegi üçin üýtgeýän we hemişelik toklaryň zerurlygy;
- hereketlendirijiniň işe goýberilişiniň çylşyrymly bolmagy.

Aýlaw ýygylgyny üýtgedip bolmaýandygy (eger-de onuň aýlaw ýygylgyny oňa berilýän napýaženiýäniň ýygylgyny üýtgetmek arkaly üýtgedip bolýandygyny hasaba almasak).

3.3. Sinhron kompensatorlar

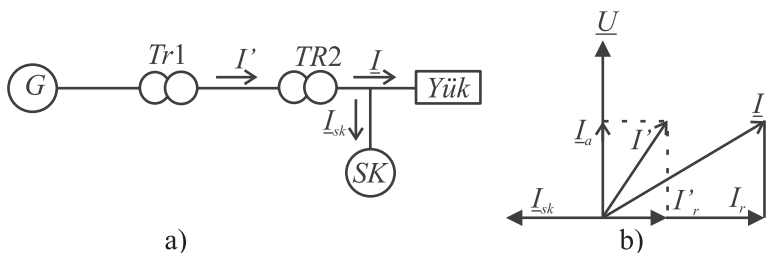
Sinhron kompensator reaktiw energiýanyň çeşmesi bolup, ol elektrik setleriniň kuwwat koeffisiýentini ýokarlandyrmak üçin peýdalanylýar. Sinhron kompensator boş iş düzgüninde işleýän sinhron hereketlendirijilerdir. Bu hereketlendirijiniň okuna hiç-hili ýük goýulmaýar. Sinhron hereketlendiriji setden diňe içki ýitgileriň öwezini dolmak üçin gerek bolan aktiw kuwwaty alýar.

Sinhron kompensatoryň esasy häsiýetnamasy onuň U görnüşli häsiýetnamasydyr (3.23-nji surat). Häsiýetnama sinhron hereketlendirijiniň $P_2 = 0$ ýagdaýyna degişli U görnüşli häsiýetnamasyndan örän az tapawutlanýar. Sinhron kompensatoryň öndürýän reaktiw kuwwaty onuň oýandyryjy toguna baglydyr. Aşa oýandyrylýan sinhron kompensator setiň napýaženiýesinden öz fazasy boýunça öňe düşýän togy bolan reaktiw energiýany sete berýär. Oýandyryjy togunyň nominaldan pes ýagdaýynda hereketlendiriji öz fazasy boýunça napýaženiýeden yza galýan togy bolan reaktiw energiýany setden alýar. Sinhron kompensator elektrik geçiriji liniýanyň gutaran ýerinde ýerleşdirilýär. Elektrik geçiriji liniýanyň togunyň reaktiw bölegini bölekleyin ýa-da dolulygyna kompensirmek arkaly onuň umumy toguny we ondaky elektrik energiýanyň ýitgilerini azaldýar. Sinhron kompensator köpçülikleýin induktiw häsiýetli ýükleri bolan setleriň reaktiw toklaryny kompensirmekde peýdalanylýar.

Şeýle häsiýetli ýükleri asinhron hereketlendirijiler döredýär. Bu ýagdaýda kompensatorlar aş aýandyrylan iş düzgüninde işleýärler.

Sinhron kompensatorlaryň sete birikdiriliş shemasy we onuň toklarynyň diagrammasy 3.25-nji a we b suratlarda görkezilendir.

Diagrammada I tok sinhron kompensatoryň sete birikdirilmedik wagtyndaky, I' tok bolsa sete sinhron kompensator birikdirilenden soňky tok. Diagrammada I_r toguň reaktiw düzüjisiniň sinhron kompensatoryň $I_{s,k}$ sygym togy bilen kompensirlenen bölegidir.



3.25-nji surat. Sinhron kompensatoryň birikdiriliş shemasy (a) we diagrammasy (b)

Sete sinhron kompensatoryň birikdirilmegi setiň naprýaženiýesi bilen ondan alynýan toklarynyň arsyndaky φ burçuň kiçelmegine we netijede kuwwat koeffisiýentiniň ýokarlanmagyna getirýär. Sinhron kompensatorlar tarapyndan reaktiw energiýanyň kompensirlenmegi elektrik geçiriji liniýalardaky naprýaženiýäniň peselmesiniň azalmagyna getirýär. Eger-de elektrik geçiriji liniýalaryň sygym häsiýetleri bar bolsa, onda olaryň kuwwat koeffisiýentlerini ýokarlandyrmak üçin oýandyryjy togy nominaldan pes bolan sinhron kompensatorlar peýdalanylýar.

3.4. Sinhron hereketlendirijilerde geçiş prosesleri

Sinhron hereketlendirijilerde geçiş prosesleri özüniň çylşyrymlylygy we köpdürlüligi bilen tapawutlanýar. Bu tapawut olarda birnäçe özara magnit baglanyşykly sarymlaryň barlygy, magnit ulgamynyň simmetrik dälidigi, köp iş düzgünlerinde oýandyryş toguň sazlanýandygy bilen baglydyr.

Umumy ýagdaýda sinhron hereketlendirijidäki geçiş prosesleri elektromehaniki geçiş prosesi hasaplanýar we olar aşakdaky deňlemeler ulgamy arkaly derňelýär:

$$\begin{aligned} U_{1A} &= R_1 \cdot i_{1A} + \frac{d\psi_{1A}}{dt}; \\ U_{1B} &= R_1 \cdot i_{1B} + \frac{d\psi_{1B}}{dt}; \\ U_{1C} &= R_1 \cdot i_{1C} + \frac{d\psi_{1AC}}{dt}; \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$U_{o\dot{y}} = R_{o\dot{y}} \cdot i_{o\dot{y}} + \frac{d\psi_{o\dot{y}}}{dt}; \quad (3.27)$$

$$M = \frac{\partial W_{em} p}{\partial \theta}; \quad (3.28)$$

$$W_{em} = \sum_i^i \psi_i \cdot i_i / 2; \quad (3.29)$$

$$M + M_{as} - M_s = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.30)$$

(3.26) deňlemeler ulgamynda: $U_{1A}, U_{1B}, U_{1C}, i_{1A}, i_{1B}, i_{1C}, R_1$ – degişlilikde hereketlendirijiniň faza sarymlarynyň naprýaženiýeleri, togy we garşylygy; $\psi_{1A}, \psi_{1B}, \psi_{1C}$ – sarymlaryň magnit akymynyň ilişmesi, ol sarymlaryň induktiwligi we özara induktiwligi hem-de olardan akýan toklar bilen kesgitlenýär.

(3.26) deňlemeler ulgamy hereketlendirijiniň statorynyň zynjyryndaky elektromagnit geçiş prosesleri derňemek üçin peýdalanylýar.

(3.27) deňlemäniň kömegi arkaly sinhron hereketlendirijiniň oýandyrylyş sarymyndaky geçiş prosesi derňelýär. Eger hereketlendirijiniň rotorynda gowşadyjy sarymlar bar bolsa, onda bu sarymlaryň deňlemesi hem oňa goşulýar.

(3.28) deňleme sinhron hereketlendirijiniň elektromagnit momentiniň deňlemesi.

Sinhron hereketlendirijiniň elektromagnit momenti elektrik maşynlaryň teoriýasyna laýyklykda W_{em} elektromagnit energiýadan $\theta_g = \theta/\rho$ burç boýunça alnan hususy önümi bilen kesgitlenýär. Elektromagnit energiýa sarymlaryň magnit akymalarynyň ilişmesiniň olaryň toguna köpeltmek hasylynyň ýarym jemine deňdir we (3.29) deňleme boýunça hasaplanýar.

(3.30) deňleme sinhron hereketlendirijiniň rotorynyň mehaniki hereketiniň deňlemesidir. Bu deňlemäniň düzümine sinhron hereketlendirijiniň elektromagnit momentinden başga hereketlendirijiniň işe goýberiji sarymy bilen döredilýän M_{as} asinhron moment we M_{st} yük momenti hem girýär.

(3.26) ÷ (3.30) deňlemeler ulgamy sinhron elektrik hereketlendirijilerde ýüze çykyan geçiş prosesleriň mümkin bolan görnüşlerini: sinhron hereketlendirijiniň işe goýberilişini we onuň sinhronlaşmasy, hereketlendirijiniň okundaky ýüküň üýtgemegini we hereketlendirijiniň oýandyryş togunyň ululygynyň saklanylyşyny analiz etmeklige mümkinçilik berýär. Adatça, geçiş prosesleriň analizini ýeňilleşdirmek üçin (3.26) ÷ (3.30) deňlemeler has ýönekeý görnüşde özgerdilyär. Bu deňlemeler koeffisiýentsiz täze üýtgeýän ululyklara otnositellikde ýazylýar.

Sinhron hereketlendirijilerde analitiki usullar bilen diňe ýönekeý geçiş prosesleri derňelýär. Meselem, hereketlendirijiniň tizligi az üýtgeýär we elektromagnit geçiş prosesleri hasaba alynmaýar diýip kabul edeliň.

Seredilýän ýagdaýda geçiş prosesi mehaniki prosese degişli bolup, ol (3.30) deňleme boýunça derňelýär. Tizlik we burç az çäkke üýtgände deňlemä girýän momentler aşakdaky görnüşde ýazylýar:

$$M = M_{\max} \cdot \sin \theta \approx M_{\max} \cdot \theta; \quad (3.31)$$

$$M_{as} \approx \beta_{as} \cdot \frac{d\theta}{dt}. \quad (3.32)$$

Bu ýerde β – sinhron hereketlendirijiniň işe goýberiji sarymy bilen şertlenen mehaniki häsiýetnamanyň durnuklylygy.

Netijede, (3.28) deňleme şu görnüşi alar:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \beta \frac{d\theta}{dt} + M_{\max} \theta = M_s. \quad (3.33)$$

(3.33) deňlemä laýyklykda häsiýetlendiriji deňleme we onuň kökleri:

$$p^2\theta + \frac{p\theta}{T_{\max}} + \Omega_{erk}^2 \cdot \theta = 0; \quad (3.34)$$

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2 \cdot T_{\max}} \pm \sqrt{\frac{1}{4 \cdot T_{M,as}^2} - \Omega_{erk}^2}, \quad (3.35)$$

bu ýerde: $\Omega_{erk} = \sqrt{\frac{M_{\max}}{J}}$ – sinhron hereketlendirijiniň erkin yrgyldylarynyň ýygylgy;

$T_{M.as} = J / \beta$ – asinhron goýberiji sarym bilen kesgitlenýän sinhron hereketlendirijiniň mehaniki wagt hemişeligi.

(3.35) deňlemeden görnüşi ýaly, $(2/1) \cdot \Omega_{erk} > T_{M.as}$ bolanda häsiýetlendiriji deňlemäniň kökleri hakyky we otrisateldir hem-de geçiş prosesi aperiodiki häsiýetlidir. Bu parametrleriň ters gatnaşygynda, ýagny $(2/1) \cdot \Omega_{erk} < T_{M.as}$ bolanda (3.34) häsiýetlendiriji deňlemäniň kompleks kökleriniň barlygy sebäpli, geçiş prosesleri yrgyldyly häsiýete eýedir.

Geçiş prosesleriniň söňýän yrgyldylarynyň ýygylgy:

$$\Omega = \Omega_{erk} \cdot \sqrt{1 - (1/4) \cdot T_{M.as}^2 \cdot \Omega_{erk}^2} \quad (3.36)$$

aňlatma boýunça kesgitlenýär:

Bu yrgyldylaryň köşeşme derejesi $\alpha = 1 / T_{M.as}$ ululyk bilen kesgitlenýär. $T_{M.as}$ ululyk näçe kiçi bolsa, ýagny hereketlendirijiniň işe goýberiji häsiýetnamanyň β durnuklylygy näçe uly bolsa, yrgyldylar sonça tiz söňýär.

3.5. Sinhron maşynlar barada gysgaça taryhy maglumatlar

M.Faradeý tarapyndan elektromagnit induksiýa hadysasy açylandan bir ýyl geçensoň 1832-nji ýylda köp polýusly birlfazaly sinhron generator oýlanyp tapylypdyr.

1863-nji ýylda iňlis inženeri G. Uaýld tarapyndan sinhron maşynyň hemişelik magnitini hemişelik toguň generatoryndan iýmitlenýän elektromagnit bilen çalşyrylypdyr.

Ýabloçkow elektrik şemi oýlap tapandan soňra ony iýmitlendirmek üçin üýtgeýän toguň gerek bolmagy sinhron generatorlary kämilleşdirmek boýunça alnyp barylýan işleriň ilerlemegine itergi berdi. Şu sebäpli 1876-njy ýyldan başlap maşyngurluşyk kärhanalary tarapyndan sinhron generatorlar köpçülikleýin öndürilip başlanypdyr.

1882-nji ýylda inženeri D. Gordon tarapyndan iki fazasynyň arasynda elektrik baglanyşygy bolmadyk ikifazaly sinhron generatorlar taýýarlanylýar we ol bug bilen işleýän maşyn arkaly herekete getirilipdir. Generator 146 aýl/min tizlikde 115 kW kuwwat öndüripdir.

Sinhron generatorlaryň soňky ösüş döwri üçfazaly toklar ulgamyňy esaslandyryjy M.O. Doliwo-Dobrowolskiniň ady bilen baglanyşyklydyr. Ol generatoryň ýakorynyň sarymlaryny üç sany deň bölege bölüp „Üçburçluk” ýa-da „Ýyllyz” görnüşli birikdiripdir. Bu usul öz gezeginde elektrik energiýasyny aralyga geçirmekde we paýlamakda alty sany simiň ýerine üç sany simi ulanmaga mümkinçilik beripdir. 1890-njy ýylda M.O. Doliwo-Dobrowolskiý „Erlikon” firmasynyň baş inženeri bilen bilelikde ilkinji üçfazaly sinhron generator taýýarlapdyr we ony 1891-nji ýylda geçirilen elektrotehniki sergide görkezipdir. Bu generator gidroturbina bilen herekete getiripdir. Generatoryň tehniki ululyklary: kuwwaty 230 kW·A, aýlaw ýygylgy 150 aýl/min, ýygylgy 40 Gs, liniýa naprýaženiýasy 95 W-a deňdir.

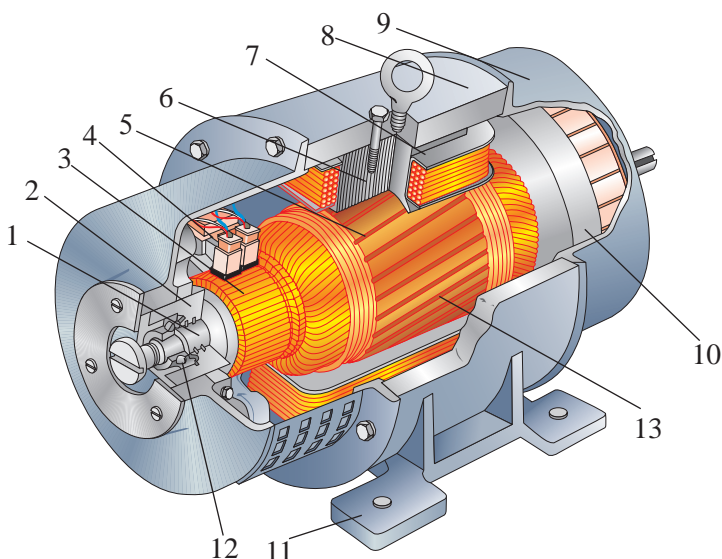
IV. HEMIŞELIK TOGUŇ MAŞYNLARY

4.1. Hemişelik toguň generatorlary

4.1.1. Hemişelik toguň generatorynyň gurluşy we işleýiş düzgüni

Hemişelik toguň maşynlaryna hemişelik toguň generatorlary we hereketlendirijileri degişlidir. Hemişelik toguň generatory mehaniki energiýany hemişelik toguň elektrik energiýasyna öwürýär. Hemişelik toguň hereketlendirijisi bolsa hemişelik toguň elektrik energiýasyny mehaniki energiýa öwürýär. Häzirki döwürde generatorlar halk hojalygynyň dürli pudaklarynda hemişelik tok bilen işleýän elektrik enjamlaryny, hereketlendirijilerini, akkumulýator batareýalaryny ýmitlendirmekde giňden ulanylýar. Hemişelik toguň generatory maşynyň esasy magnit meýdanyny döredýän hereket etmeýän oýandyryjy ulgamdan (6, 7), sarymlarynda üýtgeýän elektrik hereketlendiriji güýç indusirlenýän ýakordan (5) we ýakoryň üýtgeýän elektrik hereketlendiriji güýçlerini hemişelik naprýaženiýä öwürýän kollektor-çotga ulgamdan (3, 4) ybaratdyr (*4.1-nji surat*).

Oýandyryjy ulgam elektrotehniki polat plastinkalardan taýýarlanan silindrden we onuň iç ýüzüne berkidilen elektromagnit serdeçniklerden (6) hem-de daşy izolirlenen mis simden saralan we serdeçniklere geýdirilen oýandyryjy sarymlardan (7) ybaratdyr. Oýandyryjy sarymlary serdeçnikde gozganmaz ýaly edip saklamak hem-de onuň döredýän magnit akymynyň oýandyryjy ulgam bilen ýakoryň arasyndaky howa boşlugynda endigan ýaýramagyny üpjün etmek üçin serdeçnige berkidilen polýus uçlugyna 4.2-nji *a* suratda görkezilişi ýaly özboluşly ýaý şekilli görnüşi berilýär.



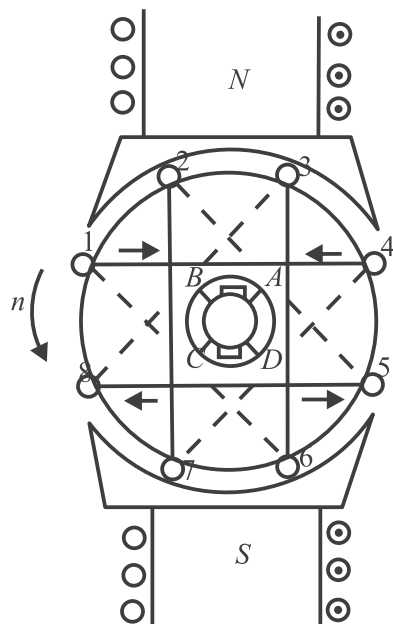
4.1-nji surat. Hemişelik toguň generatory.

1 – wal, 2 – podşipnikler, 3 – kollektor, 4 – çotga, 5 – ýakoryň serdeçnigi,
6 – serdeçnik, 7 – oýandyryjy sarym, 8 – stanina, 9 – gorag gapagy,
10 – wentilýator, 11 – aýaklar, 12 – podşipnik rastoçka, 13 – ýakoryň sarymy

Generatoryň oýandyryjy sarymlarynyň hemişelik tok bilen iýmitlendirilýändigleri sebäpli, olaryň magnit akymalarynyň ululygy wagta görä hemişelik bolýar. Ýakor polatdan taýýarlanan silindirden (5) ybarat bolup, onuň daşky üstünde ýakoryň okunyň ugryna ugurdaş oýulyp ýasalan pazlarda daşy izolirlenen mis simlerinden taýýarlanan sarymyň sargylary (13) ýerleşdirilýär.

Generatoryň kollektor-çotga ulgamy ýakoryň okunda ýygynalan we okdan hem-de biri-birinden izolirlenen plastinkalardan ybarat kollektordan (3) şeýle-de, bu plastinakalara degip duran hereket etmeýän mis bilen kömrüň garyndysyndan berk gysylýp taýýarlanylýan çotgalardan (4) ybaratdyr. Kollektor plastinakalaryň her biri ýakoryň sarymynyň sargylarynyň belli bir nokadyna birikdirilýär. Kollektor plastinkalaryň ýakoryň sarymyna birikdirilişini we kollektoryň ýerine ýetirýän wezipesine düşünmek üçin shemasy 4.2-nji suratda görkezilen ýakoryň sarymyny emele getirýän 8-sany sterženli iki polýusly generatory peýdalanylň.

Oýandyryjy sarymlaryň döredýän magnit meýdanynda ýerleşen ýakor herekete getirilen wagtynda onuň sterženleri magnit meýdanyň güýç çyzyklaryny kesip geçýär we olarda elektrik hereketlendiriji güýçleri indusirlenýär. Indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýçleriň ugurlary we ululyklary sterženler bir polýusyň aşagyndan beýleki polýusa geçen wagtynda üýtgeýär. Ýakoryň sterženleriniň 4.2-nji suratda görkezilen ýagdaýy üçin olarda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýçleriň položitel ugurlary ýörite ugur görkeziji peýkamlaryň kömegi arkaly görkezilendir. Seredilýän ýakordan mümkin boldugyça uly hemişelik naprýaženiýe almak üçin onuň maňlaý tarapyndan 1-4; 7-2; 5-8; 3-6 sterženler we onuň arka tarapyndan 4-7; 2-5; 8-3; 6-1 sterženler özara 4.2-nji suratda görkezilişi ýaly birikdirilýär.

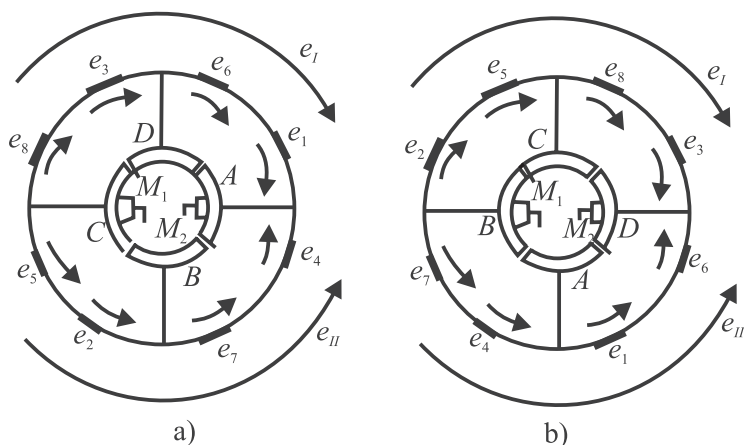


4.2-nji surat. Iki polýusly generatorýň elektromagnit shemasy

Şeýle-de ýakoryň maňlaý tarapyndan 1-4; 3-6; 5-8 we 7-2 sterženler özara birikdirýän eginleriň her birini degişlilikde kollektoryň A, B, C we D plastinkalaryna birikdirilýär. Sterženleriň özara we olaryň arasyny birikdirýän eginleriň kollektor plastinkalaryna şeýle birikdirilende ýakoryň hereketiniň islendik ýagdaýynda generatorýň çykyşynda ululygy boýunça üýtgemeýän hemişelik naprýženiýe alynýar we ýakoryň sarymynda iki sany parallel şahadan ybarat bolan ýapyk zynjyr emele gelýär. Onuň şeýledigi ýakoryň 4.3-nji a we b suratlarda görkezilen ýazgyn shemasynda has hem aýdyň görünýär.

Shemadan görnüşi ýaly (4.3-nji a surat) ýakoryň zynjyrynyň birinji şahasyna özara zyzgider birikdirilen 1, 6, 3 we 8 sterženler degişlidir we bu şahadan alynýan jemleýji elektrik hereketlendiriji güýji

$e_I = e_1 + e_6 + e_3 + e_8$ görnüşde kesgitlenýär. Ýakoryň zynjyrynyň ikinji şahasyny 4, 7, 2 we 5-nji sterženler emele getirýär we bu şahanyň jemleýji elektrik hereketlendiriji güýji $e_{II} = e_4 + e_7 + e_2 + e_5$ deňdir.



4.3-nji surat. 8-sany sterženli ýakoryň ýazgyn shemasy

Parallel şahalaryň e_I we e_{II} elektrik hereketlendiriji güýçleriniň ululyklary boýunça özara deňdigi we ugurlary boýunça biri-biriniň garşysyna ugrukdyrylandyklary sebäpli generator ýüksüz işleýän wagtynda ýakoryň togy nula deňdir. Şeýle-de generatoryň naprýaženiýesi (seredilýän ýagdaýda A we C plastikalardan M_1 we M_2 çotgalaryň kömegi arkaly alynýar) parallel şahalaryň $e_I = e_{II} = E$ jemleýji elektrik hereketlendiriji güýjüne deňdir. Ýakor, 90° -a öwrülen wagtynda (4.3-nji b surat) ýene-de iki sany özara parallel şaha emele gelýär. Bu ýagdaýda generatoryň naprýeženiýesi ululygy we ugry boýunça öňküligine galýar. Generatore ýük birikdirilen wagtynda ýakoryň şahalarynyň üstünden tok geçip başlaýar.

4.1.2. Generatoryň elektrik hereketlendiriji güýji

Uly kuwwatly hemişelik toguň maşynlarynyň magnit ulgamy polýuslaryň polýarlygy özara gezekleşýän we ýakoryň emele getirýän töweregine görä özara deň aralykda ýerleşdirilen birnäçe polýus jübütlerinden ybaratdyr. Şeýle-de, ýakoryň sarymlary hem öz geze-

ginde birnäçe özara parallel şahalardan ybaratdyr. Adatça, bu şahalaryň hem-de magnit ulgamynyň polýus jübütleriniň sanlary generator ýa-da hereketlendiriji proyektirlenen wagtynda kesgitlenýär. Eger-de generatoryň bir polýusynyň döredýän magnit akymyny Φ , polýus jübütleriniň sanyny p , ýakoryň diametrini d we onuň uzynlygyny l harplar bilen belläp ýakoryň magnit induksiýasynyň ortaça ululygyny aşakdaky görnüşde kesgitläp bileris:

$$B_{ort} = \frac{\Phi \cdot 2p}{\pi \cdot d \cdot l}. \quad (4.1)$$

Ýakor bir minudyň dowamynda n aýlawy ýerine ýetirýän wagtynda onuň diňe bir sterženinde indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjüň ortaça ululygy

$$E_{ort} = B_{ort} \cdot l \cdot g = \frac{\Phi \cdot 2p}{\pi d l} \cdot l \cdot \frac{\pi d n}{60} = 2p \frac{\Phi n}{60} \quad (4.2)$$

görnüşde kesgitlenýär. Ýakoryň ähli sterženleriniň sanyny N harpy bilen, onuň parallel şahalarynyň sanyny $2a$ bilen belläp we ýakoryň bir parallel şahasyndaky elektrik hereketlendiriji güýjüň generatoryň jemleýji elektrik hereketlendiriji güýjüne deňligini hasaba alyp, ony aşakdaky görnüşde kesgitläp bileris:

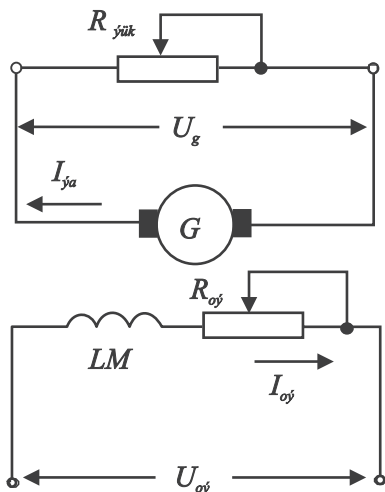
$$E = E_{ort} \frac{N}{2a} = \frac{2p\Phi n}{60} \cdot \frac{N}{2a} = \frac{p \cdot N}{a \cdot 60} \Phi n = A \Phi \cdot n. \quad (4.3)$$

P , N we a ululyklaryň generatoryň ekspluatasiýasy wagtynda üýtgemeyänligi üçin $c = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60}$ görnüşde belgilenilýär.

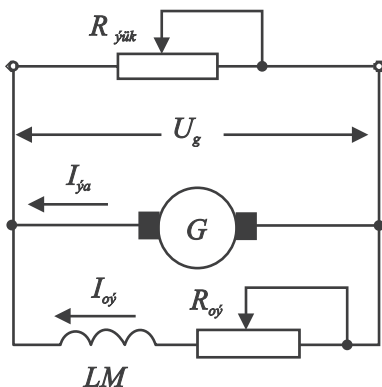
4.1.3. Hemişelik toguň generatorynyň oýandyrylyş usullary

Hemişelik toguň generatorlary olaryň oýandyryjy sarymlarynyň iýmitlendirilişine görä baglanyşyksyz we baglanyşykly oýandyrylýan generatorlara bölünýärler.

Baglanyşyksyz oýandyrylýan hemişelik toguň generatorynyň elektrik shemasy 4.4-nji suratda görkezilendir.



4.4-nji surat. Baglanyşyksyz
oýandyrylýan hemişelik
toguň generatorynyň elektrik
shemasy



4.5-nji surat.
Parallel oýandyrylýan hemişelik
toguň generatorynyň
elektrik shemasy

Shemadan görnüşi ýaly, baglanyşyksyz oýandyrylýan generatoryň oýandyryjy sarymy, onuň ýakoryna elektrik baglanyşygy bolmadyk hemişelik toguň çeşmesinden iýmitlenýär. Bu usulda oýandyryjy sarymynyň togunyň ululygy generatoryň iş düzgünine hiç-hili bagly däl. Şeýle-de bu usulda generatore kabulediji birikdirilmedik ýagdaýynda ýakoryň togunyň nula deňligi sebäpli, onuň naprýaženiýesi ýakorda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýje deňdir: $U = E - R_{ýa} \cdot I_{ýa} = E$, bu ýerde $R_{ýa}$ – ýakoryň garşylygydyr.

Ýakorda indusirlenýän E elektrik hereketlendiriji güýjüň ululygyny erkin üýtgetmek üçin oýandyryjy saryma yzygider birikdirilen $R_{oý}$ rezistoryň garşylygy üýtgedilýär.

Baglanyşykly oýandyrylýan generatorlara parallel, yzygider we garyşyk oýandyrylýan generatorlar degişlidir. Parallel oýandyrylýan generatoryň elektrik shemasy 4.5-nji suratda görkezilendir. Parallel oýandyrylýan generatorlarda oýandyryjy sarym generatoryň özünden iýmitlenýär. Maşynyň öz-özünden oýandyrylmagy şeýle tertipde bolup geçýär: ýakor herekete getirilende maşynyň magnit ulgamyndaky magnit akymynyň galyndysynyň hasabyna onuň sarymlarynda E_0

elektrik hereketlendiriji güýç indusirlenýär. E elektrik hereketlendiriji güýjüň ululygy generatoryň nominal naprýaženiýesiniň $1 \div 3$ %-ini düzýär. Oýandyryjy sarymyň ýakoryň zynjyryna görä parallel birikdirilendigi sebäpli, E_0 elektrik hereketlendiriji güýç oýandyryjy sarymda uly bolmadyk togy döredýär. Bu tok oýandyryjy sarymdan geçip generatoryň polýuslarynda goşmaça magnit akymalarynyň döremegine we onuň netijesinde ýakorda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjüň ýokarlanmagyna getirýär. Bu bolsa öz gezeginde oýandyryjy sarymyň toguny ýokarlandyrýar. Generatoryň boş iş düzgüninde ($I = 0$) oýandyryjy sarymdaky toguň ösüşi differensial deňleme boýunça aňladylýar:

$$E = I_{oý} \cdot \sum R_{oý} + \frac{d(L_{oý} \cdot I_{oý})}{dt}, \quad (4.4)$$

bu ýerde $L_{oý}$ – oýandyryjy sarymyň induktiwligi, $\sum R_{oý}$ oýandyryjy sarymyň zynjyrynyň garşylygy bolup, onuň düzümine sazlaýjy $R_{oý}$ garşylyk hem girýär.

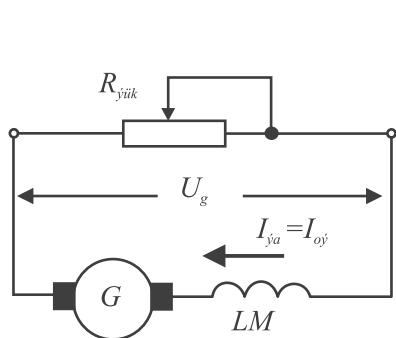
Oýandyryjy tok tarapyndan ýakorda ýüze çykýan naprýaženiýäniň peseslmesiniň örän azlygy sebäpli, oýandyryjy sarymyň naprýaženiýesi E elektrik hereketlendiriji güýje deň diýip kabul edilýär. Baglanyşykly oýandyrmak prosesi oýandyryjy sarymdaky toguň kadalaşan ýagdaýa ýetende tamamlandy diýip hasaplanylýar. Bu ýagdaýda $\frac{d(L_{oý} \cdot I_{oý})}{dt} = 0$ we $E = I_{oý} \cdot \sum R_{oý}$.

Yzygider oýandyrylýan hemişelik toguň generatorynyň elektrik shemasy 4.6-njy a suratda görkezilendir.

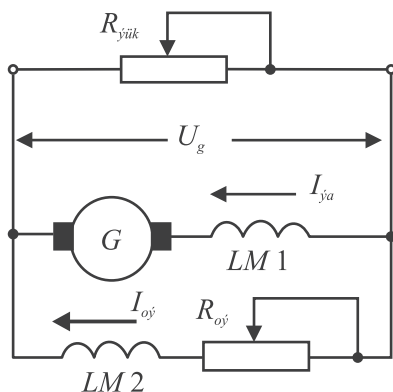
Yzygider oýandyrylýan generatorlarda oýandyryjy sarym bilen ýakoryň özara yzygider birikdirilendigi sebäpli, olaryň toklary biribirine deňdir ($I_{ya} = I_{oý}$). Şol sebäpli generatoryň boş iş düzgüninde ($I_{ya} = I_{oý} = I = 0$) ýakorda indussirlenen E_0 elektrik hereketlendiriji güýç galyndy magnit akymynyň hasabyna döreýär.

Garyşyk oýandyrylýan hemişelik toguň generatorynyň elektrik shemasy 4.7-nji suratda görkezilendir. Generatoryň parallel oýandyrylýan sarymy ýakoryň zynjyryna görä parallel edilip, yzygider oýandyrylýan sarymyň önünden ýa-da yzyndan birikdirilýär. Birikdiriliş

shemalaryň ikisinde hem generatoryň häsiýetnamalary birmeňzeşdir. Sebäbi yzygider sarymyň garşylygynyň örän kiçiligi sebäpli ondaky naprýaženiýe peselmesi hem örän azdyr. Şeýle-de yzygider sarym-da I_{oy} oýandyryjy toguň döredýän magnit hereketlendiriji güýji hem azdyr. Generatoryň oýandyrylyşy edil parallel oýandyrylýan generatoryňka meňzeşdir. Ýakoryň togy $I_{ya} = I + I_{oy}$. Önümçilikde, köplenç, parallel we yzygider sarymlaryň magnit akymalary özara goşulýan generatorlar ulanylýar. Bu generatorlarda magnit hereketlendiriji güýçleriň esasy bölegi parallel sarymlar tarapyndan döredilýär. Yzygider sarym, esasan, ýakoryň reaksiýasynyň esasy magnit akymyny magnitsizlendiriji güýjüni kompensirlemek we ýüküň togy ösende az mukdarda esasy magnit akymyny güýçlendirmek hem-de E elektrik hereketlendiriji güýji ýokarlandyrmak üçin peýdalanylýar.



4.6-njy surat. Yzygider oýandyrylýan hemişelik toguň generatorynyň elektrik shemasy



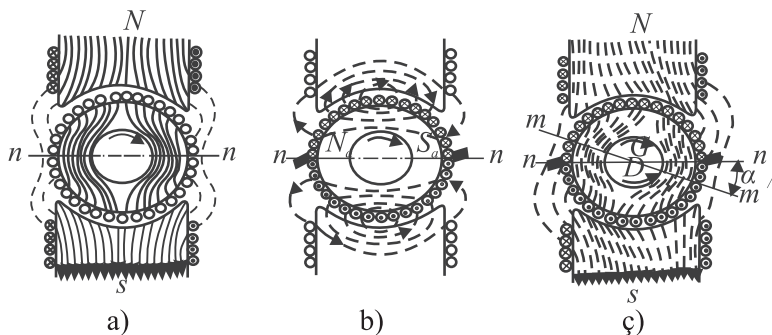
4.7-nji surat. Garyşyk oýandyrylýan hemişelik toguň generatorynyň elektrik shemasy

4.1.4. Ýakoryň reaksiýasy

4.8-nji *a* we *b* suratlarda iki polýusly generatoryň mysalynda oýandyryjy sarymyň hem-de ýakoryň her biriniň döredýän magnit akymalary aýratynlykda görkezilendir.

Magnit akymlaryň biri-birine görä özara perpendikulýar ugrukdyrylandyklary sebäpli, ýakoryň magnit akymy oýandyryjy

sarymyň döredýän magnit akymynyň güýç çyzyklarynyň gürlüginin polýuslarynyň bir tarapynda köpelmegine, onuň beýleki tarapynda bolsa azalmagyna getirýär, ýagny generatoryň esasy magnit akymy deformirlenýär (4.8-nji surat). Generatoryň magnit akymynyň deformirlenmegine ýakoryň reaksiýasy diýilýär.



4.8-nji surat. Hemişelik toguň generatorlarynda ýakoryň reaksiýasyny düşündirmek üçin elektromagnit shemalary

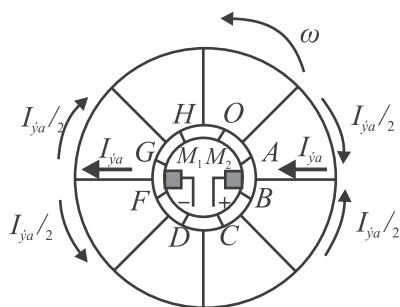
Ýakoryň reaksiýasy generator işlän wagtynda onuň çotgalarynyň aşagynda uçgunyň emele gelmegine hem-de generatoryň naprýaženiýesiniň peselmegine getirýär. Şol sebäpli ony ýok etmek üçin generatorlar ýörite kompensasion sarymlar bilen üpjün edilýär. Kompensasion sarymlar generatoryň polýuslarynyň uçlarynda ýerleşýär we olar ýakoryň sarymyna görä mydama yzygider birikdirilýär. Kompensasion sarymlaryň döredýän magnit akymy öz ululygy boýunça ýakoryň döredýän magnit akymyna deň saýlanyp alynýar hem-de onuň garşysyna ugrukdyrylýar. Şeýle usul arkaly ýakoryň reaksiýasynyň netijesinde döreýän uçgunyň we naprýaženiýe peselmesiniň öňi alynýar.

4.1.5. Toguň kommutasiýasy

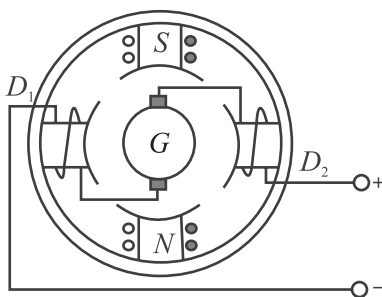
Kähalatlarda hemişelik toguň maşynlarynda ýakoryň reaksiýasy ýok edilen wagtynda hem onuň çotgaly bilen kollektor plastinkalarynyň arasynda elektrik uçgunynyň döremegi dowam edýär we ol maşynlaryň kadaly iş düzgünini ýaramazlaşdyrýar. Elektrik uçguny,

köplenç ýagdaýlarda, kollektor plastinkasynyň üsti бүдүр-сүдүр, ýagny nätekiz bolan ýagdaýynda, çotgalar kollektor plastinkalarynyň üstüne gowşak basylan ýagdaýynda ýa-da kollektor plastinkalaryň üsti hapalanan wagtynda ýüze çykýar. Emma käbir ýagdaýlarda generator ýa-da hereketlendiriji mehaniki nukdaýnazardan düzüw bolan wagtynda hem kollektor plastinkalary bilen çotgalaryň arasynda uçgunyň emele gelmegi dowam edýär. Şeýle ýagdaýlarda uçgunyň döremegi ýakoryň zynjyrynyň käbir böleklerinde toguň öz ugruny üýtgetmegi bilen baglanyşykly *toguň kommutasiýasy* diýip atlandyrylýan fiziki hadysanyň netijesinde ýüze çykýar.

Bu hadysanyň manysyna düşünmek üçin 4.9-njy suratda görkezilen ýakoryň ýazgyn shemasyndan peýdalanalyň.



4.9-njy surat.
Ýakoryň ýazgyn shemasy



**4.10-njy surat. Goşmaça polýusly
generatoryň elektromagnit shemasy**

Ýakor käbir n aýlaw ýygylýk bilen hereket edýän wagtynda onuň zynjyrynyň birnäçe böleginde tok özüniň ululygyny we ugruny örän gysga wagtyň içinde üýtgedýär. Meselem, 4.9-njy suratda M_2 çotga kolektoryň A plastinkasyndan B plastinka geçen wagtynda B bölekdäki

toguň ululygy $+\frac{I_{ya}}{2}$ -den $-\frac{I_{ya}}{2}$ -ä çenli üýtgeýär. Toguň ululygy we ugry çalt üýtgeýän bölekde örän uly e_L elektrik hereketlendiriji güýç indusirlenýär we onuň netijesinde çotgalaryň iki tarapynda hem-de çotga bilen onuň aşagyndan gidip barýan plastinkanyň arasynda mikroskopik dugalaryň emele gelmegine getirýär. Ýakoryň aýlaw ýygylýgy näçe uly boldugyça toguň kommutasiýasynyň netijesinde emele gelýän uçgun hen şonça uly bolýar.

Toguň kommutasiýasynyň netijesinde döreýän uçguny ýok etmek üçin hemişelik toguň maşynlarynda ýörite goşmaça polýuslar ulanylýar. Goşmaça polýuslaryň sarymlary (4.10-njy surat) ýakoryň sarymyna görä yzygider birikdirilip, onuň döredýän magnit meýdanynyň kömegi arkaly ýakoryň e_L elektrik hereketlendiriji güýji indusirlenýän böleginde e_L elektrik hereketlendiriji güýjüň garşysyna ululygy boýunça oňa deň, ugry boýunça bolsa garşylykly e elektrik hereketlendiriji güýji döredilýär. Ýagny şeýle usul bilen toguň kommutasiýasynyň netijesinde emele gelýän uçgun ýok edilýär.

4.1.6. Elektromagnit moment

Ýakoryň togy bilen oýandyryjy sarymyň döredýän magnit akymynyň biri-birine täsir etmegi netijesinde döreýän we ýakoryň her bir sterženine täsir edýän F elektromagnit güýç aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

$$F = B \cdot l \cdot I. \quad (4.5)$$

Ýakoryň I_{ya} togy bilen onuň sterženleriniň üstünden geçýän I toguň arasyndaky

$$I = \frac{I_{ya}}{2a} \quad (4.6)$$

we magnit akymy bilen induksiýasynyň arasyndaky

$$B = \frac{2p\Phi}{\pi dl} \quad (4.7)$$

baglanyşyklary ulanyp, (4.5) aňlatmany aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$F = \frac{P}{\pi da} \Phi \cdot I_{ya}. \quad (4.8)$$

Onda N sanly sterženi bolan ýakora täsir edýän elektromagnit moment:

$$M = NF \frac{d}{2} = \frac{NP}{2\pi a} \Phi I_{ya} = k\Phi I_{ya}, \quad (4.9)$$

bu aňlatmada $k = \frac{NP}{2\pi a}$ generatoryň konstruktiv koeffisiýenti.

Hemişelik toguň maşyny generator hökmünde ulanylýan wagtynda onuň döredýän momenti ony herekete getirýän hereketlendirijä garşylyk momentini döredýär. Eger-de ol hereketlendiriji hökmünde ulanylýan bolsa, aýlaýjy momenti döredýär.

(4.9) aňlatmadan görnüşi ýaly, M momentiň ululygy ýakoryň toguna we oýandyryjy sarymyň döredýän magnit akymynyň ululygyna göni baglydyr.

4.1.7. Hemişelik toguň generatorynyň esasy deňlemeleri

Hemişelik toguň maşynlary generator iş düzgüninde işleýän wagtynda olaryň işini häsiýetlendirýän esasy deňlemelerine naprýaženiýeleriň, kuwwatlaryň we momentleriň deňlemeleri degişlidir. Bu deňlemeler generatorlaryň oýandyrylyş usullaryna garamazdan olaryň ählisi üçin umumydyr.

1. Naprýaženiýeleriň deňlemesi.

Generatornyň naprýaženiýesi ýakorda indusirlenýän elektrik hereketlendiriji güýçden diňe ýakoryň zynjyryndaky $(I_1 \sum r_1 + \Delta U_s)$ naprýaženiýe peselmesine deň bolan ululyga tapawutlanýar. Naprýaženiýeleriň deňlemesi umumy ýagdaý üçin aşakdaky görnüşde ýazylýar:

$$U = E - I_{ya} \cdot \sum r_{ya} - \Delta U_s. \quad (4.10)$$

Ýakoryň zynjyryndaky naprýaženiýäniň peselmesi iki sany düzüjiden: ýakor zynjyrynyň düzümine girýän sarymlardaky $I_1 \sum r_1$ we çotgalaryň kontaktlarynda ýüze çykýan ΔU_s naprýaženiýe peselmelerinden ybaratdyr. $\sum r_{ya}$ garşylygyň düzümine ýakoryň we oňa yzygider birikdirilen sarymlaryň garşylyklary girýär.

$$\sum r_{ya} = r_{ya} + r_{goş} + r_{yzg} + r_{kom}. \quad (4.11)$$

Bu aňlatmada r_{ya} , $r_{goş}$, r_{yzg} , r_{kom} degişlilikde ýakoryň, goşmaça polýuslaryň, yzygider we kompensasion sarymlaryň garşylyklarydyr. Çotgalaryň kontaktlarynyň garşylygy $r_s = \Delta U_s / I_{ya, nom}$ görnüşde kesgitlenilýär we hasaplamalarda bu garşylyk hemişelik diýlip kabul edilýär. Generatornyň ýakorynyň togy bilen ony döredýän E elektrik

hereketlendiriji güýjüň ugurlary hemişe gabat gelýär. Ýakoryň togy aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär.

$$I_{\dot{y}a} = \frac{E - U}{R_{\dot{y}a}}, \quad (4.12)$$

bu aňlatmada $R_{\dot{y}a} = \sum r_{\dot{y}a} + r_s$ – ýakoryň zynjyrynyň doly garşylygy.

2. Kuwwatlaryň deňlemesi.

Generatorda kuwwatlaryň deňlemesini almak üçin (4.10) deňligiň sag we çep taraplaryny ýakoryň $I_{\dot{y}a}$ toguna köpeltmek ýeterlikdir.

$$U \cdot I_{\dot{y}a} = E \cdot I_{\dot{y}a} - I_{\dot{y}a}^2 \cdot \sum r_{\dot{y}a} - \Delta U_s \cdot I_{\dot{y}a}. \quad (4.13)$$

Bu aňlatmada $E \cdot I_{\dot{y}a} = P_{em}$ – elektromagnit kuwwat bolup, ol mehaniki energiýanyň elektrik energiýa öwrülen bölegine deňdir. P_{em} kuwwatyň bir bölegi ýakoryň zynjyrynda ýüze çykýan $P_{el} = I_{\dot{y}a}^2 \cdot \sum r_{\dot{y}a}$ elektrik ýitgilere we çotgalaryň kontaktlarynda ýüze çykýan $P_{el.s} = \Delta U_s \cdot I_{\dot{y}a}$ elektrik ýitgilere sarp bolýar. Onuň galan bölegi $U \cdot I_{\dot{y}a}$ generatordan daşyna berilýän kuwwata deňdir. Baglanyşyksyz oýandyrylýan generatorlarda bu kuwwat daşky zynjyra berilýän kuwwata deňdir.

$$P_{2.nom} = U \cdot I_{\dot{y}a}. \quad (4.14)$$

Parallel we garyşyk oýandyrylýan generatorlarda daşky zynjyra berilýän kuwwat, elektromagnit kuwwatdan oýandyryjy sarymdaky energiýanyň ýitgisiniň aýrylmagyna deňdir.

$$P_2 = U \cdot I_{\dot{y}a} - P_{oý}. \quad (4.15)$$

Hereketlendiriji tarapyndan generatoryň ýakoryny herekete getirmek üçin berilýän P_1 mehaniki energiýanyň esasy bölegi P_{em} elektromagnit energiýa, galan bölegi bolsa mehaniki ýitgileri (podşipniklerdäki sürtülmeler, wentilýasiýanyň garşylygy), magnit ýitgileri we goşmaça ýitgileri deňagramlaşdyrmaga sarp bolýar.

$$P_1 = P_{em} + P_{meh} + P_{mag} + P_{goş}. \quad (4.16)$$

3. Momentlerin deñlemesi.

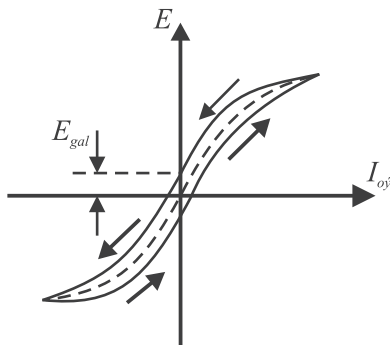
$$\frac{P_1}{\Omega} = \frac{P_{em}}{\Omega} + \frac{(P_{meh} + P_{mag} + P_{go\dot{s}})}{\Omega}$$
$$M_1 = M_{em} + M_0. \quad (4.17)$$
$$M_{em} = kI_{\dot{\gamma}a} \Phi. \quad (4.18)$$

279

Hemişelik toguň baglanyşyksyz oýandyrylýan generatorynyň häsiýetnamalary.

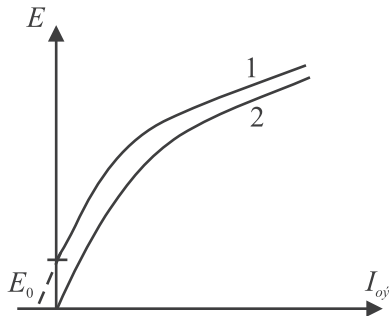
a) Boş iş häsiýetnamasy.

Baglanyşyksyz oýandyrylýan generatoryň boş iş häsiýetnamasy diýlip onuň ýakorynda indusirlenýän E elektrik hereketlendiriji güýjüň oýandyryjy ulgamyň $I_{oý}$ toguna bolan $E = f(I_{oý})$ baglanyşygyna aýdylýar. Bu baglanyşygyň egrisi 4.12-nji suratda görkezilendir.



4.12-nji surat.

Baglanyşyksyz oýandyrylýan generatoryň boş iş häsiýetnamasy



4.13-nji surat. Baglanyşyksyz oýandyrylýan generatoryň hasaplamalar üçin peýdalanylýa boş iş häsiýetnamasy

Häsiýetnamadan görnüşi ýaly, oýandyryjy toguň ululygynyň ösmegi bilen E elektrik hereketlendiriji güýç belli bir çäge çenli oňa bagly ösýär. Emma ol çäkden geçeninden soňra oýandyryjy tok bilen E elektrik hereketlendiriji güýjüň arasyndaky şeýle baglylyk saklanmaýar we bu hadysa maşynyň magnit zynjyrynyň doýgun ýagdaýa barmagy bilen düşündirilýär.

Häsiýetnamadaky $I_{oý}$ oýandyryjy toguň nuldan ýokary tarapa ösýän we ýokardan pese düşýän ýagdaýyna degişli egrileriň biri-biriniň üstüne düşmezligi, maşynyň magnit ulgamy üçin peýdalanylýan elektrotehniki polatda ýüze çykýan gisterezis hadysasy bilen düşündirilýär. Hasaplamalarda bu iki egrä aralyk bolan egri çyzyk (4.12-nji suratda aralary kesilen çyzyk) alynýar. Oýandyryjy toguň ýok wagtynda ($I_{oý} = 0$) ýakorda E_0 elektrik hereketlendiriji güýjüň emele gelmegi maşynyň magnit ulgamynda saklanyp galan magnit akymynyň galyndysynyň täsiri bilen düşündirilýär. E_0 elektrik hereketlendi-

riji güýjüň ululygy generatoryň nominal naprýaženiýesiniň $1 \div 3\%$ -ni düzýär. Önümçilik maksatlar üçin zerurlyk ýüze çykanda gisterezis halkasynyň diňe bir bölegini ölçemek bilen çäklenilýär. Adatça, $I_{oy, \max}$ maksimal oýandyryjy tokdan tä onuň $I_{oy} = 0$ ululygyna çenli aralykdaky bölegi ölçenilýär we onuň baglanyşygy gurulýar (4.13-nji surat 1-nji egri çyzyk). Soňra 1-nji egri çyzygy absissa oky bilen kesişýänçä dowam edilýär we ony saga tarap A_0 aralyga süýşürilip, hasaplamalar üçin ulanylýan 2-nji egri çyzyk alynýar.

Boş iş häsiýetnamanyň kömegi arkaly maşynyň magnit ulgamyň doýgunlyk derejesine hem baha berilýär. Şeýle-de bu häsiýetnama maşynyň beýleki häsiýetnamalaryny gurmak üçin peýdalanylýar.

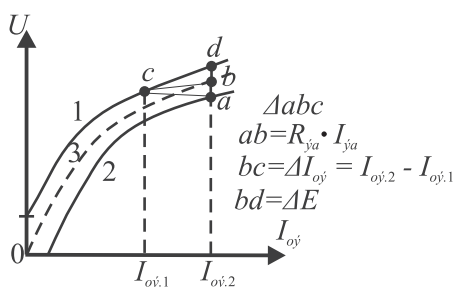
b) Ýük häsiýetnamasy.

Baglanyşyksyz oýandyrylýan generatoryň ýük häsiýetnamasy diýip generatoryň naprýaženiýesiniň oýandyryjy ulgamyň toguna bolan $U = f(I_{oy})$ baglanyşygyna aýdylýar. Bu häsiýetnama maşynyň esasy magnit akymyna ýakoryň reaksiýasynyň magnitsizlendiriji täsirini kesgitlemek üçin peýdalanylýar. Şeýle-de maşynyň magnit taýdan doýgunlyk derejesiniň hem-de ýakoryň togunyň bu täsire bolan baglanyşyklaryny barlamak üçin peýdalanylýar. $U = f(I_{oy})$ baglanyşyk ýakoryň togunyň hemişelik ululygynda alynýar. Eger-de ölçeg ýakoryň togunyň diňe birinde geçirilýän bolsa, onda onyň üçin ýakoryň nominal togy alynýar. Baglanyşyk alnanda oýandyryjy ulgamyň togy maksimal ululykda goýulýar we soňra ol nominala çenli peseldilýär.

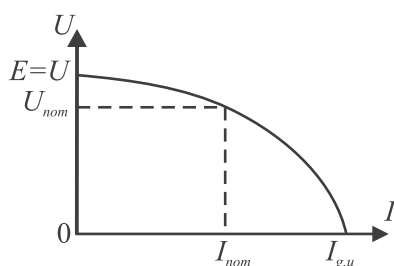
Ýük häsiýetnamany hasaplamak üçin boş iş häsiýetnamanyň aşak gaýdýan şahasyna degişli egri alynýar (4.12-nji surat). Boş iş häsiýetnama ýük häsiýetnamanyň $I_{ya} = 0$ ýagdaýyna degişli häsiýetnamasy hökmünde peýdalanylýar. Ýakoryň zynjyryndaky naprýaženiýe peselmesiniň we ýakoryň reaksiýasynyň magnitsizlendiriji täsirinde generatoryň U naprýaženiýesiniň E elektrik hereketlendiriji güýçden kiçiligi sebäpli koordinatalar ulgamynda ýük häsiýetnama (2-nji egri çyzyk) boş iş häsiýetnamadan (1-nji egri çyzyk) aşakda ýerleşýär (4.14-nji surat).

Ýakoryň reaksiýasynyň generatoryň esasy magnit akymyna we E elektrik hereketlendiriji güýjüň ululygyna edýän täsiri aşakda-

ky görnüşde kesgitlenilýär. Ýük häsiýetnamanyň naprýaženiýesiniň üstüne $R_{\text{ya}} \cdot I_{\text{ya}}$ ýakordaky naprýaženiýe peselmesini goşup E elektrik hereketlendiriji güýjüň oýandyryjy toga bolan baglanyşygyny alarys (4.14-nji surat 3-egri çyzyk). $E = f(I_{\text{oy}})$ baglanyşygy boş iş häsiýetnamadan, adatyça, aşakda ýerleşýär. Generatoryň boş we ýükli iş düzgünlerine degişli E elektrik hereketlendiriji güýjüň şol bir ululygyny almak üçin gerek bolan oýandyryjy toklary deňşililikde $I_{\text{oy},1}$ we $I_{\text{oy},2}$ deňdir. Bu toklaryň tapawudy (4.14-nji surat cb kesim) ýakoryň reaksiýasynyň täsirinde maşynyň esasy magnit akymynyň magnitsizlendirilýän bölegini kompensirleýän toga deňdir.



4.14-nji surat. Baglanyşyksyz oýandyrylan generatoryň esasy magnit akymyna ýakoryň reaksiýasynyň we magnit ulgamynyň doýgunlaşma täsiriniň kesgitlenilişi



4.15-nji surat. Baglanyşyksyz oýandyrylan hemişelik toguň generatorynyň daşky häsiýetnamasy

4.14-nji suratdaky bd kesimi ýakoryň reaksiýasynyň täsirinde E elektrik hereketlendiriji güýjüň peselmegine gabat gelýär. Umuman $I_{\text{oy},1}$ we $I_{\text{oy},2}$ toklaryň tapawudy ýakoryň reaksiýasynyň magnitsizlendiriji güýjüne baglydyr. 4.14-nji suratda ýerleşdirilen a , b , c nokatlary özara birleşdirýän „Üçburçluga“ häsiýetlendiriji üçburçluk diýilýär. Bu üçburçlugyň „ bc “ bölegi ýakoryň reaksiýasynyň magnitsizlendiriji täsirini, „ ab “ bölek bolsa R_{ya} we I_{ya} ýakordaky naprýaženiýe peselmesini berýär. Eger-de ýakoryň togunyň dürli ululyklary üçin häsiýetlendiriji üçburçluga gurup, maşynyň magnit taýdan doýgunlylygynyň ýakoryň reaksiýasyna täsirini öwrenip bileris. Maşynyň magnit taýdan doýgunlygynyň peselmesi ýakoryň reaksiýasynyň magnitsizlendiriji häsiýetini peseldýär.

ç) *Daşky häsiýetnamasy.*

Generatoryň daşky häsiýetnamasy diýlip onuň naprýaženiýesiniň ýüküň toguna bolan $U = f(I)$ baglanyşygyna aýdylýar. Bu baglanyşyk oýandyryjy toguň we aýlaw ýygylgynyň hemişelik ululyklarynda ($I_{oý} = \text{const}; n = \text{const}$) alynýar. Adatça, oýandyryjy toguň hemişelik ululygy hökmünde generatoryň nominal naprýaženiýesine we toguna degişli nominal oýandyryjy togy alynýar. Baglanyşyksyz oýandyrylýan generatoryň daşky häsiýetnamasy 4.15-nji suratda görkezilendir.

Daşky häsiýetnama generatoryň esasy häsiýetnamasy bolup, ol häsiýetnama oýandyryjy toguň we generatoryň aýlaw ýygylgynyň hemişelik ululyklarynda ýüküň toguna görä generatoryň naprýaženiýesiniň üýtgeýşini görkezýär. Häsiýetnamany eksperimental derňemek üçin generator nominal iş düzgünine getirilýär ($U = U_{nom}; I = I_{nom}$). Soňra ýüküň togy kem-kemden nula çenli peseldilýär we toklaryň bu ululyklaryna degişli naprýaženiýeler boýunça daşky häsiýetnama gurulýar. Barlag wagtynda generatoryň oýandyryjy togy hemişelik saklanylýar. Ýüküň togunyň peselmegi bilen generatoryň naprýaženiýesiniň ululygy ýakordaky naprýaženiýe peselmesiniň we ýakoryň reaksiýasynyň täsiriniň azalmagy netijesinde ösýär.

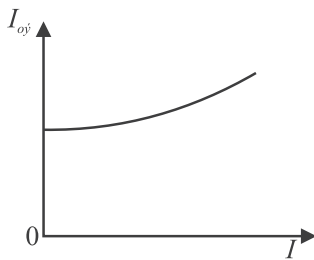
Daşky häsiýetnama boýunça naprýaženiýäniň nominaldan üýtgemesi kesgitlenilýär. Adatça ol %-lerde (göterimlerde) aňladylýar.

$$\Delta U \% = \frac{U_0 - U_{nom}}{U_{nom}} \cdot 100 \%.$$

Baglanyşyksyz oýandyrylýan generatorlar üçin $\Delta U \% = 10 \div 15 \%$ bolýar. Generatoryň gysga utgaşma togy $I_{g.u} = (5 \div 10) I_{nom}$ bolýar.

d) *Sazlaýjy häsiýetnamasy.*

Baglanyşyksyz oýandyrylýan generatoryň daşky häsiýetnamasyndan görnüşü ýaly, oýandyryjy toguň hemişelik ululygynda ýüküň togunyň ösmegi bilen generatoryň naprýaženiýesi peselýär. Naprýaženiýäniň ululygyny hemişelik saklamaklyk oýandyryjy toguň ululygyny üýtgetmek arkaly amala aşyrylýar. Naprýaženiýäniň hemişelik ululygynda



4.16-njy surat. Baglanyşyksyz oýandyrylýan generatoryň sazlaýjy häsiýetnamasy

oýandyryjy tok bilen ýüküň togunyň arasyndaky baglanyşyga generatoryň sazlaýjy häsiýetnamasy diýilýär. Baglanyşyksyz oýandyrylýan generatoryň sazlaýjy häsiýetnamasy 4.16-njy suratda görkezilendir.

Häsiýetnamadan görnüşi ýaly, ýüküň togunyň ösmegi bilen oýandyryjy tok hem ýokarlanýar. Toguň ösmegi bilen ýakordaky naprýaženiýe peselmesi we ýakoryň reaksiýasynyň täsiri hem ýokarlanýar. Bu täsiriň netijesinde ýüze çykýan naprýaženiýäniň peselmesini kompensirlemek üçin oýandyryjy tok ýokarladyrylýar.

Hemişelik toguň parallel oýandyrylýan generatorlarynyň häsiýetnamalary.

Parallel oýandyrylýan generatoryň boş iş häsiýetnamasynyň $E = I(I_{oy})$ we $I_{oy} \sum R_{oy} = f(I_{oy})$ baglanyşyklary 4.17-nji a hem-de b suratlarda görkezilendir. 4.17-nji a suratda görkezilen 1-nji egri çyzyk generatoryň boş iş häsiýetnamasynyň, 2-nji göni çyzyk oýandyryjy zynjyryň häsiýetnamasydyr. Eger-de $\sum R_{oy} = \text{const}$ diýip kabul etsek, onda oýandyryjy zynjyryň häsiýetnamasy absissa okuna α burç bilen

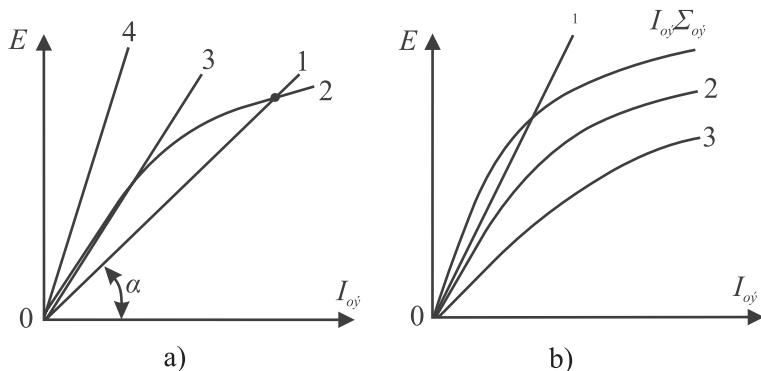
ugrukdyrylan göni çyzygy emele getirýär: $\text{tg} \alpha = \frac{I_{oy} \sum R_{oy}}{I_{oy}} = \sum R_{oy}$. Hä-

siýetnamalaryň kesişýän A nokady $E = I_{oy} \cdot \sum R_{oy}$ deňlige gabat gelýär. Bu nokatdaky E elektrik hereketlendiriji güýç $\sum R_{oy}$ garşylykda generatoryň çykyşyndaky elektrik hereketlendiriji güýje deňdir. $\sum R_{oy}$ garşylygyň üýtgemegi bilen E elektrik hereketlendiriji güýji hem üýtgeýär.

Eger-de $\sum R_{oy}$ ýokarlansa, onda α burç hem ýokarlanýar we A nokat çep tarapa süýşýär. $\sum R_{oy}$ garşylygyň belli bir ululygyna $I_{oy} \sum R_{oy} = f(I_{oy})$ baglanyşygyň göni çyzygy boş iş häsiýetnamanyň göni çyzykly böleginiň üstüne düşýär (3-göni çyzyk). $\sum R_{oy}$ garşylygyň bu ululygyna kritiki garşylyk diýip at berilýär.

Kritiki garşylyk oýandyryjy zynjyryň maşyny öz-özünden oýandyryp bilýän maksimal garşylygydyr. $\sum R_{oy}$ garşylygyň ululygynyň maksimaldan ýokarlanmagy maşynyň öz-özünden oýandyrylmagyna mümkinçilik döretmeýär. Sebäbi $I_{oy} \sum R_{oy} = f(I_{oy})$ baglanyşygyň göni çyzygy boş iş häsiýetnama bilen kesişmeýär (4 göni çyzyk). Eger-de generator dürli aýlaw ýygylklarda herekete getirilýän bolsa, onda ýygylklaryň her biri üçin generatoryň aýratyn $E = I(I_{oy})$ boş iş hä-

siýetnamasy bardyr. Sebäbi E elektrik hereketlendiriji güýjüň ululygy n aýlaw ýygylgyna baglydyr (4.17-nji b suratda 1, 2, 3-nji egri çyzyklar). Şol mynasybetli n aýlaw ýygylyklaryň her birine R_{kr} kritiki garşylygyň diňe bir ululygy degişlidir. R_{kr} kritiki garşylygyň her bir ululygyna bolsa aýlaw ýygylgyň diňe bir kritiki ululygy degişlidir. Bu ululyklardan aşakda generatoryň öz-özünden oýandyrylyşy ýüze çykmaýar (4.17-nji b suratda 2-nji egri çyzyk).



4.17-nji surat. Parallel oýandyrylýan generatoryň boş iş häsiýetnamalary

Generatoryň öz-özünden oýandyrylmagy üçin oýandyryjy sarymyň döredýän magnit akymynyň ugry ulgamda saklanyp galan magnit akymynyň ugry bilen gabat gelmelidir. Eger-de olaryň ugurlary gabat gelmese, onda öz-özünden oýandyrylyş ýüze çykmaýar. Magnit akymalarynyň goşulmagyny ýakora birikdirilýän oýandyryjy sarymyň uçlarynyň ýerlerini özara çalşyrmak arkaly ýerine ýetirilýär. Generatoryň öz-özünden işe goýberilmegi üçin magnit ulgamynda magnit akymynyň bolmagy we oýandyryjy zynjyryň garşylygynyň kritiki garşylykdan kiçi bolmagy hökmandyr.

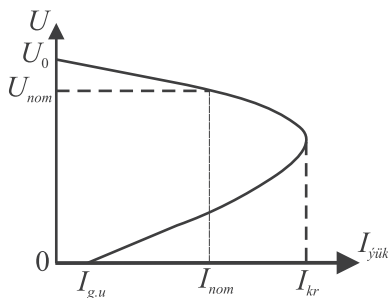
a) Boş iş we ýük häsiýetnamalary.

Baglanyşyksyz oýandyrylýan generatorlardan tapawutlylykda, parallel oýandyrylýan generatorlarda ýakoryň I_{ya} togy ýüküň $I_{yük}$ toguna deň däl ($I_{ya} \neq I_{yük}$). Generatore ýük birikdirilmedik ($I_{yük} = 0$) ýagdaýynda ýakoryň togy oýandyryjynyň toguna deňdir ($I_{ya} = I_{oy}$). Parallel oýandyrylýan generatoryň boş iş we ýük häsiýetnamalarynyň alnyşy edil baglanyşyksyz oýandyrylýan generatoryň häsiýetnamala-

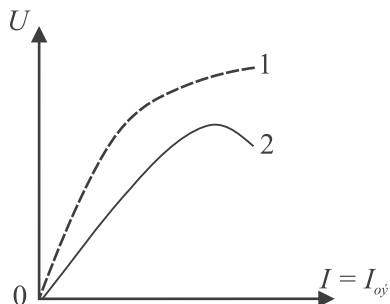
rynyň alnysy ýaly bolup, olaryň birmeňzeş häsiýetnamalary bardyr. Bu häsiýetnamalar alnanda oýandyryjy toguň ululygy $R_{oý}$ oýandyryjy rezistoryň kömegi arkaly maksimaldan mümkin bolan minimal ululyga çenli peseldilýär. Galyndy magnit akymynyň döredýän E_0 elektrik hereketlendiriji güýji oýandyryjy toguň nul ($I_{oý} = 0$) ululygynda alynýar. Oýandyryjy toguň ýakoryň togy bilen deňeşdirilende örän kiçidigi sebäpli, onuň ýakorda döredýän naprýaženiýe peselmesi hem örän azdyr. Ol bolsa öz gezeginde generatoryň naprýaženiýesine täsir etmeýär diýen ýalydyr. Şol sebäpli boş iş düzgüninde generatoryň naprýaženiýesi ýakoryň elektrik hereketlendiriji güýjüne deň diýip kabul edilýär.

b) Daşky häsiýetnamasy.

Generatoryň $U = f(I_{ýük})$ daşky häsiýetnamasy oýandyryjy zynjyryň garşylygynyň hemişelik ($\sum R_{oý} = \text{const}$) ululygynda alynýar. $R_{oý}$ oýandyryjy rezistoryň garşylygyny sazlamak arkaly $\sum R_{oý}$ garşylygyny ululygyny I_{nom} nominal tokda U_{nom} nominal naprýaženiýe bolar ýaly edip goýulýar. Ýüküň $I_{ýük}$ togy bolsa $R_{ýük}$ rezistoryň kömegi arkaly üýtgedilýär. Soňra $I_{ýük}$ toguň ululygyny üýtgedip, daşky häsiýetnamanyň beýleki nokatlary alynýar. Parallel oýandyrylýan generatoryň daşky häsiýetnamasy 4.18-nji suratda görkezilendir.



4.18-nji surat. Parallel oýandyrylýan generatoryň daşky häsiýetnamasy



4.19-njy surat. Zyzgider oýandyrylýan generatoryň daşky häsiýetnamasy

Häsiýetnamadan görnüşi ýaly, ýüküň $I_{ýük}$ togunyň ösmegi bilen U naprýaženiýe baglanyşyksyz oýandyrylýan generatoryň naprýaženiýesiniň peselmesi bilen deňeşdirilende has çalt peselýär. Bu ýagdaý

parallel oýandyrylýan generatorda naprýaženiýäniň peselmesi diňe ýakoryň reaksiýasynyň we ýakordaky naprýaženiýäniň peselmesiniň hasabyna däl-de, oýandyryjy toguň ululygynyň hem peselýändiginiň netijesinde bolup geçýär. Oýandyryjy toguň ululygynyň peselmesi oýandyryjy zynjyryň garşylygynyň hemişelik ($\sum R_{oý} = \text{const}$) ululygynda naprýaženiýäniň üsti arkaly $\Delta I_{oý} = (U_0 - U) / \sum R_{oý}$ görnüşde hasaplanylýar. Parallel oýandyrylýan generatorlarda ýüküň $I_{ýük}$ toguň ululygy I_{kr} kritiki tok diýip atlandyrylýan toga çenli ösýär. Bu kritiki tok nominal tok bilen deňeşdirilende $I_{kr} = (1,5 \div 2,5) I_{nom}$ esse uludyr. Ýüküň garşylygynyň azalmagy $I_{ýük}$ toguň peselmegine getirýär. Daşky häsiýetnamanyň şeýle özüni alyp barmagy oýandyryjy toguň ululygynyň peselmegi bilen esasy magnit akymynyň peselýändigini bilen düşündirilýär.

Ekspluatasiýa döwründe maşynyň magnit ulgamynyň doýgun ýagdaýda bolmagy oýandyryjy toguň ululygynyň üýtgemeginiň magnit akymynyň ululygyna az täsir edýänligi üçin bu proses haýal ýüze çykýar. Haçan-da magnit ulgamy doýgun däl ýagdaýa geçende oýandyryjy toguň ululygynyň peselmegi esasy magnit akymynyň çalt peselmegine, ol hem öz gezeginde naprýaženiýäniň we oýandyryjy toguň azalmagyna getirýär. Generator gysga birleşdirilende maşyn doly magnitsizlenýär we oýandyryjy toguň ululygy galyndy magnit akymynyň hasabyna (E_0 elektrik hereketlendiriji güýjüň hasabyna) emele gelýär. Şol sebäpli $I_{g.u}$ gysga utgaşmanyň togunyň ululygy generatoryň I_{nom} nominal togundan uly bolmaýar. Emma duýdansyz gysga utgaşma ýüze çykýan wagtynda geçiş prosesinde magnit akymynyň we elektrik hereketlendiriji güýjüň haýal peselýändigini sebäpli, tok nominal tokdan 10-larça esse uly bolup bilýär. Bu bolsa kollektor plastinkalar bilen çotgalaryň arasynda töwerek boýunça aýlanýan uçgunlaryň (dugalaryň) döremegine getirýär. Şonuň üçin hem ýörite goraýjy ýa-da awtomat ýazdyryjylar arkaly generatoryň togunyň uly ululyklara barmagynyň öňi alynýar. Parallel oýandyrylýan generatorlarda naprýaženiýäniň üýtgemesi $15 \div 20\%$ töwereginde bolýar.

ç) *Sazlaýjy häsiýetnamasy.*

Parallel oýandyrylýan generatorlaryň $I_{oý} = f(I_{yük})$ sazlaýjy häsiýetnamasy naprýaženiýäniň hemişelik ululygynda ($U = \text{const}$) alynýar we ol baglanyşyksyz oýandyrylýan generatorlaryň sazlaýjy häsiýetnamasyna meňzeşdir. Ýagny şol bir generatorda parallel ýa-da baglanyşyksyz oýandyrylyp alnan sazlaýjy häsiýetnamalar biri-biri bilen gabat gelýärler.

Hemişelik toguň yzygider oýandyrylýan generatorlarynyň häsiýetnamalary.

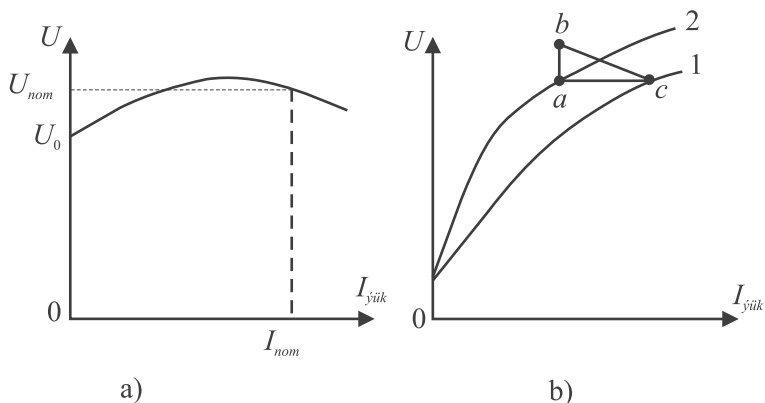
Yzygider oýandyrylýan generatoryň boş iş we yük häsiýetnamalary onuň sarymlaryny aýratyn çeşmelerden iýmitlendirmeklik arkaly alynýar. Bu häsiýetnamalar baglanyşyksyz oýandyrylýan generatoryň häsiýetnamalaryndan hiç-hili tapawutlanmaýarlar. Generatoryň öz-özünden oýandyrylyşy ýüküň garşylygy kritiki garşylykdan kiçi bolan ýagdaýynda ýüze çykýar.

Yzygider oýandyrylýan generatoryň daşky häsiýetnamasy 4.19-njy suratda görkezilendir (2-nji egri çyzyk). Suratdaky 1-nji egri çyzyk generatoryň $E = f(I_{oý})$ boş iş häsiýetnamasydyr. Şol bir tokda generatoryň naprýaženiýesi E elektrik hereketlendiriji güýçden kiçidir. Bu ýagdaý ýakordaky naprýaženiýe peselmesi we ýakoryň reaksiýasy bilen düşündirilýär. Ýakoryň we oýandyryjy sarymyň toklarynyň pes ululyklarynda, ýagny heniz maşynyň magnit taýdan doýgun däl ýagdaýynda generatoryň E elektrik hereketlendiriji güýji ýakoryň toguna görä bagly ösýär.

Ýakoryň reaksiýasynyň magnitsizlendiriji täsiri we ýakordaky naprýaženiýe peselmesi I toga bagly ösýärler. Şol sebäpli generatoryň daşky häsiýetnamasyndan görnüşi ýaly naprýaženiýe I toga bagly ösýär. Uly toklarda maşynyň magnit ulgamy doýgun ýagdaýa barýandygy sebäpli, E elektrik hereketlendiriji güýç I toga görä haýal ösüp başlaýar. Has uly toklarda ýakordaky naprýaženiýäniň peselmeginiň we ýakoryň reaksiýasynyň netijesinde toguň ösmegi bilen naprýaženiýäniň ululygy peselip başlaýar. Naprýaženiýäniň ululygynyň ýüküň $I_{yük}$ toguna örän baglydygy sebäpli yzygider oýandyrylýan generatorlar önümçilikde köp ulanylmaýar.

Hemişelik toguň garyşyk oýandyrylýan generatorlarynyň häsiýetnamalary.

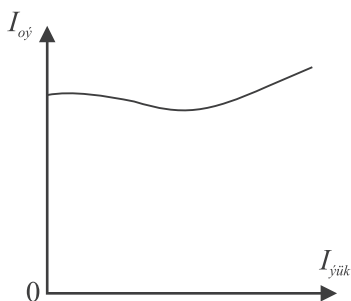
Garyşyk oýandyrylýan generatornyň daşky häsiýetnamasy 4.20-nji *a* suratda görkezilendir.



4.20-nji surat.
Garyşyk oýandyrylýan generatornyň daşky
(a) we ýük (b) häsiýetnamalary

4.20-nji *a* suratdaky häsiýetnamalardan görnüşi ýaly, ýüküň $I_{\text{ýük}}$ togunyň ösmegi bilen generatornyň naprýaženiýesi belli bir çäge çenli ösýär. Ýüküň $I_{\text{ýük}}$ toguna görä U naprýaženiýäniň ösüşi yzygider sarymyň sargy sanyna baglydyr. Yzygider sarymyň sargy sany az bolanda ýüküň togunyň ösmegi bilen naprýaženiýäniň ululygy peselýär. Yzygider sarymyň sargy sany köp, emma magnit ulgamyna doýgun ýagdaýda bolanda ýüküň togunyň ösmegi bilen naprýaženiýe peselýär.

Garyşyk oýandyrylýan generatornyň $I_{\text{oý}} = f(I_{\text{ýük}})$ sazlaýjy häsiýetnamasy $U = \text{const}$ naprýaženiýäniň hemişelik ululygynda alynýar we ol generatornyň daşky häsiýetnamasyna baglydyr (4.21-nji surat).

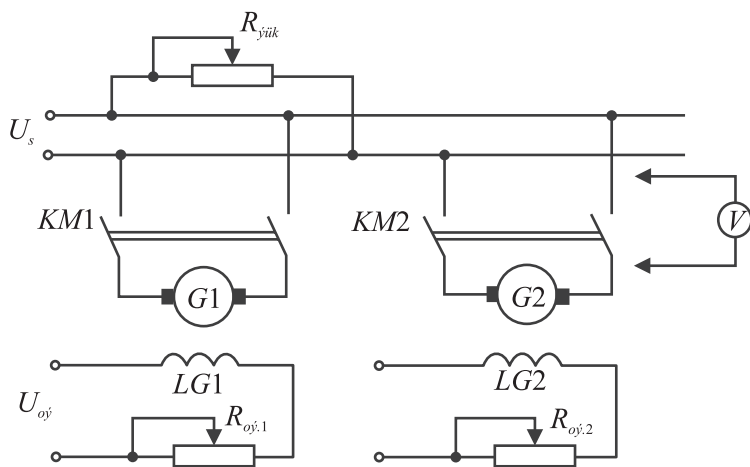


4.21-nji surat. Generatornyň
sazlaýjy häsiýetnamasy

4.1.9. Hemişelik toguň generatorlaryny özara parallel işe goýbermegiň şertleri

Elektrik energiýany kabulediji ýükleriň dürli ululyklarynda olary ýokary hilli elektrik energiýa bilen ygtybarly üpjün etmek üçin stansiýalarda birnäçe generatorlar özara parallel işledilýär. Şeýle etmek bilen ikinji tarapdan generatorlaryň nominal iş düzgünlerinde işlemeklerine şert döredilýär. Hemişelik toguň generatorlaryny özara parallel işe goýbermek üçin aşakdaky şertleri ýerine ýetirmeklik hökmandyr:

Parallel işe goýberilýän generatoryň E_2 elektrik hereketlendiriji güýjüniň ululygy öňki işläp duran generatorlaryň bilelikde emele getirýän setiniň U_s naprýaženiýesine ululygy boýunça deň bolmalydyr. Şonda işe goýberilýän generatoryň goýberiliş togy $I_2 = (E_2 - U_s) / R_{ýa.2} = 0$ bolar. Has takygy, bu ýagdaýda generator sete birikdirilende ol sete hiç-hili energiýa bermeýär we ondan hem almaýar. $E_2 = U_s$ şert, işe goýberilýän generatoryň $I_{oý.2}$ oýandyryjy toguny sazlamak arkaly ýerine ýetirilýär. $E_2 = U_s$ deňligiň ýerine ýetirilişi magnitoelektrik ulgamda işleýän woltmetrler bilen amala aşyrylýar (4.22-nji surat).



4.22-nji surat

Işe goýberilýän generatoryň U_2 naprýaženiýesiniň polýuslary setiň naprýaženiýesiniň polýuslaryna gabat gelmeli (meselem, setiň „+“

polýusy bilen işe goýberilýän generatoryň „+“ polýusyny birikdirmeli). Polýuslaryň gabat gelşi woltmetriň (V) kömegi arkaly barlanylýar.

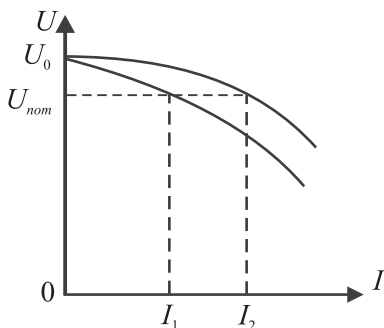
Eger set bilen generatoryň degişli polýuslarynyň arasyna birikdirilen woltmetr $U = 0$ görkezse, onda polýuslar biri-birine gabat gelýärler. Eger-de woltmetr $U = 2U$ görkezse, onda polýuslar biri-birine gabat gelmeýärler. Bu ýagdaýda polýuslary gabat getirmek üçin parallel işe goýberilýän generatoryň iki sany çykyşynyň ýerlerini özara çalşyrmalydyr. Haçan-da bu şerti ýerine ýetirilmän generatorlar parallel işe goýberilse, onda ulgamda gysga utgaşma togy ýüze çykýar:

$$I_s = I_{g,u} = \frac{E_s + E_2}{R_{ýa,s} + R_{ýa,2}}.$$

Generator sete görä parallel işe goýberilende onuň elektrik hereketlendiriji güýjüniň setiň U naprýaženiýesine deňdigi sebäpli ($E_2 = U$) onuň togy we öndürýän energiýasy nola deňdir: $I_2 = (E_2 - U)/R_{ýa} = 0$. Şol sebäpli, işe goýberilen generator bu ýagdaýda sete hiç-hili energiýa öndürmeýär we setden energiýa hem almaýar. Generatorlaryň sete berýän energiýasynyň bir bölegini işe goýberilen generatoryň öndürmegi üçin onuň oýandyryş sarymynyň togy arkaly E_2 elektrik hereketlendiriji güýjüniň ululygyny setiň U naprýaženiýesinden ýokarlandyrylýar ($E_2 > U$). Bu ýagdaýda generator sete energiýa berip başlaýar.

Seredilýän ýagdaýda setiň naprýaženiýäniň ululygyny hemişelik saklamak üçin işe goýberilýän generatoryň E_2 elektrik hereketlendiriji güýjüniň ululygyny ýokarlandyryp, öňki işläp duran E_s elektrik hereketlendiriji güýjüni bolsa peseltmelidir. Olaryň ululyklary $I_{oý}$ oýandyryjy toklaryň üsti bilen sazlanýlýar.

Kabul edilýän energiýanyň mukdary azalan wagtynda generatorlaryň birini ýa-da birnäçesini setden aýyrmak üçin ilki olaryň elektrik hereketlendiriji güýjüni setiň naprýaže-



4.23-nji surat.

Kuwwatlary deň bolmadyk parallel işe goýberilen generatorlar daşky häsiýetnamalary

niýesine deňlemeli we soňra generatorlary işden çykarmaly. Daşky häsiýetnamalary birmeňzeş bolmadyk deň kuwwatly generatorlary özara parallel işe goýberilen wagtynda olaryň sete berýän kuwwatlary we toklary deň bolmaýarlar (4.23-nji surat). Şol sebäpli parallel işe goýberilýän generatorlaryň birmeňzeş $U = f(I_{\text{ýük}})$ daşky häsiýetnamalary bolmalydyr.

4.2. Hemişeleik toguň hereketlendirijileri

Üýtgeýän toguň hereketlendirijileri bilen deňeşdirilende hemişelik toguň hereketlendirijileriniň aýlaw ýygylklaryny giň çäkke erkin sazlamak mümkinçiliginiň barlygy sebäpli, olar senagatda we transportda köpçülikleýin ulanylyşa eýedirler. Hemişelik toguň hereketlendirijileri hem edil hemişelik toguň generatorlary ýaly oýandyrylyş usuly boýunça baglanyşyksyz, parallel, yzygider we garyşyk görnüşlere bölünýärler. Önümçilikde oýandyrylyş usullaryna seretmezden hemişelik toguň hereketlendirijileriniň ähli görnüşleri hem ulanylýar. Baglanyşyksyz we yzygider oýandyrylýan hereketlendirijilerde ýakoryň togy hereketlendirijiniň çeşmeden alýan toguna deňdir. Parallel we garyşyk oýandyrylýan hereketlendirijilerde ýakoryň togy çeşmeden alynýan tokdan oýandyryjy ulgamyň togunyň aýrylmagyna deňdir. Oýandyryjy ulgamda esasy magnit meýdanyny döretmek üçin sarp edilýän kuwwat hereketlendirijiniň nominal kuwwatynyň $1 \div 5\%$ -ne deňdir.

4.2.1. Hemişelik toguň hereketlendirijisiniň deňlemeleri

1. Naprýaženiýeleriň deňlemesi.

Hereketlendirijä goýlan naprýaženiýe ýakorda indusirlenýän E elektrik hereketlendiriji güýji we ýakoryň zynjyryndaky naprýaženiýäniň peselmesini deňagramlaşdyrýar.

$$U = E + I_{\text{ýa}} \sum r_{\text{ýa}} + \Delta U_s, \quad (4.19)$$

bu aňlatmada $I_{\text{ýa}} \sum R_{\text{ýa}}$ ýakor zynjyryndaky naprýaženiýe peselmesi, ΔU_s – çotgalar bilen kollektor plastinkalaryň arasyndaky kontaktda ýüze çykyan naprýaženiýe peselmesi, $\sum r_{\text{ýa}} = r_{\text{ýa}} + r_{\text{goş}} + r_{\text{yzg}} + r_k -$

ýakor zynjyrynyň umumy aktiw garşylygy bolup, bu ýerde $r_{\dot{y}a}$, $r_{goş}$, r_{yzg} , r_k – degişlilikde ýakoryň, goşmaça polýuslaryň, yzygider we kompensasion sarymlaryň aktiw garşylyklary. Käbir hasaplamalar üçin (4.19) aňlatma aşakdaky görnüşde hem ýazylyar.

$$U = E + R_{\dot{y}a} \cdot I_{\dot{y}a}, \quad (4.20)$$

bu ýerde

$$R_{\dot{y}a} = \Sigma r_{\dot{y}a} + \frac{\Delta U_s}{I_{nom}}.$$

Ýakoryň zynjyryndaky naprýaženiýe peselmesi ($R_{\dot{y}a} \cdot I_{\dot{y}a}$) öz ululygy boýunça hereketlendirijiniň nominal naprýaženiýesiniň $2 \div 5\%$ -ni düzýär. Hemişelik toguň maşyny hereketlendiriji hökmünde ulanylanda $U > E$ şert ýerine ýetirilýär. Şol sebäpli ýakoryň togunyň ugry hereketlendirijä goýlan naprýaženiýäniň ugry bilen gabat gelýär.

$$I_{\dot{y}a} = \frac{U - E}{R_{\dot{y}a}}. \quad (4.21)$$

2. Kuwwatlaryň deňlemesi.

(4.19) aňlatmanyň sag we çep taraplaryny $I_{\dot{y}a}$ ýakoryň toguna köpeldip kuwwatlaryň deňligi alynýar.

$$U \cdot I_{\dot{y}a} = E \cdot I_{\dot{y}a} + I_{\dot{y}a}^2 \cdot \Sigma r_{\dot{y}a} + \Delta U_s \cdot I_{\dot{y}a}, \quad (4.22)$$

bu ýerde $U \cdot I_{\dot{y}a}$ $U \cdot I_{\dot{y}a}$ – setden hereketlendirijiniň ýakoryna berilýän kuwwat bolup, onuň bir bölegi ýakoryň zynjyrynda ýüze çykýan $I_{\dot{y}a}^2 \cdot \Sigma r_{\dot{y}a} = P_{el.\dot{y}a}$ elektrik ýitgilerine we çotganyň galtaşmalaryndaky $\Delta U_s \cdot I_{\dot{y}a} = P_{el.s}$ energiýanyň ýitgilerine sarp bolýar. Hereketlendirijiniň $E \cdot I_{\dot{y}a} = P_{el.mag}$ elektromagnit kuwwatynyň bir bölegi P_{meh} mehaniki, P_{mag} magnit we $P_{goş}$ goşmaça ýitgilere sarp bolýar, galan bölegi bolsa mehaniki kuwwata özgerdilýär hem-de hereketlendirijiniň okunyň üsti bilen işçi mehanizme berilýär. Bu kuwwata *hereketlendirijiniň peýdaly ýa-da onuň okundaky kuwwaty* diýilýär.

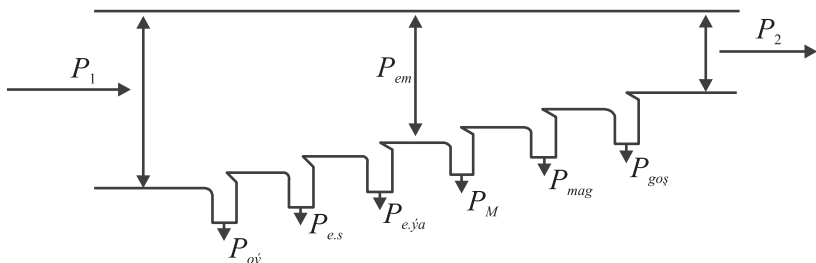
$$P_2 = P_{el.mag} - P_{meh} - P_{mag} - P_{goş}. \quad (4.23)$$

Baglanyşyksyz we yzygider oýandyrylýan hereketlendirijilerde setden alynýan doly kuwwat $P_1 = U \cdot I_{\dot{y}a}$ görnüşde kesgitlenilýär. Parallel we garyşyk oýandyrylýan hereketlendirijilerde setden alyn-

ýan doly kuwwat oýandyryjy ulgamyň sarp edýän $P_{oý} = U \cdot I_{oý}$ kuwwatynyň hasabyna baglanyşyksyz we yzygider oýandyrylýan hereketlendirijileriň kuwwatlaryndan köp bolýar.

$$P_1 = U \cdot (I_{ýa} + I_{oý}) = U \cdot I. \quad (4.24)$$

Hereketlendirijiniň kuwwatlarynyň deňlemesiniň esasynda gurlan energetiki diagramma 4.24-nji suratda görkezilendir.



4.24-nji surat. Hemişelik toguň hereketlendirijisiniň energetiki diagrammasy

3. Momentleriň deňlemesi.

Kuwwatlaryň deňlemesiniň (4.22) sag we çep taraplaryny hereketlendirijiniň ω burç tizligine bölüp, momentleriň deňlemesi alynýar.

$$M_{el.mag} = M_2 + M_0 = M_{st}, \quad (4.25)$$

bu ýerde M_{st} – statiki garşylyk momenti bolup, ol ýakoryň hereketiniň garşysyna tarap, $M_{el.mag}$ elektromagnit momenti bolsa ýakoryň hereketiniň ugruna tarap ugrukdyrylandyr.

Elektromagnit moment ýakoryň togy bilen esasy magnit akymynyň özara täsiri netijesinde ýüze çykyar we ol $M_{el.mag} = c \cdot I_{ýa} \cdot \Phi$ görnüşde ýazylýar. Bu moment hereketlendirijiniň okuna birikdirilen işçi mehanizmiň döredýän $M_2 = P_2 / \omega$ tormazlaýjy momentini we hereketlendirijiniň içinde döreýän ýitgiler bilen baglanyşykly $M_0 = (P_{meh} + P_{mag} + P_{goş}) / \omega$ momentleri deňagramlaşdyrýar. M_0 momentiň ululygynyň odnositel azlygy sebäpli, ony käbir amaly hasaplamalarda hasaba alynmaýar we $M_{el.mag} \approx M_2 \approx M_{st}$ diýip kabul edilýär. (4.25) deňlik diňe hereketlendirijiniň burç tizliginiň hemişelik ($\omega = \text{const}$) ululygy üçin dogrudyr. Burç tizligiň islendik üýtgemesi ýa-da hereketlendirijiniň we işçi mehanizmiň aýlanýan bölekleri-

niň hereketiniň batlanmagy ýa-da haýallamagy bilen baglanyşykly momentniň $M_2 = J \frac{d\omega}{dt}$ dinamiki düzüjisi ýüze çykýar. Adatça, hereketlendirijiniň aýlanýan böleginiň m massasynyň hemişelikdigini hasaba alyp inersiýa momentini $J = m \cdot \rho^2$ görnüşde ýazylýar (ρ -inersiýanyň radiusy). Momentniň dinamiki düzüjisini hasaba alyp momentleriň deňlemesini $M = M_2 + M_0 + M_j$ görnüşde ýazyp bileris.

Eger-de $M > (M_2 + M_0)$ bolsa $M_2 > 0$ we $d\omega/dt \approx \Delta\omega/dt$. Bu ýagdaýda hereketlendirijiniň we onuň okuna birikdirilen işçi mehanizmiň tizligi ýokarlanýar.

Eger-de $M < (M_2 + M_0)$ bolsa $M_2 < 0$ we $d\omega/dt < 0$. Bu ýagdaýda hereketlendirijiniň we onuň okuna birikdirilen işçi mehanizmiň tizligi haýallaýar. Hereketlendiriji tormazlaýjy iş düzgüninde işleýär.

Eger-de $M = (M_2 + M_0)$ bolsa $M_2 = 0$ we $d\omega/dt = 0$. Bu ýagdaýda hereketlendirijiniň we onuň okuna birikdirilen işçi mehanizm hemişelik tizlik bilen hereket edýär ($\omega = \text{const}$).

Hereketlendirijiniň burç tizliginiň deňlemesi.

$$U - R_{ya} \cdot I_{ya} = E = c \cdot \omega \cdot \Phi. \quad (4.26)$$

Deňlemeden görnüşi ýaly, E elektrik hereketlendiriji güýjüň ululygy hereketlendirijä goýlan naprýaženiýe we ýakordaky $R_{ya} \cdot I_{ya}$ naprýaženiýe peselmesine baglydyr. U we $R_{ya} \cdot I_{ya}$ naprýaženiýeleriň ululyklarynyň ýokarlanmagy ýa-da peselmegi E elektrik hereketlendiriji güýjüň ululygynyň üýtgemegine täsir edýär we hereketlendirijiniň burç tizligi aşakdaky görnüşde kesgitlenýär:

$$\omega = \frac{(U - R_{ya} \cdot I_{ya})}{c \cdot \Phi}. \quad (4.27)$$

4.2.2. Hemişelik toguň hereketlendirijisiniň häsiýetnamalary

Baglanyşyksyz we parallel oýandyrylýan hereketlendirijileriň häsiýetnamalary.

Hereketlendirijileriň iş häsiýetlerini görkezýän esasy häsiýetnamalaryna tizlik, moment we mehaniki häsiýetnamalar degişlidir.

a) *Tizlik häsiýetnamasy.* Hereketlendirijiniň burç tizliginiň ýakoryň toguna bolan $\omega = f(I_{\text{ýa}})$ baglanyşygyna hereketlendirijiniň *tizlik häsiýetnamasy* diýilýär.

b) *Moment häsiýetnamasy.* Hereketlendirijiniň elektromagnit momentiniň ýakoryň toguna bolan $M_{\text{em}} = f(I_{\text{ýa}})$ baglanyşygyna *moment häsiýetnamasy* diýilýär ($I_{\text{oý}} = \text{const}$).

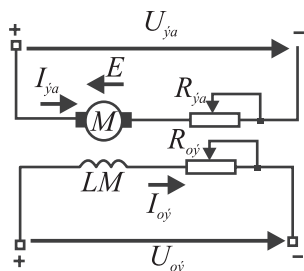
ç) *Mehaniki häsiýetnamasy.* Ýakoryň burç tizliginiň elektromagnit momente bolan $\omega = f(M_{\text{em}})$ baglanyşygyna hereketlendirijiniň *mehaniki häsiýetnamasy* diýilýär.

Hereketlendirijiniň tizlik we mehaniki häsiýetnamalary yzygider oýandyrylýan hereketlendirijilerde ýakora berilýän naprýaženiýäniň hemişelik ($U = \text{const}$) ululyklarynda, parallel, baglanyşyksyz we garyşyk oýandyrylýan hereketlendirijilerde bolsa naprýaženiýäniň hem-de oýandyryjy toguň hemişelik ($U = \text{const}; I_{\text{oý}} = \text{const}$) ululyklarynda alynýar.

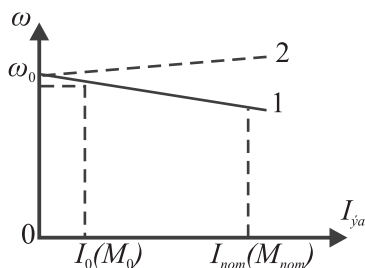
Baglanyşyksyz oýandyrylýan hemişelik toguň hereketlendirijisiniň häsiýetnamalaryny demlemek üçin elektrik shema 4.25-nji suratda görkezilendir.

1. Tizlik häsiýetnamasy.

Hereketlendirijiniň $\omega = f(I_{\text{ýa}})$ tizlik häsiýetnamasy naprýaženiýäniň we oýandyryjy toguň hemişelik ululyklarynda alynýar ($U = \text{const}; I_{\text{oý}} = \text{const}$). Häsiýetnamany almak üçin ilki bilen nominal naprýaženiýeden ($U = U_{\text{nom}}$) we ýakoryň nominal togunda ($I_{\text{ýa}} = I_{\text{ýa,nom}}$) nominal burç tizligi ($\omega = \omega_{\text{nom}}$) üpjün eder ýaly $I_{\text{oý,nom}}$ nominal oýandyryjy tok goýulýar. Soňra ýakoryň toguny kem-kemden azaldylýar. Bu toguň dürli ululyklaryna degişli aýlaw ýygylyklar arkaly hereketlendirijiniň tizlik häsiýetnamasy gurulýar (4.26-njy surat).



4.25-nji surat. Baglanyşyksyz oýandyrylýan hemişelik toguň hereketlendirijisiniň elektrik shemasy



4.26-nji surat. Baglanyşyksyz oýandyrylýan hereketlendirijiniň tizlik häsiýetnamasy

Napryáženíýäniñ hemişelik ($U = \text{const}$) ululygynda hereketlendirijiniñ ω burç tizligine, ýakordaky $R_{\dot{y}a} \cdot I_{\dot{y}a}$ napryáženíýäniñ peselmesi we ýakoryň reaksiýasynyň netijesinde magnit akymynyň $\Phi = \Phi_0 - \Delta\Phi$ azalmagy täsir edýär. Bu ýerde Φ_0 oýandyryjy tok tarapyndan döredilýän magnit akymy, $\Delta\Phi$ ýakoryň reaksiýasy tarapyndan magnit akymynyň magnitsizlendirilýän bölegi.

$$\omega = \frac{U_{nom} - R_{\dot{y}a} \cdot I_{\dot{y}a}}{c \cdot (\Phi_0 - \Delta\Phi)}. \quad (4.28)$$

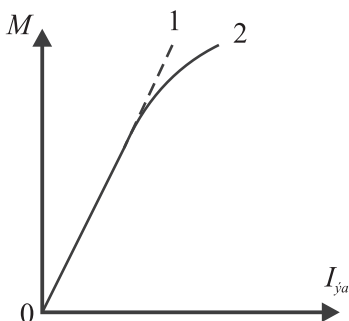
Ýakoryň $I_{\dot{y}a}$ togunyň ululygynyň ýokarlanmagy bilen ýakoryň zynjyryndaky $R_{\dot{y}a} \cdot I_{\dot{y}a}$ napryáženíýe peselmesiniň ýokarlanmagy onuň burç tizliginiň ululygynyň peselmegine getirýär. Emma $\Delta\Phi$ magnit akymynyň ýokarlanmagy bilen hereketlendirijiniñ burç tizligi ýokarlanýar (4.26-njy surat 2-nji aralary kesilen göni çyzyk).

Şeýlelikde, hereketlendirijiniñ tizlik häsiýetnamasy bu iki faktoryň haýsysynyň täsiriniň ýokarylygyna baglydyr. Eger ýakordaky napryáženíýe peselmesiniň täsiri uly bolsa burç tizligiň ululygy peselýär (4.26-njy surat 1-nji göni çyzyk). Eger-de ýakoryň reaksiýasynyň täsiri uly bolsa, onda burç tizligiň ululygy ösýär. Normal iş häsiýetnamaly hereketlendirijide ýakoryň togunyň ösmegi bilen burç tizligiň ululygy peselýär.

2. Moment häsiýetnamasy.

Elektromagnit momentiniň ýakoryň toguna bolan $\omega = f(M_{em})$ baglanyşygy hereketlendirijiniñ momenti üçin ýazylýan $M_{em} = c \cdot \Phi \cdot I_{\dot{y}a} = c \cdot (\Phi_0 - \Delta\Phi) \cdot I_{\dot{y}a}$ aňlatmadan alynýar. Eger-de oýandyryjy toguň hemişelik ($I_{oý} = \text{const}$) ululygynda Φ magnit akymy hemişelik ($\Phi = \text{const}$) galýan bolsa, onda M_{em} elektromagnit moment ýakoryň $I_{\dot{y}a}$ toguna bagly ösýär. Hereketlendirijiniñ moment häsiýetnamasy 4.27-nji suratda görkezilendir.

Eger-de ýakoryň reaksiýasynyň täsirinde magnit akymynyň ululygy peselýän bolsa, onda häsiýetnama ýakoryň uly toklarynda göni çyzykdan sowulýan egri çyzygy berýär (4.27-nji surat 2-nji egri



4.27-nji surat.
Baglanyşyksyz
oýandyrylýan
hereketlendirijiniñ moment
häsiýetnamasy

çyzyk). Emma bu tapawudyň uly däldigi sebäpli, amaly meselelerde ol hasaba alynmaýar.

3. Mehaniki häsiýetnamasy.

(4.28) aňlatmadaky ýakoryň $I_{\dot{y}a}$ toguny M momentiň üsti bilen aňladyp mehaniki häsiýetnamanyň deňlemesini alarys.

$$\omega = \frac{U_{nom} - R_{\dot{y}a} \cdot I_{\dot{y}a}}{c \cdot (\Phi_0 - \Delta\Phi)} = \frac{U_{nom}}{c \cdot (\Phi_0 - \Delta\Phi)} - R_{\dot{y}a} \cdot \frac{M}{c^2 \cdot (\Phi_0 - \Delta\Phi)^2}. \quad (4.29)$$

Baglanyşyksyz oýandyrylýan hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamasy edil tizlik häsiýetnamasyna meňzeşdir. Eger-de hereketlendirijiniň okuna ýük momenti goýulmasa ($M_2 = M_{st} = 0$), hereketlendiriji boş iş düzgüninde işläär. Bu ýagdaýda ýakoryň togy $I_{\dot{y}a} = I_0$ we burç tizligi $\omega = \omega_0$ bolýar. Hereketlendirijiniň M momenti onuň özünde sürtülme güýçleri tarapyndan döreýän M_0 tormozlaýjy momenti ýeňip geçmek üçin sarp bolýar. Hereketlendirijiniň I_0 boş iş togy nominal toguň $2 \div 5$ %-ni düzýär. Hereketlendirijiniň $I_{\dot{y}a} = 0$ we $M = 0$ ýagdaýyndaky işine *ideal boş işi* diýilýär hem-de onuň burç tizligi aşakdaky görnüşde kesgitlenilýär:

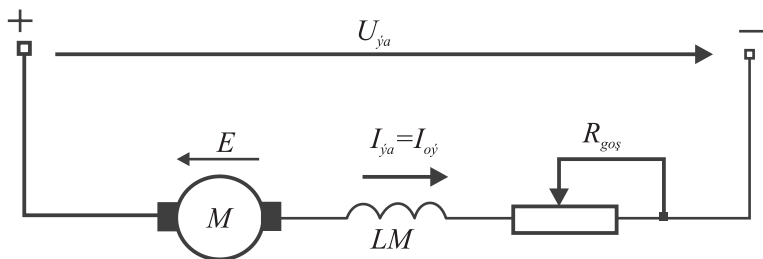
$$\omega_0 = \frac{U_{nom}}{c \cdot \Phi_0}. \quad (4.30)$$

Baglanyşyksyz oýandyrylýan hereketlendirijiler boş iş düzgüninden nominal iş düzgünine geçilende olaryň burç tizligi $2 \div 5$ % üýtgeýär. Şeýle gowşak peselýän mehaniki we tizlik häsiýetnamalaryna *gaty ýa-da durnukly häsiýetnama* diýilýär. Parallel oýandyrylýan hereketlendirijileriň mehaniki we tizlik häsiýetnamalary baglanyşyksyz oýandyrylýan hereketlendirijiniň häsiýetnamalaryna meňzeşdir.

Hemişelik toguň yzygider oýandyrylýan hereketlendirijisiniň häsiýetnamalary.

Yzygider oýandyrylýan hereketlendirijiniň elektrik shemasy 4.28-nji suratda görkezilendir.

Yzygider oýandyrylýan hereketlendirijiniň häsiýetnamalary edil parallel oýandyrylýan hereketlendirijiniň häsiýetnamalarynyň alnyşy ýaly alynýar. Seredilýän ýagdaýda ýakoryň togy bilen oýandyryjy ulgamyň toklary özara deňdirler ($I_{\dot{y}a} = I_{oş} = I$).



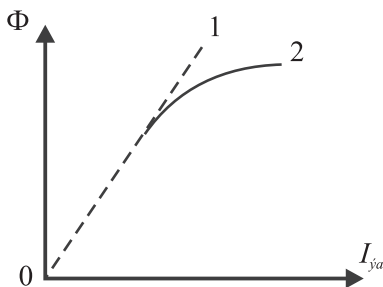
4.28-nji surat. Hemişelik toguň yzygider oýandyrylýan hereketlendirijisiniň elektrik shemasy

1. Tizlik häsiýetnamasy.

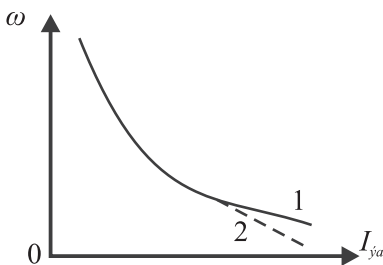
Yzygider oýandyrylýan hereketlendirijiniň $\omega = f(I_{ýa})$ tizlik häsiýetnamasy hem $U = U_{nom} = \text{const}$ şertde alynýar. Yzygider oýandyrylýan hereketlendirijiniň tizlik häsiýetnamasynyň deňlemesi baglanyşsyz oýandyrylýan hereketlendirijiniň deňlemesine meňzeşdir:

$$\omega = \frac{U - R_{ýa} \cdot I_{ýa}}{c \cdot \Phi}. \quad (4.31)$$

Hereketlendirijiniň esasy magnit akymy ýakoryň toguna bagly üýtgeýär ($I_{ýa} = I_{oý}$). Magnit akymyň ýakoryň toguna bolan $\Phi = f(I_{ýa})$ baglanyşygyna *hereketlendirijiniň magnit häsiýetnamasy* diýilýär we onuň $\Delta\Phi = 0$ ýagdaý üçin (1-nji çyzyk) hem-de $\Phi \neq 0$ ýagdaý üçin (2-nji çyzyk) gurlan baglanyşyklary 4.29-njy suratda görkezilendir.



4.29-njy surat. Yzygider oýandyrylýan hereketlendirijiniň magnit häsiýetnamasy



4.30-njy surat. Yzygider oýandyrylýan hereketlendirijiniň tizlik häsiýetnamasy

Analizi ýeňilleşdirmek maksady bilen hereketlendirijiniň magnit zynjyrynyň doýgun ýagdaýy hasaba alynmaýar we ýakoryň togy bilen magnit akymyň arasynda göni baglanyşyk bar diýip kabul edilýär.

$$\Phi = K_{\Phi} \cdot I_{ya}. \quad (4.32)$$

Onda:

$$\omega = \frac{U_{nom} - R_{ya} \cdot I_{ya}}{c \cdot K_{\Phi} \cdot I_{ya}}. \quad (4.33)$$

Ýakoryň nominal togunda ($I_{ya} = I_{ya,nom}$) onuň zynjyryndaky $R_{ya} \cdot I_{ya}$ naprýaženiýäniň peselmesi U_{nom} nominal naprýaženiýäniň $2 \div 4\%$ -ni düzýär. Şol sebäpli ýakoryň togunyň üýtgemegi (4.33) aňlatmanyň sanawjysyna az täsir edýär. Şonuň üçin $\omega = f(I_{ya})$ baglanyşygyň *giperboliki* häsiýeti bardyr (4.30-njy surat 1-nji çyzyk). Tizlik häsiýetnamanyň esasy aýratynlygy ýakoryň togunyň pes ululyklarynda häsiýetnamanyň uly ýapgytlygy (eňňitligi) bardyr. Ýakoryň togunyň pes ululyklarynda ω burç tizligiň ýokarlanmagy magnit akymynyň ululygynyň azalýandygy bilen düşündirilýär.

Ýakoryň togunyň $I_{ya} = (0,7 \div 0,8)$ ululyklarynda $\omega = f(I_{ya})$ baglanyşygyň hakyky häsiýetnamasy (4.30-njy surat 1-nji egri çyzyk) *giperboliki* baglanyşykdan tapawutlanýar (4.30-nji surat 2-nji egri çyzyk). Bu hadysa ýakoryň uly toklarynda hereketlendirijiniň magnit ulgamynyň doýgun ýagdaýa baranlygy bilen, ýagny toguň ululygynyň ýokarlanmagy bilen magnit akymyň ululygynyň az üýtgeýänligi bilen düşündirilýär. Bu bolsa öz gezeginde ω burç tizligiň az-kem ösmegine getirýär. Şeýle-de ýakoryň reaksiýasynyň täsirinde esasy magnit akymyň peselmesi hem ω burç tizligiň ösmegine getirýär.

2. Moment häsiýetnamasy.

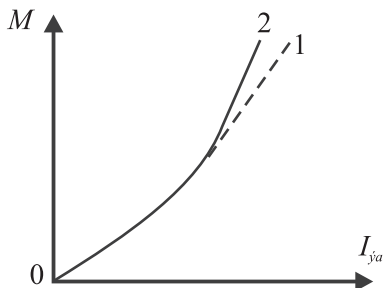
$\Phi = K_{\Phi} \cdot I_{ya}$ deňlikden peýdalanyň hereketlendirijiniň momenti üçin aňlatmany aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$M = c\Phi \cdot I_{ya} = c \cdot K_{\Phi} \cdot I_{ya}^2. \quad (4.34)$$

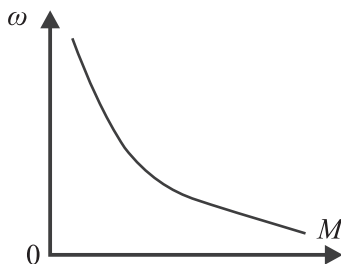
(4.34) aňlatmadan görnüşi ýaly, yzygider oýandyrylýan hereketlendirijilerde M moment ýakoryň togunyň kwadratyna baglydyr. $M = f(I_{ya})$ häsiýetnamanyň parabola görnüşli baglanyşygy bardyr (4.31-nji surat 2-nji egri çyzyk).

Hereketlendirijiniň magnit ulgamynyň doýgun ýagdaýynyň we ýakoryň reaksiýasynyň magnitsizlendiriji häsiýetiniň hasabyna uly

toklarda $M = f(I_{\dot{y}a})$ baglanyşygy paraboliki çyzykdan aşakda ýerleşýär (4.31-nji suratda 1-nji egri çyzyk).



4.31-nji surat. Yzygider oýandyrylýan hereketlendirijiniň moment häsiýetnamasy



4.32-nji surat. Yzygider oýandyrylýan hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamasy

3. Mehaniki häsiýetnamasy.

(4.34) aňlatmadan ýakoryň toguny $I_{\dot{y}a} = \sqrt{M/cK_{\Phi}\Phi}$ görnüş-de kesgitleýäris we ony hereketlendirijiniň burç tizligi üçin ýazylan (4.33) deňlikde goýýarys:

$$\omega = \frac{U_{nom}}{cK_{\Phi}I_{\dot{y}a}} - R_{ya} \frac{I_{\dot{y}a}}{cK_{\Phi} \cdot I_{\dot{y}a}} = \frac{U_{nom}}{cK_{\Phi}\sqrt{M/cK_{\Phi}}} - \frac{R_{ya}}{cK_{\Phi}},$$

bu ýerde $\sqrt{cK_{\Phi}} = K_M$ diýip belläp, yzygider oýandyrylýan hereketlendirijisiniň mehaniki häsiýetnamasy üçin aňlatmany alarys:

$$\omega = \frac{U_{nom}}{K_M \cdot \sqrt{M}} - \frac{R_{ya}}{K_M^2}. \quad (4.35)$$

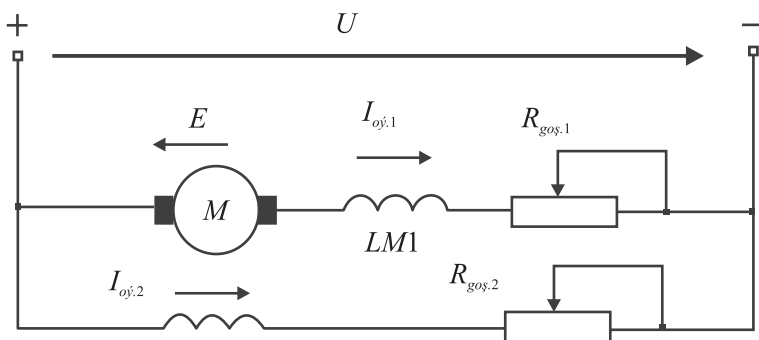
Yzygider oýandyrylýan hereketlendirijiniň $\omega = f(M)$ mehaniki häsiýetnamasy 4.32-nji sutarda görkezilendir ($U = U_{nom} = \text{const}$).

Hemişelik toguň garyşyk oýandyrylýan hereketlendirijisiniň häsiýetnamalary

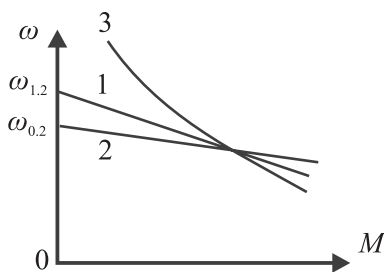
Garyşyk oýandyrylýan hereketlendirijiniň elektrik shemasy 4.33-nji suratda görkezilendir.

Adatça, bu hereketlendirijilerde yzygider we parallel oýandyrylýan sarymlary bolup, olaryň döredýän magnit akymalary biri-biriniň üstüne goşular ýaly edilip birleşdirilýär. Garyşyk oýandyrylýan hereketlendiriji-

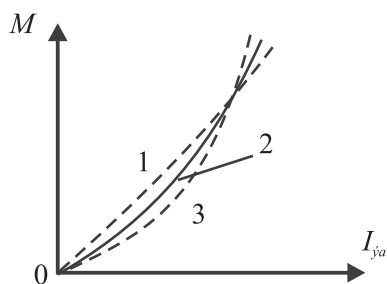
leriň yzygider sarymynyň döredýän magnit akymynyň ululygy ýakoryň $I_{\text{ýa}}$ toguna we sarymyň ω sargy sanyna baglydyr. Garyşyk oýandyrylýan hereketlendirijiniň häsiýetnamalary yzygider we parallel oýandyrylýan hereketlendirijileriň häsiýetnamalarynyň aralyk ýagdaýynda ýerleşýärler. Eger yzygider oýandyrylýan sarymyň täsiri pes bolsa (togy we sargy sany az bolsa), hereketlendirijiniň häsiýetnamasy parallel oýandyrylýan hereketlendirijiniň häsiýetnamasyna ýakyn bolýar. Eger-de yzygider oýandyrylýan sarymyň täsiri uly bolsa, onda hereketlendirijiniň häsiýetnamasy yzygider oýandyrylýan hereketlendirijiniň häsiýetnamasyna ýakyn bolýar. Garyşyk oýandyrylýan hereketlendirijiniň $\omega = f(M)$ mehaniki we $\omega = f(I_{\text{ýa}})$ tizlik häsiýetnamalary deňişlikde 4.34-nji hem-de 4.35-nji suratlarda görkezilendir (1-nji egri çyzyklar).



4.33-nji surat. Garyşyk oýandyrylýan hereketlendirijiniň elektrik shemasy



4.34-nji surat. Garyşyk oýandyrylýan hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamasy



4.35-nji surat. Garyşyk oýandyrylýan hereketlendirijiniň moment häsiýetnamasy

Deňeşdirmek üçin 4.34-nji we 4.35-nji suratlarda parallel (2-nji egri çyzyk) hem-de yzygider (3-nji egri çyzyk) oýandyrylýan here-

ketlendirijileriň mehaniki we tizlik häsiýetnamalary hem görkezilendir. Bu häsiýetnamalar birmeňzeş kuwwatly hereketlendirijiler üçin gurlandyr. Garyşyk oýandyrylýan hereketlendirijiniň ω_0 ideal boş işleýiş burç tizligi onuň parallel oýandyrylýan sarymynyň Φ_0 magnit akymynyň ululygy tarapyndan kesgitlenýär.

$$\omega_0 = \frac{U_{nom}}{c\Phi_0}. \quad (4.36)$$

4.2.3. Hemişelik toguň hereketlendirijileriniň işe goýberilişi

Hemişelik toguň hereketlendirijilerini işe goýbermek üçin önümçilikde göni, ýakoryň zynjyryna reostat birikdirmek we hereketlendirijä pes naprýaženiýe bermek usullary ulanylýar. Bu usullar boýunça hereketlendirijiler işe goýberilende, esasan, iki sany şerti ýerine ýetirmek talap edilýär. Onuň birinjisi işe goýberilýän hereketlendirijiniň aýlaýjy momentiniň ululygy, hereketsiz duran ýakory ýerinden gozgamaga we onuň aýlaw ýygylgyny ýokarlandyrmaga mümkinçilik döretmelidir. Ikinji şert bolsa hereketlendirijiniň işe goýberilen pursatynda ýüze çykýan, ululygy boýunça hereketlendirijiniň I_{nom} nominal togundan onlarça gezek uly bolan $I_{goý}$ işe goýberiliş togunyň ululygynyň, mümkin boldugyça, az bolmagyny gazanmaly.

Hereketlendirijini göni usul boýunça işe goýbermek üçin ony U naprýaženiýeli hemişelik toguň çeşmesine birikdirmek ýeterlikdir. Hereketlendiriji şu usul boýunça işe girizilen pursatynda, ýagny ol heniz hereketsiz wagtynda ($n = 0$), ýakoryň sarymlarynda induktirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjiniň ($(E = cn\Phi)$) ululygynyň nula deňligi hem-de ýakoryň garşylygynyň örän azlygy ($R_{ja} = 0,02 \div 1,1 \Omega$) sebäpli onuň üstünden ululygy

$$I_{goý} = \frac{U}{R_{ja}} \quad (4.37)$$

görnüşde kesgitlenilýän örän uly $I_{goý}$ goýberiş togy akyp geçýär. Bu toguň ululygynyň, hereketlendirijiniň kuwwatyna görä, onuň nominal togundan, takmynan 5-den 100 gezege çenli ulydygy sebäpli, bu usul diňe, pes kuwwatly hereketlendirijilerde, ýagny goýberiş togunyň ululygy

$I_{goý} = (4 \mid 6) I_n$ bolan we ýakoryň öz doly aýlaw ýygylgyny almak üçin gerek bolan wagty 1 s. töweregi bolan hereketlendirijilerde ulanylyar. Uly kuwwatly hereketlendirijileri işe goýbermek üçin onuň ýakoryna yzygider R garşylykly reostat birikdirilýär we onuň kömegi arkaly hereketlendiriji işe goýberilen pursadynda ýakoryň üstünden geçýän toguň ululygy çaklandirilýär. Bu toguň ululygy görnüşde kesgitlenilýär.

$$I_{ýa, goý} = \frac{U}{R_{ýa} + R}. \quad (4.38)$$

Önümçilikde hereketlendirijiniň $I_{goý}$ işe goýberiş togunyň ululygy, onuň nominal togundan $I_{ýa, goý} = (1, 4 \div 2, 5) \cdot I_{nom}$ uly bolmaz ýaly edip alynýar we onuň üçin ýakora yzygider birikdiriljek reostatyň garşylygy

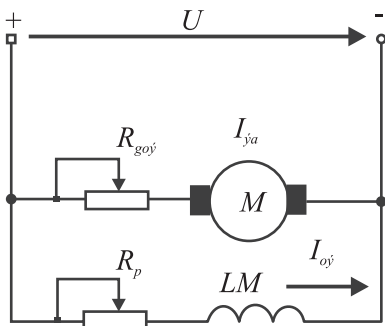
$$R = \frac{U}{I_{ýa, goý}} - R_{ýa} \quad (4.39)$$

aňlatmanyň kömegi arkaly kesgitlenilýär.

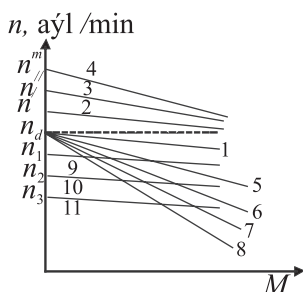
Işe goýberilen pursatynda ýakoryň üstünden geçýän tok $I_{ýa, goý}$ togunyň ululygyny azaltmak maksady bilen hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäniň ululygyny kem-kemden ýokarlandyrmak usuly giňden ulanylyar. Onuň üçin naprýaženiýesiniň ululygyny erkin üýtgedip bolýan hemişelik toguň çeşmeleri: generatorlar ýa-da üýtgeýän togy hemişelik toga öwürüji göneldijiler ulanylyar. Bu usul, esasan, aýlaw ýygylgyny sazlanýan uly kuwwatly hereketlendirijilerde ulanylyar.

4.2.4. Parallel oýandyrylýan hereketlendirijileriň aýlaw ýygylgyny sazlamagyň usullary

Elektrik shemasy 4.36-njy suratda görkezilen parallel oýandyrylýan hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny momentini berlen ululygynda ($M = \text{const}$), onuň mehaniki häsiýetnamasynyň deňlemesinden görnüşi ýaly, Φ magnit akymyny, ýakoryň zynjyrynyň garşylygyny hem-de hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäniň ululygyny üýtgetmek arkaly sazlamak mümkindir.



4.36-njy surat. Parallel oýandyrylýan hereketlendirijiniň elektrik shemasy



4.37-nji surat. Parallel oýandyrylýan hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamalary

Hereketlendirijiniň Φ magnit akymynyň ululygynyň hemişelik bolan ýagdaýy üçin ($\Phi = \text{const}$) hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamasynyň deňlemesini aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$n = n_\delta - b \cdot M. \quad (4.40)$$

Bu ýerde: $n_\delta = \frac{U}{c_E \cdot \Phi}$ we $b = \frac{R_{ya}}{c_E \cdot \Phi^2}$

4-nji deňleme göni çyzygyň deňlemesi bolany sebäpli, parallel oýandyrylýan hereketlendirijiniň 4.37-nji suratda görkezilen tebigy mehaniki häsiýetnamasy α ýapgytlyk burçy bolan „b“ koeffisiýentli göni çyzygy emele getirýär (1-nji çyzyk).

Hereketlendirijilerde, ýakoryň garşylygynyň örän azlygy sebäpli, M -momentiň uly aralykda erkin üýtgemegi, onuň n aýlaw ýygylygyna örän az täsir edýär. α ýapgytlyk burçy kiçi bolan $n = f(M)$ baglanyşyklara „Gaty“ häsiýetli (durnukly) mehaniki häsiýetnamalar diýilýär.

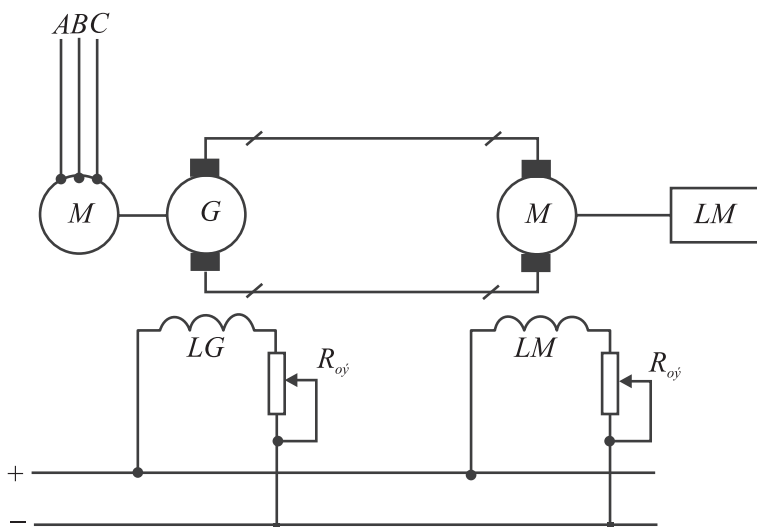
Hereketlendirijiniň aýlaw ýygylygyny Φ magnit akymy arkaly sazlamak üçin onuň oýandyryjy sarmyna yzygider R_p garşylykly reostat birikdirilýär. R_p reostatyň garşylygynyň ýokarlanmagy oýandyryjy sarmyň üstünden geçýän I_{ov} toguň, şeýle-de Φ magnit akymynyň azalmagyna getirýär. Magnit akymynyň azalmagy, birinjiden, hereketlendirijiniň boş (ýüksüz $M = 0$) işleýän wagtynda ýüze çykýan n_δ aýlaw ýygylygynyň ösmegine hem-de $n = f(M)$ baglanyşygyň α ýapgytlyk burçuň az-kem ösmegine getirýär.

4.37-nji suratda Φ magnit akymynyň maksimal ululygyna degişli gurlan mahaniki häsiýetnama görä (1-nji çyzyk). Φ magnit akymynyň ululygyny azaldylyp alnan $n = f(M)$ häsiýetnamalar ($2 \div 4$ çyzyklar) görkezilendir. Alnan $n = f(M)$ baglanyşyklardan görnüşi ýaly, Φ akymyň ululygynyň peselmegi hereketlendirijiniň n aýlaw ýygylgynyň ýokarlanmagyna getirýär.

Hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgynyň ösmegi netijesinde, onuň kommutasion häsiýetleriniň ýaramazlaşýandygy, şeýle-de onuň mehaniki taýdan zaýаланmagyna getirýänligi sebäpli, önümçilikde bu usul bilen hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny ýokarlandyrmak onuň n nominal aýlaw ýygylgyndan 2 esseden ýokary geçirilmeýär.

Hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamasynyň deňlemesinden görnüşi ýaly, onuň aýlaw ýygylgyny ýakoryň zynjyryna yzygider $R_{goş}$ garşylykly reostat birikdirmek arkaly diňe azaltmak mümkindir. $R_{goş}$ goşmaça garşylygyň dürli ululyklaryna degişli alnan $n = f(M)$ mehaniki häsiýetnamalar, 4.37-nji suratda ($5 \div 8$ göni çyzyklar) görkezilendir. Alnan häsiýetnamalardan görnüşi ýaly, hereketlendirijiniň boş işleýän ýagdaýynda ($M = 0$ degişli) n_δ aýlaw ýygylgyň ululygynyň $R_{goş}$ garşylyga bagly dældigi sebäpli, $n = f(M)$ baglanyşyklaryň göni çyzyklarynyň ($5 \div 8$ -nji çyzyklar) ählisi bir nokatda başlaýarlar. Emma $R_{goş}$ garşylygyň ululygynyň ösmegi, mehaniki häsiýetnamasynyň deňlemesindeki „b“ koeffisiýentiniň, şeýle-de α ýapgytlyk burçunyň ösmegine getirýär we netijede, ýakoryň zynjyryna goşmaça garşylyk birikdirmek hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgy peselýär. Hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny sazlamagyň elektrik energiýanyň goşmaça ýitgilerine $R_{goş} \cdot I_a^2$ getirýänligi, ýagny onuň ykdysady tarapdan amatsyzlygy sebäpli bu usul önümçilikde örän az ulanylýar.

Hemişelik toguň hereketlendirijileriniň aýlaw ýygylgyny erkin sazlamak üçin önümçilikde ýakora berilýän naprýaženiýäni üýtgetmek usuly has giňden ulanylýar. Bu usulda hereketlendirijiniň ýakory naprýaženiýesini erkin üýtgedip bolýan baglanyşyksyz hemişelik toguň generatoryndaky ýa-da edara edilýän, ýarymgeçirijilerden taýýarlanan, tranzistorly, tiristorly, şeýle-de simaply göneldijiniň üstünden iýmitlenýär. Ýakory baglanyşyksyz hemişelik toguň generatoryndaky iýmitlendirmek üçin 4.38-nji suratda görkezilen generator-hereketlendiriji ulgamy peýdalanylýar.



4.38-nji surat. Hemişelik toguň hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny sazlamak üçin generator-hereketlendiriji ulgamy

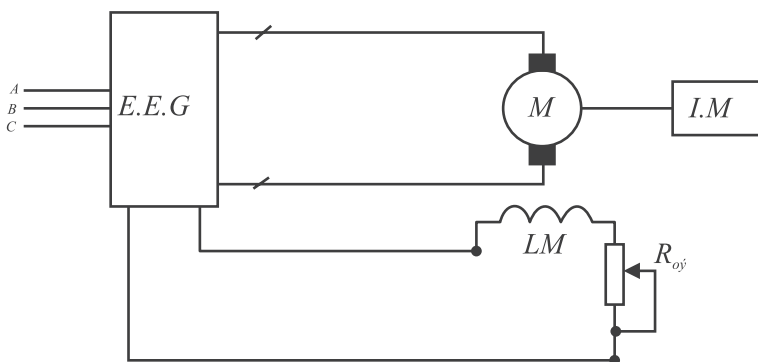
Bu shema, esasan, uly kuwwatly hereketlendirijileriň aýlaw ýygylgyny giň çäkde sazlamak üçin peýdalanylýar.

Pes kuwwatly hemişelik toguň hereketlendirijileriniň aýlaw ýygylgyny sazlamak üçin ykdysady taýdan amatly bolan, shemasy 4.39-njy suratda görkezilen edara edilýän ýarymgeçirijili göneldijiler ulanylýar.

Hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäni, U_n nominal ululykdan ýokary geçirilen wagtynda, onuň kommutasion häsiýetleriniň ýaramazlaşýandygy sebäpli, bu usul hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgynyň onuň nominal ululygyndan pes tarapa üýtgetmek üçin peýdalanylýar. Hereketlendirijä berilýän naprýaženiýäniň dürli ululyklaryna degişli gurlan $n = f(M)$ baglanyşyklar 4.37-nji suratda ($9 \div 11$ göni çyzyklar) görkezilendir. Alnan mehaniki häsiýetnamalardan görnüşi ýaly, U naprýaženiýäniň ululygynyň üýtgemegi diňe hereketlendirijiniň n_δ aýlaw ýygylgyny üýtgedýär. Emma ol $n = f(M)$ baglanyşyklaryň α ýapgytlyk burçunyň hem-de „b“ koeffisiýentiň ululyklaryna hiç hili täsir etmeýär.

Hemişelik toguň hereketlendirijisi peýdalanylýan wagtynda, onuň oýandyryjy sarymynyň üstünden geçýän toguň nula çenli azaldylmagyna hiç wagtda ýol bermeýär. Eger-de bir sebäbe görä oýandyryjy togunyň ululygy nula deň bolsa hereketlendirijiniň mehaniki häsiýet-

namasyndan görnüşi ýaly, onuň aýlaw ýygylgy örän ýokarlanýar we netijede, ol hereketlendirijiniň hatardan çykmagyna getirýär. Bu hadysa magnit akymynyň azalmagy netijesinde ýakoryň togunyň ýokarlanýanlygy bilen düşündirilýär.



4.39-njy surat. Edara edilýän ýarymgeçirjili göneldijiniň hemişelik toguň hereketlendirijisiniň aýlaw ýygylgyny sazlamak üçin peýdalanylýan shemasy

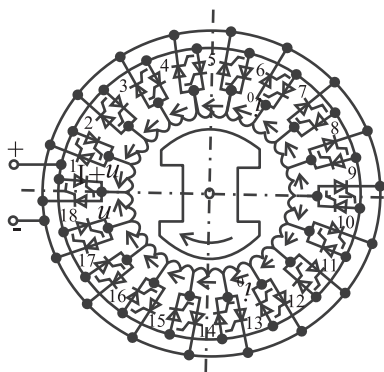
4.2.5. Wentelli hereketlendirijiler

Wentelli hereketlendiriji kolektor-çotga ulgamy ýarymgeçiriji kommutator bilen çalşyrylan hemişelik toguň hereketlendirijileriniň bir görnüşidir. Hemişelik toguň hereketlendirijileriniň kollektor plastinkalaryny wagtly-wagtynda arassalamak, çotgalaryny çalşyrmak gerek bolýandygy sebäpli, şeýle-de kollektor plastinkalary bilen çotgalaryň arasynda uçgunyň döremegi olaryň ýangyn howply we agressiw sredalarda ulanmagyň mümkinçiliklerini hem-de olaryň ulanylyş möhletlerini çäklendirýär. Şol sebäpli häzirki döwürde ýokarda agzalan kemçiliklerden halas bolan wentelli hereketlendirijiler ulanylýar. Wentelli hereketlendirijiniň elektrik shemasy 4.36-njy suratda görkezilendir.

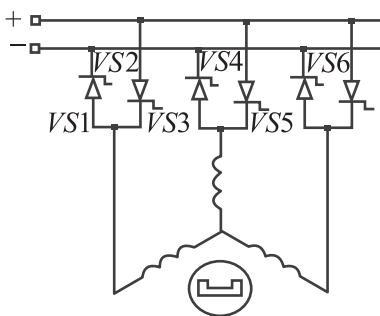
Wentelli hereketlendirijilerde stator bilen rotoryň ýerleri çalşyrylýar. Ýagny ýakor hereketlendirijiniň hereket etmeýän böleginde, oýandyryjy ulgam bolsa onuň hereket edýän böleginde ýerleşdirilýär. Şeýle etmek bilen ýakoryň zynjyryndaky typýan kontaktlar hereketlendirijiniň düzüminden aýrylýar. Oýandyryjy ulgamyň kuwwaty-

nyň ýakoryň zynjyrynyň kuwwaty bilen deňeşdirilende örän azlygy sebäpli, oýandyryjy ulgamyň zynjyryndaky kollektor-çotga ulgamy has ygtybarly işleýär. Kähalatlarda hereketlendirijiniň oýandyryjy ulgamy hökmünde hemişelik magnit hem ulanylýar.

Wentelli hereketlendiriji aşakdaky prinsipde işleýär. Hereketlendirijiniň ýakorynda ýerleşdirilen tiristorlary (4.40-njy surat) belli bir tertipde açyp-ýapmak arkaly adaty hereketlendirijilerde bolşy ýaly ýakoryň sterženlerindäki toklaryň ugurlary üýtgedilýär. Şeýle üýtgetmeklik hereketlendirijiniň aýlaýjy elektromagnit momentiniň ugruny hemişelik saklamak maksady bilen ýerine ýetirilýär. Meselem, impuls-fazaly dolandyryjy ulgamyň kömegi arkaly ýakoryň 10-njy we 18-nji tiristorlary açylanda (beýleki tiristorlar ýapyk) ýakoryň togunyň ýarysý 1-9-njy seksiýalar boýunça ýokary tarapa, galan ýarysý bolsa 10-18-nji seksiýalar boýunça aşaklygyna tarap 10-njy tiristordan girip, 18-nji tiristordan daşyna çykýarlar. Soňra 1-nji we 11-nji tiristorlary açyp (beýleki tiristorlar ýapyk) ýakorda emele gelýän magnit meýdanynyň okuny öňki ýagdaý bilen deňeşdirilende belli bir gradus öňe süýşýär. Bu bolsa oýandyryjy ulgamyň (rotoryň) edil şeýle burça öwrülmegine getirýär. Ýokardaky şertde soňra 2-nji–12-nji, 3-nji–13-nji, 4-nji–14-nji we ş.m. tiristorlar gezekli-gezegine açylýarlar. Netijede, rotor statoryň magnit meýdany bilen deň ýygylýan herekete gelýär.



4.40-njy surat.
Wentelli hereketlendirijiniň
elektrik shemasy



4.41-nji surat. Oýandyryş ulgamy
asinhron hereketlendirijiniň statoryna
meňzeş wentilli hereketlendiriji

Wentelli hereketlendirijiniň seredilýän görnüşinde ýakoryň (statoryň) düzümine örän köpsanly tiristoryň girýändigini we ýakoryň sarymynyň taýýarlanyşynyň çylşyrymlydygy sebäpli, soňky wagtda ýakorynyň sarymlarynyň taýýarlanylşy üçfazly asinhron hereketlendirijiniň statorynyň sarymlarynyň taýýarlanylşyna meňzeş hem-de tiristorlarynyň sany az bolan wentelli hereketlendirijilerden peýdalanylýar. Şeýle hereketlendirijiniň elektrik shemasy 4.41-nji suratda görkezilendir.

Shemadaky tiristorlar faza-impulsly dolandyryjy ulgam arkaly aşakdaky tertipde açylyp-ýapylýarlar:

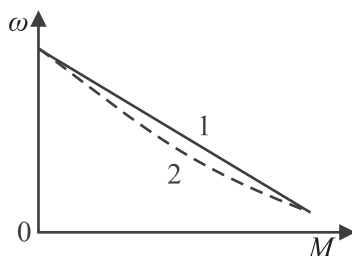
- a) 2 – 3 – 5 – açyk; 1 – 4 – 6 – ýapyk.
- b) 4 – 1 – 5 – açyk; 3 – 6 – 2 – ýapyk.
- ç) 6 – 1 – 3 – açyk; 5 – 2 – 4 – ýapyk.

Tiristorlar belli bir yzygiderlikde wagt boýunça ýokardaky tertipde açylyp-ýapylanda statorda edil asinhron hereketlendirijiniň statoryndaky ýaly aýlanýan magnit meýdany emele gelýär we oýandyryjy ulgamy (rotory) herekete getirýär. Wentelli hereketlendirijiniň funksional shemasy 4.42-nji suratda görkezilendir.

Wentelli hereketlendirijiler üç sany özara baglanyşykly böleklerden: 1 – ýarymgeçiriji kommutatordan, 2 – elektrik hereketlendirijiden, 3 – ýagdaý datçiginden ybaratdyr.



4.42-nji surat. Wentelli hereketlendirijiniň funksional shemasy



4.43-nji surat. Wentelli hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamasy

Köp seksiyaly wentelli hereketlendirijileriň mehaniki häsiýetnamalary edil adaty kollektorly hereketlendirijileriňkä meňzeşdir (4.43-nji surat, 1-nji egri çyzyk). Seksialarynyň sany çäklendirilen wentelli hereketlendirijilerde ýakoryň seksialarynyň sarymlarynyň sanynyň köp bolmagy netijesinde (L induktiwligiň täsirinde) onuň mehaniki häsiýet-

namasy göni çyzykly baglanyşykdan tapawutlanýar (4.43-nji surat, 2-nji egri çyzyk). Wentelli hereketlendirijiniň $\omega = f(M)$ mehaniki häsiýetnamasy 4.43-nji suratda görkezilendir. Wentelli hereketlendirijileriň aýlaw ýygylklarynyň sazlanlyşy edil adaty hemişelik toguň hereketlendirijileriniň aýlaw ýygylklarynyň sazlanlyşy ýaly amala aşyrylýar.

4.3. Hemişelik toguň ýörite niýetlenen maşynlary

Hemişelik toguň tahogeneratorlary.

Hereketlendirijileriň ýa-da işçi mehanizmleriň tizliklerini ölçemek üçin onuň aýlaw ýygylgy elektrik signalyna (naprýaženiýä) özgerilýär. Şeýle maksatlar üçin *tahogenerator* diýlip atlandyrylýan ýörite niýetlenen elektrik maşyny ulanylýar. Hemişelik toguň tahogeneratory öz konstruksiýasy boýunça pes kuwwatly hemişelik toguň generatoryndan hiç-hili tapawutlanmaýar. Tahogeneratoryň oky tizligi ölçenilýän hereketlendirijiniň ýa-da işçi mehanizmiň okuna birikdirilýär.

Tahogeneratoryň esasy häsiýetnamasy onuň çykyşyndaky naprýaženiýäniň ululygynyň aýlaw ýygylgy bolan $U_{gen} = f(n)$ baglanyşygydyr. Bu baglanyşygyň göni çyzykly bolmagy esasy talaplaryň biridir. $U_{gen} = f(n)$ baglanyşygyň aňlatmasy aşakdaky deňlemenden alynýar.

$$U_{gen} = E - I_{\dot{y}a} \cdot \Sigma r_{\dot{y}a} - \Delta U_s. \quad (4.41)$$

$E = c\Phi n$ we $I_{\dot{y}a} = U_{gen} / R_{\dot{y}ük.g}$ baglanyşygy hasaba alyp, käbir öwrülişiklerden soňra alarys:

$$U_{gen} = \frac{c\Phi}{1 + \frac{\Sigma r_{\dot{y}a}}{R_{\dot{y}ük.g}}} \cdot n - \frac{\Delta U_s}{1 + \frac{\Sigma r_{\dot{y}a}}{R_{\dot{y}ük.g}}} \quad (4.42)$$

Kollektor bilen çotganyň arasyndaky naprýaženiýe peselmesini hasaba almasak, ýagny ΔU_s diýip kabul etsek:

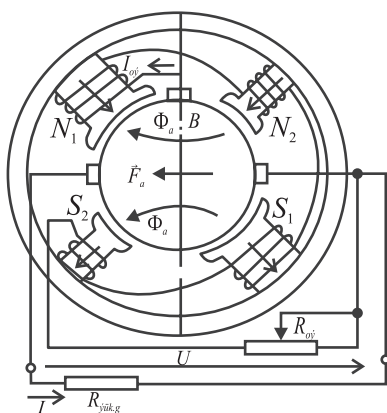
$$U_{gen} = \frac{c\Phi}{1 + \frac{\Sigma r_{\dot{y}a}}{R_{\dot{y}ük.g}}} \cdot n = K_{kp} \cdot n. \quad (4.43)$$

Bu aňlatmada $K_{kp} = \frac{c\Phi}{1 + \frac{\Sigma r_{ya}}{R_{yük.g}}}$ tahogeneratoryň $U_{gen} = f(n)$ bagla-

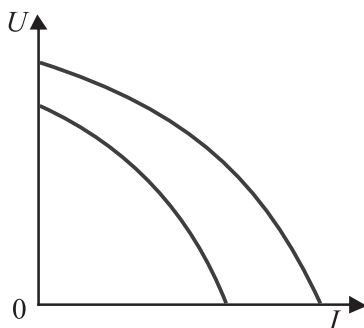
nyşygynyň ýapgytlygyny (eňňitligini) görkezýän koeffisiýent. Çykyş häsiýetnamanyň ýapgytlygynyň ululygy: $(3 \div 100) \frac{\text{mW}}{\text{aýl/min}}$ çäkde bolup, ol $R_{yük.g}$ ýüküň garşylygyna baglydyr. Ýüküň garşylygynyň ululygyny peseltmek üçin $\frac{\Sigma r_{ya}}{R_{yük.g}} \ll 1$ edilip saýlanylýar.

Hemişelik toguň kebşirleýji generatorlary.

Metallary elektrik usuly arkaly kebşirmek üçin niýetlenen generatoryň daşky häsiýetnamasynyň eňňit aşaklygyna gaýdýan häsiýetiniň bolmagy zerurdyr. Şeýle häsiýetnamaly generatoryň elektrik shemasy 4.44-nji suratda görkezilen.



4.44-nji surat. Kebşirleýji generatoryň elektrik shemasy



4.45-nji surat. Kebşirleýji generatoryň daşky häsiýetnamasy

Generatoryň esasy aýratynlyklarynyň biri, onuň oýandyryjy ulgamynyň polýuslary ölçegleri özara deň bolmadyk iki sany bölege bölünendir. Polýuslaryň N_1 we S_1 bölekleriniň diametrleri uly, beýleki N_2 we S_2 bölekleriniň diametrleri bolsa kiçi edilip taýýarlanylýar. Ekspluatasiýa döwründe serdeçnikleri uly diametrli N_1 we S_1 polýuslarynda magnit meýdany doýgun däl ýagdaýda bolar ýaly, serdeçnikleri

kiçi diametrli N_2 we S_2 polýuslary magnit taýdan doýgun ýagdaýda bolar ýaly edilip taýýarlanylýar.

Oýandyryjy ulgamyň sarymlarynyň bir uýy esasy çotgalaryň birine, onuň beýleki uýy bolsa esasy çotgalaryň aralygyndaky geometriki neýtralda ýerleşen çotga birikdirilýär. Ýakoryň üstünden tok geçende onuň döredýän magnit akymynyň ugry oýandyryjy ulgamyň N_1 we S_1 polýuslarynyň döredýän magnit akymalarynyň tersine, N_2 we S_2 polýuslaryň döredýän magnit akymalarynyň bolsa ugruna tarap hereket eder ýaly edilip taýýarlanylýar. Netijede, ýakoryň döredýän magnit akymy N_1 we S_1 polýuslaryň döredýän magnit akymalaryny magnit-sizlendirilýär. N_2 we S_2 polýuslaryň magnit taýdan doýgunlygy sebäpli, ýakoryň magnit akymynyň täsirinde olaryň magnit akymlary üýtgemeyär. Bu hadysa bolsa öz gezeginde ýakoryň togunyň ululygy ýokarlananda generatoryň çykyşyndaky naprýaženiýäniň örän çalt peselmegine getirýär.

Kebşirleýji generatoryň daşky häsiýetnamasy 4.45-nji suratda görkezilendir. Oýandyryjy ulgamyň magnit akymlary N_2 we S_2 polýuslaryň tarapyndan döredilýändigini sebäpli, generatoryň oýandyryjy ulgamynyň togy ýüküň ululygyna az baglydyr. Kebşirleýji tok R_{oy} garşylykly rezistoryň kömegi arkaly sazlanýlýar.

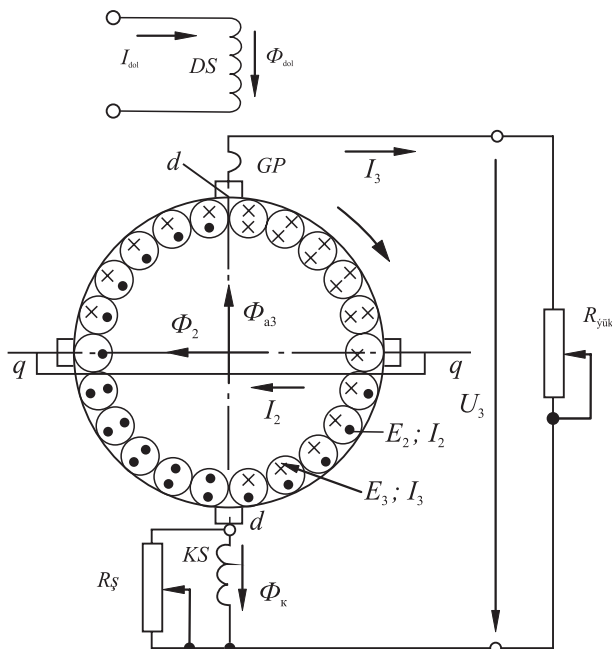
Hemişelik toguň elektromaşynly güýçlendirijileri.

Elektromaşynly güýçlendirijiler hemişelik toguň generatorynyň aýratyn görnüşleriniň biridir. Elektromaşynly güýçlendirijiler awtomatiki sazlanlyş ulgamlarynda giňden ulanylýar. Olar otnositel uly kuwwatlary otnositel pes kuwwatlaryň kömegi bilen dolandýrmak üçin niýetlenendir. Ýakordan alynýan P_{cyk} çykyş kuwwatyň oýandyryjy saryma berilýän P_{gir} giriş kuwwatyna bolan gatnaşygyna elektromaşynly güýçlendirijiniň *güýçlendiriş koeffisiýenti* diýilýär:

$$K_g = \frac{P_{cyk}}{P_{gir}}. \quad (4.44)$$

Ýönekeý elektromaşynly güýçlendirijiler hökmünde adaty baglanyşyksyz oýandyrylýan hemişelik toguň generatory peýdalanylýar. Bu güýçlendirijiniň güýçlendiriş koeffisiýentiniň ululygy $K_g = 30 \div 100$ aralykda bolýar. Awtomatiki sazlanlyşyň takyklygy-

ny ýokarlandyrmak üçin güýçlendiriş koeffisiýenti $K_g = 10^3 \div 10^5$ deň bolan ýörite elektrik maşynlary ulanylýar. Häzirki döwürde *kese meýdanly* elektromaşynly güýçlendirijiler has giňden peýdalanylýar. Bu güýçlendirijiler iki polýusly hemişelik toguň generatory görnüşinde taýýarlanylýar (4.46-njy surat).



4.46-njy surat. Iki polýusly hemişelik toguň elektromaşynly güýçlendirijisiniň elektrik shemasy

Güýçlendirijiniň kollektorynda oklary biri-birine görä 90° burça süýşürilen çotgalaryň iki jübüti ýerleşdirilýär. Olaryň $q-q$ okda ýerleşdirilen çotgalaryna kese $d-d$ okda ýerleşdirilen çotgalaryna bolsa *ugurdaş* çotgalar diýilýär. Kese $q-q$ -çotgalar özara gysga birleşdirilip, $d-d$ çotgalar bolsa ýüke birikdirilýär. Statorda $d-d$ oka ugurdaş birnäçe oýandyryjy sarym ýerleşdirilýär. Bu sarymlara elektromaşynly güýçlendirijilerde *dolandyryjy sarymlar* diýilýär. 4.46-njy suratda olaryň diňe biri görkezilendir (DS). Dolandyryjy sarymdan geçýän uly bolmadyk I_{dol} dolandyryjy tok Φ_{dol} dolandyryjy magnit akymyny döredýär.

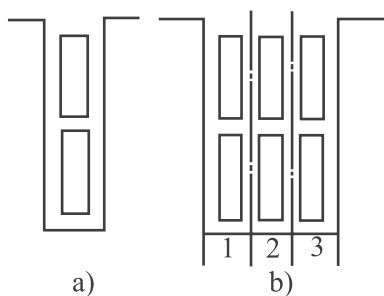
Bu akym bolsa ýakor herekete getirilende onuň sarymlarynda E_2 elektrik hereketlendiriji güýji indusirleýär. E_2 elektrik hereketlendiriji güýjüň ugry ýakoryň töwereginiň daş ýüzünde görkezilip (4.46-njy surat), onuň maksimal ululygy $q-q$ çotgalaryň arasynda emele gelýär.

$q-q$ çotgalaryň arasy özara gysga birleşdirilenligi we ýakoryň içki garşylygynyň örän azlygy sebäpli, E_2 elektrik hereketlendiriji güýjüň uly bolmadyk ululyklarynda hem ýakorda uly I_2 toguň döremegine sebäp bolýar hem-de onuň ugry E_2 elektrik hereketlendiriji güýjüň ugry bilen gabat gelýär. Bu tok ýakoryň sarymlarynyň üstünden geçip, ýakoryň reaksiýasynyň döredýän Φ_2 magnit akymyny emele getirýär we onuň ugry $q-q$ okuň ugry bilen gabat gelýär. Φ_{dol} dolandyryjy magnit akymy bilen deňeşdirilende ondan birnäçe esse uly bolan Φ_2 magnit akymy ýakoryň sarymlarynda ugry $d-d$ ok boýunça gabat gelýän E_3 elektrik hereketlendiriji güýji indusirleýär. Bu elektrik hereketlendiriji güýjüň we onuň döredýän I_3 togunyň ugurlary ýakoryň töwereginiň içki tarapynda görkezilendir. I_3 tok ýakoryň üstünden geçip, Φ_3 magnit akymyny emele getirýär we onuň ugry Φ_{dol} magnit akymynyň tersine tarap ugrukdyrylandyr. Φ_3 magnit akymy öz ululygy boýunça Φ_{dol} magnit akymyndan birnäçe esse uludyr. Şu sebäpli elektromaşyn güýçlendirijiniň kadaly işlemegi üçin Φ_3 magnit akymyny kompensirlemek zerurlygy ýüze çykýar. Şu maksat bilen elektromaşynly güýçlendirijilerde ýörite kompensirleýji (KS) sarym ulanylýar we ol ýakora yzygider birikdirilýär.

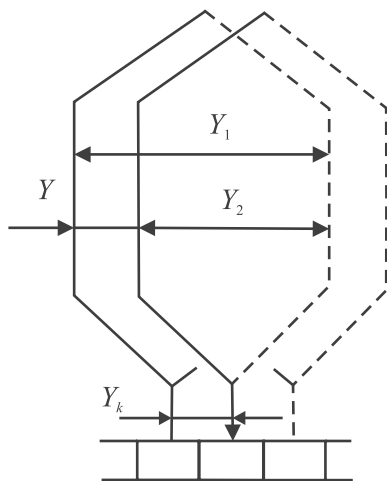
4.4. Hemişelik toguň maşynlarynda ýakoryň sarymlarynyň halkalaýyn saralyşy

Hemişelik toguň maşynlarynyň esasy bölekleriniň biri bolan ýakoryň sarymlarynda üýtgeýän elektrik hereketlendiriji güýç indussirleýär we ol maşynyň nominal naprýaženiýesini, toguny we kuwwatyny kesgitleýär. Häzirki döwürde ýakoryň sarymlarynyň saralyşynyň dürli görnüşleriniň barlygyna garamazdan, olaryň sarymlaryny effektiv peýdalanmak maksady bilen, esasan, deprek (baraban) görnüşli saralyş usuly köpçülikleýin ulanylýar. Şeýle sarymlar seksiyalardan ybarat bolup, olar ýakoryň pazlarynda ikigat edilip ýerleşdirilýär. Ýagny seksiýanyň

bir tarapy pazyň ýokarky böleginde, onuň ikinji tarapy bolsa başga bir pazyň aşaky böleginde ýerleşýär. Eger-de pazyň bir gatynda bir seksiýanyň diňe bir tarapy ýerleşýän bolsa, onda şeýle paза elementar paz diýilýär. Emma hakykatda ulanylýan maşynlaryň her bir pazynda seksiýanyň $u_p = 2; 3; 4; \dots n$ taraplary ýerleşýär. Şeýle hakyky paz u_p elementar pazlardan ybarat diýip kabul edilýär. Elementar paz we 3 sany elementar pazlardan ybarat bolan hakyky paz 4.47-nji suratda görkezilendir.



4.47-nji surat. Elementar paz (a) we 3 sany elementar pazdan ($u_p = 3$) ybarat bolan hakyky paz (b)



4.48-nji surat. Halkaly sarymyň seksiýalarynyň birikdirilişi

Seksiýalar pazlarda ýerleşdirilmezden öň olar umumy izolýasiýa bilen örtülýär. Ýakoryň sarymlarynyň tegekleri emele getirmekleri üçin seksiýalar özara belli bir yzygiderlikde birikdirilýär. Şeýle baglanyşykly hemişelik toguň maşynlarynyň ýakorynyň sarymlary halkaly, tolkunly we garyşyk görnüşlere bölünýär. Halkaly we tolkunly sarymlar hem öz gezeginde ýönekeý hem-de çylşyrymly görnüşde bolýar. Ýakoryň parallel şahalarynyň sany sarymlaryň görnüşine bagly bolup, ol onuň ulanyljak ýeri boýunça kesgitlenilýär.

Seksiýalaryň özara birikdirilişiniň yzygiderliligi we olaryň kollektor-plastinkalar bilen birikdirilişi sarymyň ädimleri arkaly kesgitlenýär (4.48-nji surat). Onuň üçin aşakdaky ädimeri bilmek zerurdyr:

Y_1 – birinji hususy ädim, seksiyanyň taraplarynyň arasyndaky uzynlyk. Bu ädim seksiyanyň inini kesgitleýär. Seksiyanyň pazyň ýokarky böleginde ýerleşýän tarapyna onuň başlanýan tarapy, degişli pazyň aşaky böleginde ýerleşýän tarapyna bolsa gutarýan tarapy diýilýär.

Y_2 – ikinji hususy ädim. Bu ädim seksiyanyň gutarýan tarapy bilen indiki seksiyanyň başlanýan tarapynyň arasyndaky uzynlyk.

Y – jemleýji ädim, seksiyanyň we indiki seksiyanyň başlanýan taraplarynyň arasyndaky uzynlyk.

Y_k – kollektor boýunça ädim, seksiyalaryň geçirijileriniň kollektor-plastinkalara birikdirilen nokatlarynyň arasyndaky uzynlyk. Sarymlaryň ädimleri elementar pazlar boýunça, kollektor boýunça ädimler – kollektor bölümleri boýunça ölçenilýär.

Y_1 ädim, seksiyalaryň başlanýan we gutarýan taraplary polýuslaryň dürli polýarlygynda ýerleşer ýaly edilip saýlanylýar ýa-da başgaça seksiyanyň ini polýus bölümüne deň bolar ýaly alynýar. Şeýle ýagdaýda ýakor aýlananda onuň taraplarynda indussirlenýän elektrik hereketlendiriji güýjüň ugurlary garşylykly bolýandygy sebäpli, olar goşulýarlar. Y_1 ädimiň ululygy bitin sana deň bolar ýaly alynýar we ol aşakdaky aňlatma boýunça kesgitlenýär:

$$Y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon. \quad (4.45)$$

Bu ýerde: Z_e – elementar pazlaryň sany; p – polýus jübütleriň sany; ε – dogry drob bolup, ol Y_1 ululygy bitin sana deňlemek üçin kabul edilýär (ε ululyk „+“ we „-“ alamatly bolup bilýär). Köplenç ýagdaýda, ol „-“ alamaty bilen alynýar. Sebäbi şol ýagdaýda sarymlary taýýarlamak üçin sarp edilýän simleriň mukdary azalýar.

Eger-de $Y_1 = \frac{Z_e}{2p} = \tau_p$ – bitin sana deň bolsa, onda sarymyň ädimine doly ýa-da diametrial ädim diýilýär (τ_p – polýus bölünmesi elementar pazlarda aňladylýar). Eger-de $Y_1 < \frac{Z_e}{2p}$ bolsa, onda gysgaldylan ädim diýilýär.

Ähli ulanylýan hemişelik toguň maşynlarynyň sarymlarynyň Y_1 ädimleri (4.45) aňlatma boýunça kesgitlenýär. Ädimiň beýleki ululyklary sarymyň görnüşine baglydyr. Meselem, eger-de ädim $Y_1 = 6$ bolsa, onda seksiyanyň bir tarapy 1-nji elementar pazda, beýleki tarapy bolsa 7-nji pazda ýerleşýär. Hemişelik toguň maşynlarynda elementar pazlaryň sany Z_e , seksiyalaryň S we kollektor-plastinkalaryň K sanlarynyň özaralarynda belli gatnaşyk boýunça baglydyr. Her bir seksiyanyň iki tarapy bolup, elementar pazda iki seksiyanyň taraplary ýerleşýär. Kollektor-plastinkalara iki seksiyanyň taraplarynyň simi birigýär. Onda: $S = Z_e = K$.

Kollektor-plastinkalaryň her birine bir seksiyanyň gutarýan simi we shemadaky indiki seksiyanyň başlanýan tarapy birigýär. Şeýlelikde, y_k kollektor bölekleriň aralygy ýanaşyk seksiyalaryň başlanýan taraplarynyň arasyndaky uzynlyga deňdir. Onda: $Y_k = Y$.

Adaty sarymlar şekillendirilende ýazgyn-shemalary ulanmak kabul edilendir. Ýazgyn shemalara elementar pazlar iki sany liniýa simleri görnüşinde geçirilýär: tutuş çyzyk seksiyanyň ýokary tarapy we aralary kesilen çyzyk – seksiyanyň aşaky tarapy. Shemalary çyzmaklygy ýönekeýleşdirmek üçin seksiya diňe bir sarymdan ybarat diýip kabul edilýär ($\omega = 1$).

Ýönekeý halkaly sarymlar.

Ýakoryň sarymlarynyň saralyşyna ýönekeý halkaly sarymlaryň mysalynda seredeliň. Halkaly sarymlary saramak üçin gapdalynda ýerleşen seksiyalar özara yzygider birikdirilýär (4.49-njy surat).

Goý, elementar pazlarynyň sany $Z_e = 18$, polýuslarynyň sany $2p = 4$ diýip kabul edeliň we halkaly sarymyň ýazgyn-shemasyny guralyň. Sarymyň ädimi:

$$Y_1 = \frac{Z_e}{2p} - \varepsilon = \frac{18}{4} - \frac{2}{4} = 4$$

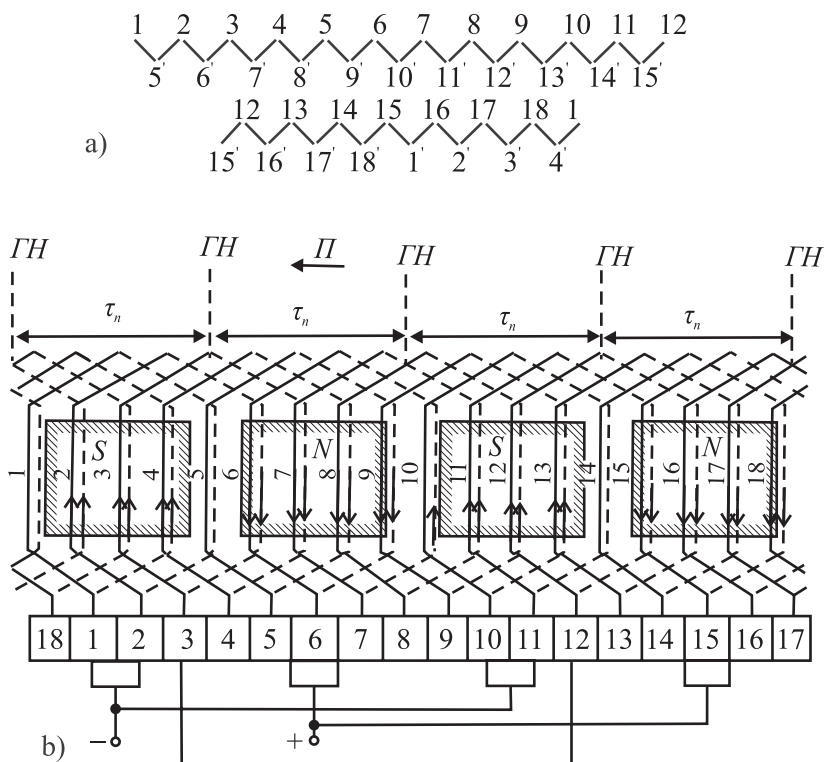
$$Y = 1$$

$$Y_2 = Y_1 - Y = 4 - 1 = 3$$

$$Y_k = 1$$

Tertip boýunça elementar pazlary belgiläliň. Seksiyanyň başlanýan tarapyny pazyň belgisi, aşaky tarapyny bolsa pazyň ştrihli belgisi

bilen belgiläliň. Simleri birikdirmek birinji pazdan başlanýar. Sarymyň simleriniň birikdiriliş yzygiderliligi 4.49-njy suratda görkezilendir.



4.49-njy surat. Ýönekeý halka görnüşli sarymyň ýazgyn shemasy $S = Z_e = K = 18$

Kollektorda çotgalary ýerleşdirmek üçin polýuslaryň sanyny bilmek zerurdyr. Onuň üçin ýazgyn shemada polýuslaryň konturlaryny almak üçin ýakory $2p$ deň bölege bölünýär (seredilýän ýagdaýda 4 sany bölek). Bölekleriň arasyndaky çyzyklar geometriki neýtral hökmünde kabul edilýär. Şeýlelikde, goňşy neýtrallaryň arasyndaky uzynlyk τ_n polýus bölünmesi deň bolýar. Bu bölünişigiň neýtralyndan deň aralykda polýuslar ýerleşdirilýär. Olar, adatça, polýus bölünmesiniň $(0,78 \div 0,85) \tau_n$ bölegini tutýar. Çotgalar neýtrala ýakyn seksiýalara birikdirilip, kollektor-plastinkalara galtaşar ýaly edilip ýerleşdirilýär.

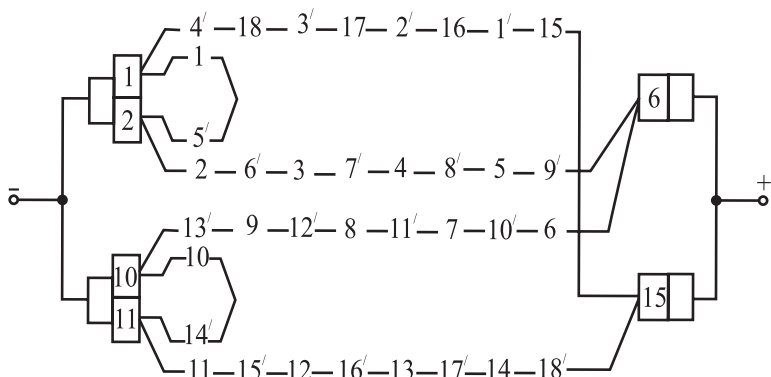
Ýakoryň sarymlarynyň maňlaý tarapyynyň simmetriýaly görnüşinde çotgalar polýuslaryň geometriki oklarynda ýerleşýär. Emma bu ýagdaýda geometriki neýtralda ýerleşdirilen çotgalar neýtrala ýakyn seksiýa galtaşýar diýip düşünilýär. Çotgalaryň sany polýuslaryň sanyna deň edilip alynýar we olar biri-birinden deň aralykda ýerleşdirilýär.

4.50-nji suratdan görnüşi ýaly, käbir çotgalar iki ýanaşyk kollektor-plastinkanyň üstüne düşýär we bu plastinkalaryň birikdirilen seksiýalaryny özara gysga birleşdirýär. Şeýle seksiýalara gysga birleşdirilen ýa-da kommutirlenýän seksiýalar diýilýär.

Ýakor aýlananda onuň simlerinde elektrik hereketlendiriji güýç indussirlenýär. Olaryň ugurlary 4.49-njy suratda görkezilendir. Gysga birleşdirilen seksiýalaryň taraplary neýtrala ýakyn ýerleşendikleri we ol ýerde magnit meýdanynyň induksiýasy takmynan nola ýakyndygy sebäpli bu seksiýalarda elektrik hereketlendiriji güýç ýüze çykmaýar.

4.49-njy suratdan görnüşi ýaly, çotgalaryň arasyndaky elektrik hereketlendiriji güýç olaryň arasyndaky simlerde indussirlenýän elektrik hereketlendiriji güýçleriň jemine deňdir. Çotgalaryň gezekleşip gelýän polýarlygy bardyr. Birmeňzeş polýarlykly çotgalar özara birikdirilýär we olaryň umumy nokatlary sete birikdirilýär.

Ýakoryň sarymy onuň çykyşyna görä birnäçe parallel şahalardan ybaratdyr (4.50-nji surat).

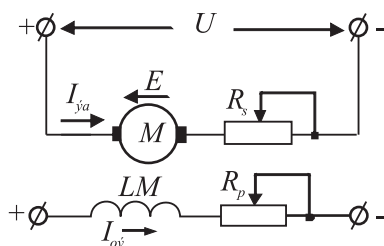


4.50-nji surat.
Sarymyň parallel şahalarynyň shemasy

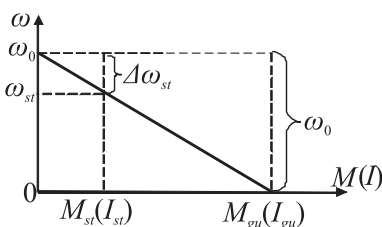
4.5. Hemişelik toguň hereketlendirijilerinde geçiş prosesleri

Hemişelik toguň hereketlendirijilerinde geçiş prosesleri olar işe goýberilende ýa-da saklananda, olaryň tizligi sazlananda hereketlendirijiniň okuna goýan ýük duýdansyz aýrylanda ýa-da aşa ýüklenende, setiň naprýaženiýesiniň birden üýtgemeginde, ýakoryň ýa-da oýandyryjy sarymyň zynjyryndaky garşylyklaryň üýtgemeginde ýüze çykýar.

Hemişelik toguň maşynlarynda ýüze çykýan geçiş proseslerine baglanyşyksyz oýandyrylýan hemişelik toguň hereketlendirijisiniň mysalynda seredeliň. Baglanyşyksyz oýandyrylýan hemişelik toguň hereketlendirijisi hemişelik naprýaženiýeli sete birikdirilen pursatyndan tä özüniň esasy burç tizligini alyança gerek bolan wagt aralygynda ýüze çykýan geçiş prosesini derňemek üçin 4.51-nji suratda görkezilen elektrik shemadan peýdalanalyň.



4.51-nji surat. Baglanyşyksyz oýandyrylýan hereketlendirijiniň elektrik shemasy



4.52-nji surat. Baglanyşyksyz oýandyrylýan hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamasy

Shemada R_s rezistoryň, ýakora yzygider birikdirilendigi sebäpli, ýakoryň zynjyrynyň umumy garşylygy $R = R_{ýa} + R_s$. Işe goýberiliş prosesi derňelende hereketlendirijiniň Φ magnit akymy, setiň U naprýaženiýesi we M_{st} ýüklenme momenti ululyklary boýunça hemişeliklik, ýakoryň induktiwlige $L_{ýa} = 0$ diýip kabul edilýär. Hereketlendiriji işe goýberilende ulgamyň elektrik we mehaniki ýagdaýlarynyň deňlemeleri aşakdaky görnüşde berilýär:

$$U = c\omega + R \cdot i; \quad (4.46)$$

$$M = c \cdot i = J \frac{d\omega}{dt} + M_{st}. \quad (4.47)$$

Eger-de (4.47) deňlemenden i togy kesgitläp we ony (4.46) deňlemede goýup, soňra onuň sag we çep taraplaryny c ululyga bölüp alarys:

$$\frac{U}{c} = \omega + \frac{JR}{c^2} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_{st}R}{c^2}$$

ýa-da

$$\omega_0 = \omega + T_M \frac{d\omega}{dt} + \Delta\omega_{st}. \quad (4.48)$$

Bu ýerde $\omega_0 = U/c$ – hereketlendirijiniň ideal burç tizligi; $\Delta\omega_{st} = \frac{M_{st}R}{c^2}$ – burç tizligiň üýtgemesi (4.52-nji surat); $T_M = \frac{JR}{c^2} = \frac{J\omega_0}{M_{g.u}}$ – elektromehaniki wagt hemişeligi, $M_{g.u}$ – gysga utgaşma momenti.

Elektromehaniki wagt hemişeligi $M_{g.u}$ momente baglydyr. Ýakoryň zynjyrynyň garşylygynyň ulalmagy bilen $M_{g.u}$ moment kiçelýär we oňa degişlilikde elektromehaniki wagt hemişeligi hem ulalýar. Elektromehaniki wagt hemişeliginiň ululygy ýüke bagly däldir.

(4.48) deňlemäni başgaça aşakdaky görnüşde ýazyp bileris:

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{T_M} = \frac{(\omega_0 - \Delta\omega_{st})}{T_M}.$$

Bu deňlemäniň çözgüdi aşakdaky görnüşde berilýär:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega_{st} + c \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (4.49)$$

(4.49) deňlemedäki c ululyk geçiş prosesiniň başlangyç şertleri bilen kesgitlenýän integral hemişeligidir.

$t = 0$ ýagdaý üçin başlangyç burç tizligiň $\omega = \omega_{baş}$ bolýandygy sebäpli:

$$c = \omega_{baş} - (\omega_0 - \Delta\omega_{st}) = \omega_{baş} - \omega_{st}.$$

Umumy görnüşde hereketlendirijiniň işe goýberilişine degişli burç tizligiň deňlemesi:

$$\omega = \omega_0 - (\omega_{baş} - \omega_{st}) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (4.50)$$

Bu ýerde ω_{st} hereketlendirijiniň M_{st} ýüklenme momentindäki durnuklaşan burç tizligi (4.52-nji surat).

Dynçlyk ýagdaýyndaky ($\omega_{baş} = 0$) hereketlendiriji ýükli işe goýberilende:

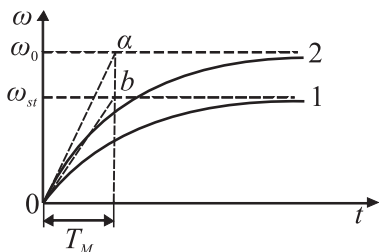
$$\omega = \omega_{st} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right). \quad (4.51)$$

Hereketlendiriji ýüksüz ω_0 durnuklaşan tizlige çenli işe goýberilende:

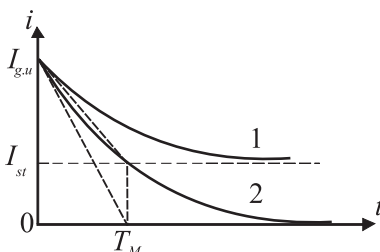
$$\omega = \omega_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right). \quad (4.52)$$

Edil şeýle aňlatmalary burç tizligiň ýerine hereketlendirijiler boýunça ýörite goýberilýän kataloglardaky n aýlaw ýygylgy goýup hem almak mümkindir.

Baglanyşyksyz oýandyrylýan hemişelik toguň hereketlendirijisi üçin $\omega = f(t)$ baglanyşygyň egrileri 4.53-nji suratda görkezilendir.



4.53-nji surat. Baglanyşyksyz oýandyrylýan hereketlendirijiniň bir basgançakly işe goýberilişine degişli $\omega = f(t)$ baglanyşyklar



4.54-nji surat. Baglanyşyksyz oýandyrylýan hemişelik toguň hereketlendirijisiniň bir basgançakly işe goýberilişine degişli $i = f(t)$ baglanyşyklar

4.53-nji suratda 1-nji egri çyzyk hereketlendirijiniň ýükli ýagdaýyna, 2-nji egri çyzyk bolsa onuň ýüksüz ýagdaýyna degişlidir.

(4.51) we (4.52) deňlemelere laýyklykda hereketlendirijiniň işe goýberiliş prosesi teoriýa taýdan tükeniksiz uly wagt dowam edýär. Emma hakykatda işe goýberiliş ýagdaýy $t = (3 \div 4)T_M$ wagtda ta-

mamlanýar diýip kabul edilýär. Sebäbi şol wagtda burç tizlik özüniň durnuklaşan ululygyndan takmynan 2–5%-den köp tapawutlanmaýar.

(4.51) deňlemeden indikiler gelip çykýar:

$$\begin{aligned} t = \infty; & \quad e^{\frac{t}{T_M}} = 0; & \quad \omega = \omega_0 \\ t = 3T_M; & \quad e^{-3} \approx 0,05; & \quad \omega = 0,95 \cdot \omega_0 \\ t = 4T_M; & \quad e^{-4} \approx 0,02; & \quad \omega = 0,98 \cdot \omega_0 \end{aligned}$$

Şeýlelikde, $t = 3T_M$ wagat üçin hereketlendirijiniň burç tizligi durnuklaşan ýagdaýyndan 5%-den köp tapawutlanmaýar. Şol sebäpli burç tizligiň durnuklaşmagy şol wagta çenli tamamlanýar diýip hasap edilýär.

Eger-de hereketlendirijiniň işe goýberilişi $M_{g.u}$ deň bolan hemişelik momentde tükeniksiz ýagdaýda ýerine ýetirilýän bolsa, onda burç tizlik wagta görä Oa göni çyzyk boýunça, ýükli ýagdaýda bolsa Ob göni çyzyk boýunça üýtgär (4.53-nji surat).

Şeýlelikde, koordinatalar başlangyjyndan 2-nji egri çyzyga galtaşýan göni çyzygy geçirip, ony ω_0 nokadyň üstünden geçýän gorizontal çyzyk bilen kesişýänçä dowam edip alnan ω_{oa} kesim kesgitli masştabda $t = T_M$ ululygy kesgitlemäge mümkinçilik berýär. Eger-de şeýle ýol bilen 1-nji egri çyzyga galtaşýan göni çyzyk geçirip alnan ω_{ob} kesim hem T_M -e deň bolar.

(4.47) aňlatmadan ýakoryň zynjyryndaky toguň hereketlendirijiniň işe goýberiliş wagtyna bolan baglanyşygy:

$$i = \frac{J}{c} \cdot \frac{d\omega}{dt} + I_{st}.$$

Bu ýerde $I_{st} = M_{st}/c$ – ýüküň togy.

(4.49) aňlatmadan $\frac{d\omega}{dt} = -\frac{c}{T_M} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}$ kesgitläp we ony toguň deňlemesine goýup alarys:

$$i = \frac{J}{c} \cdot \frac{c}{T_M} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} + I_{st}. \quad (4.53)$$

Başlangyç $t = 0$; $i = I_{baş}$ şertler üçin integral hemişeligi
 $C = -\frac{cT_M}{J}(I_{baş} - I_{st})$ we ony (4.53) aňlatmada goýup alarys:

$$i = I_{st} + (I_{baş} - I_{st}) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (4.54)$$

Umumy ýagdaý üçin toguň başlangyç ululygy $I_{baş} = \frac{U - E}{R}$ görnüşde kesgitlenýär.

Haçan-da hereketlendirijiniň işe goýberilişi onuň dynçlyk ýagdaýynda ýerine ýetirilýän bolsa, onda onuň E elektrik hereketlendiriji güýji nola deňdir ($E = 0$) we $I_{baş} = I_{g,u} = \frac{U}{R}$ bolar.

Bu ýagdaýda ýakoryň togy indiki görnüşde aňladylýar:

$$i = (I_{g,u} - I_{st}) \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} + I_{st}. \quad (4.55)$$

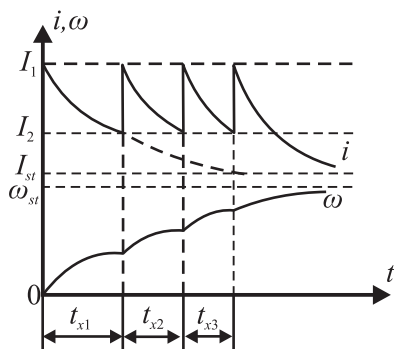
Ýüksüz işe goýberilişde $I_{st} = 0$ we hereketlendirijiniň togy:

$$i = I_{g,u} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}. \quad (4.56)$$

(4.55) we (4.56) aňlatmalar boýunça gurlan $i = f(t)$ baglanyşyklar 4.54-nji suratda görkezilendir.

Seredilen (4.50), (4.51), (4.55) we (4.56) aňlatmalardan şeýle netije çykarmak mümkindir. Eger-de hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamasy gönüçyzykly we ýüklenme momentiň ululygy hemişelik bolsa, onda $\omega = f(t)$ hem-de $i = f(t)$ baglanyşyklar ýönekeý eksponensial görnüşde aňladylýar.

Setiň naprýaženiýesiniň hemişelik ululygynda baglanyşyksyz oýandyrylýan hemişelik toguň hereketlendirijisiniň köp basgançakly işe goýberilişinde, adaty, goýberiliş togunyň ýa-da momentiniň üýt-



4.55-nji surat. Baglanyşyksyz oýandyrylýan hemişelik toguň hereketlendirijisiniň köp basgançakly işe goýberiliş grafikleri

gemeginiň kesgitli çägi berilýär. Bu ýagdaýda goýberiliş wagtyňy kesgitlemek üçin esasy deňleme hökmünde burç tizligiň deňlemesini däl-de, toguň deňlemesini (4.55) peýdalanmak amatlydyr.

Hereketlendirijiniň birnäçe basgançakly işe goýberiliş prosesi 4.55-nji suratda görkezilendir.

4.55-nji suratdan görnüşi ýaly, hereketlendirijiniň işe goýberiliş togy I_1 we I_2 toklaryň çäginde üýtgeýär. İşe goýberilişiň başynda $I_{\text{goý}} = I_1$ we hereketlendirijiniň tizliginiň ýokarlanmagy bilen onuň E elektrik hereketlendiriji güýji ösýär. Netijede, ýakoryň zynjyryndaky tok peselýär we onuň täsiri netijesinde moment hem peselýär. Haçanda, tok I_2 ululyga ýetende goýberiliş rezistoryň bir bölegi gysga utgaşdyrylýar, hereketlendirijiniň togy ýene-de I_1 ululyga çenli ösýär we bu proses birnäçe gezek gaýtalanýar.

Indi hereketlendirijiniň togunyň I_1 -den I_2 -ä çenli üýtgemegi üçin gerek bolan wagty kesgitleliň. Onuň üçin (4.54) deňlemeden peýdalanyň, ony indiki görnüşde ýazarys:

$$I_2 = I_{st} + (I_1 - I_{st}) \cdot e^{-\frac{t_x}{T_{Mx}}}. \quad (4.57)$$

Bu ýerde I_1 we I_2 – goýberiliş toguň üýtgeýiş çäkleridir (4.55-nji surat); t_x – goýberiji rezistoryň seredilýän basgançagynda hereketlendirijiniň batlanma wagty; T_{Mx} – seredilýän basgançak üçin elektromehaniki wagt hemişeligidir.

Rezistoryň her bir basgançagyňyň wagt hemişeligine ýakoryň zynjyrynyň jemleýji garşylygy degişlidir.

(4.57) deňlemäni batlanma wagtyňa görä çözüp alarys:

$$t_x = T_{Mx} \ln \frac{I_1 - I_{st}}{I_2 - I_{st}}. \quad (4.58)$$

Eger-de ýüküň I_{st} togy üýtgemeyän bolsa, onda natural logarifmiň belgisiniň aşagynda hemişelik ululyk durýar we netijede, ony indiki görnüşde ýazyp bileris:

$$t_x = kT_{Mx}. \quad (4.59)$$

Ýakora yzygider birikdirilen rezistoryň garşylyklarynyň basgançaklar boýunça çykarylmagy bilen ýakoryň zynjyrynyň garşylygy azalýar we netijede, elektromehaniki wagt hemişeliginiň ululygy hem

kiçelýär. Ol hem öz gezeginde her basgançagyň batlanma wagtyňyň azalmagyna getirýär ýa-da $t_{x1} > t_{x2} > t_{x3}$ we ş.m.

Ýokarda aýdylanlary hasaba almak bilen (4.50) we (4.54) aňlatmalaryň esasynda gurlan $\omega = f(t)$ hem-de $i = f(t)$ baglanyşyklar 4.55-nji suratda görkezilendir. Soňky basgançakdaky geçiş prosesiniň wagty ($I = I_{st}$ ýa-da $\omega = \omega_{st}$) tükeniksizlige deň bolýar. Iş ýüzünde bu basgançak üçin gerek bolan batlanma wagty öňkülerdäki ýaly $t_x = (3 \div 4) \cdot T_{Mx}$ diýip kabul edilýär.

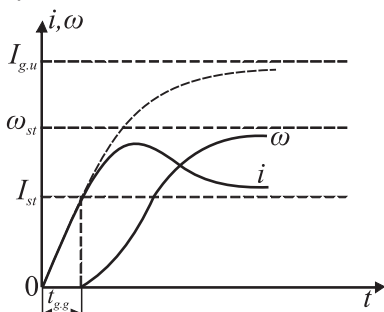
Kähalatlarda, biziň şu wagta çenli hasaba almadyk elektromagnit prosesleriň geçiş wagty elektromehaniki geçiş prosesleriň wagtyna ýakyn bolanda ýakoryň zynjyrynyň elektromagnit inersiýa täsirini hem hasaba almaly bolýar. Hemişelik naprýaženiýede ýakoryň induktiwligini hasaba almak bilen hereketlendirijiniň işe goýberiliş häsiýetnamalary 4.56-njy suratda görkezilendir.

4.56-njy suratdan görnüşi ýaly, hereketlendirijiniň işe goýberilişi iki etapdan ybaratdyr. Ýakoryň togunyň ululygynyň ýakoryň ýerinden gozganmaga ýetmedik ýagdaýyna çenli ýagny hereketlendirijiniň ýakory hereket etmeýän ýagdaýy üçin. Bu etapda hereketlendirijiniň togunyň ösmegi naprýaženiýäniň deňlemesi bilen kesgitlenýän elektromagnit prosesiniň tizligine baglydyr:

$$U = R \cdot i + L_{\dot{y}a} \frac{di}{dt}. \quad (4.60)$$

Ýakoryň induktiwliginiň hemişelik ($L_{\dot{y}a} = \text{const}$) ýagdaýynda (4.60) deňlemäniň çözüüdi hereket etmeýän ýakordaky toguň ululygynyň üýtgemek kanunyňy berýär.

$$i = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_E}} \right) = I_{g.u} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_E}} \right). \quad (4.61)$$



4.56-njy surat. Baglanyşyksyz oýandyrylýan hemişelik toguň hereketlendirijisi ýük astynda bir basgançakly işe goýberilende ýakoryň elektromagnit inersiýasyny hasaba almak arkaly gurlan $\omega = f(t)$ we $i = f(t)$ baglanyşyklar

Bu ýerde $I_{g,u} = U/R$ – hereketlendirijiniň gysga utgaşma togy; $T_E = L/R$ – ýakoryň zynjyrynyň elektromagnit wagt hemişeligi we ol elektromagnit prosesiniň geçiş wagtyny kesgitleýär.

4.56-njy suratda (4.61) aňlatma boýunça gurlan egrileriň t_E wagta degişli bölegi tutuş çyzyk bilen, onuň çäginde daşyndakylar bolsa aralary kesilen çyzyklar bilen görkezilendir. $t_{g,g}$ wagta gijä galmak wagty diýilýär we ol (4.61) aňlatmada $i = I_{st}$ ululygy goýup kesgitlenýär:

$$t_{g,g} = T_E \ln \frac{I_{g,u}}{I_{g,u} - I_{st}}. \quad (4.62)$$

Hakykatda, $t_{g,g}$ gijä galmak wagtyň ululygy (4.62) aňlatma boýunça hasaplanandan biraz uludyr. Bu tapawut hereketlendirijiniň magnitgeçiriji böleklerinde emele gelýän köwlenme toklaryň tormozlaýjy täsirleri bilen düşündirilýär. $t_{g,g}$ wagtyň tamamlanmagy bilen ýakor hereketlenip, hereketlendirijiniň burç tizligi we ýakoryň elektrik hereketlendiriji güýji ýokarlanyp başlaýar.

Elektrik hereketlendiriji güýjüň ýokarlanmagy hem öz gezeginde ýakoryň toguna täsir edip başlaýar. Ondan soňra elektromagnit we elektromehaniki prosesler bilelikde geçip başlaýar hem-de hereketlendirijiniň işe goýberilişiniň ýeke-täk prosesini düzýärler. Ýakoryň toguny we hereketlendirijiniň burç tizligini $\Phi = \text{const}$ ýagdaýda hasaplamak üçin indiki deňlemelerden ugur alynýar:

$$U = i \cdot R + L_{\dot{y}a} \frac{di}{dt} + e = i \cdot R + L_{\dot{y}a} \frac{di}{dt} + c\omega \quad (4.63)$$

we

$$M = M_{st} + J \frac{d\omega}{dt}.$$

Soňky deňlemäniň iki tarapyny hem c ululyga bölüp alarys:

$$i = I_{st} + \frac{J}{c} \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (4.64)$$

(4.63) we (4.64) deňlemeleriň ω burç tizlige görä bilelikdäki çözgüdi ikinji tertipli göni çyzykly differensial deňlemä getirýär:

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{T_E} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega - \omega_{st}}{T_E \cdot T_M} = 0. \quad (4.65)$$

Bu deňlemede ω – ýüküň M_{st} momentine degişli durnuklaşan burç tizligidir.

(4.65) differensial deňlemäniň çözgüdi indiki görnüşde bolýar:

$$\omega = A \cdot e^{\alpha_1 t} + B \cdot e^{\alpha_2 t} + \omega_{st}. \quad (4.66)$$

Bu ýerde α_1 we α_2 – häsiýetlendiriji deňlemeleriň kökleridir:

$$\alpha^2 + \frac{1}{T_E \alpha} + \frac{1}{T_E T_M} = 0; \quad \alpha_{1,2} = -\frac{1}{2T_E} \left(1 \pm \sqrt{1 - 4T_E/T_M} \right).$$

A we B – başlangyç şertler bilen kesgitlenýän integral hemişelikleridir.

Şeýlelikde, tok üçin deňleme:

$$i = \left(A\alpha_1 e^{\alpha_1 t} + B\alpha_2 e^{\alpha_2 t} \right) \frac{J}{c} + I_{st}. \quad (4.67)$$

$T_M > 4T_E$ şertde deňlemäniň α_1 we α_2 kökleriniň otrisatel hakyky ululyklary bardyr. Burç tizligiň we toguň aňlatmalary integral hemişelikleri hasaba alnanda indiki görnüşde ýazarys:

$$\omega = \omega_{st} \left(1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} e^{\alpha_1 t} - \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} e^{\alpha_2 t} \right); \quad (4.68)$$

$$i = \frac{I_{g.u} - I_{st}}{\sqrt{1 - 4T_E/T_M}} \left(\alpha_1 e^{\alpha_1 t} + \alpha_2 e^{\alpha_2 t} \right) + I_{st}. \quad (4.69)$$

(4.68) we (4.69) aňlatmalar boýunça alnan burç tizligiň we toguň wagta görä üýtgeýiş grafikleri 4.56-njy suratda görkezilendir. Hereketlendirijiniň burç tizligi asimptotiki ω_{st} -a ymtylýar, togy bolsa maksimuma ýetip, soňra peselýär we asimptotiki I_{st} ululyga ýakynlaşýar:

$$I_{\max} = -\frac{I_{g.u} - I_{st}}{\alpha_2 T_E} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}} + 1. \quad (4.70)$$

Hereketlendiriji gönümel işe goýberilen ýagdaýynda ýakoryň induktiwligi toguň maksimal ululygyny çäklendirýär we goýberiliş wagtyny uzaldýar. (4.70) deňlemeden görnüşi ýaly, toguň maksimumy

T_E we T_M wagt hemişelikleriň gatnaşygyna baglydyr. Bu wagt hemişelikleriň hakyky gatnaşygyna hereketlendiriji gönümel işe goýberilende toguň çäklendirilişi örän az bolup, onuň maksimumy kommutasiýanyň şerti boýunça rugsat berilýän ululykdan has ýokarydyr. Şol sebäpli kuwwaty $0,5 \div 1$ kW-dan ýokary bolan hereketlendirijilerde goşmaça rezistory ulanmazdan gönümel işe goýberiliş rugsat berilmeyär.

Toguň ululygyny çäklendirmek üçin ýakoryň zynjyryna goşmaça işe goýberiji rezistor birikdirilýär. Şonda T_E kiçelýär, T_M bolsa ulalyp $T_E \ll T_M$ ýagdaýa gelýär.

Eger-de $T_E \ll T_M$ bolsa, onda takmynan indikileri kabul etmek bolar:

$$\alpha_1 \approx -\frac{1}{T_M}; \text{ we } \alpha_2 \approx -\frac{1}{T_E}. \quad (4.71)$$

Onda $I_{st} = 0$ ýagdaýda burç tizligi we togy kesgitlemek üçin has ýönekeý aňlatmalary alarys:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{T_M \cdot e^{-\frac{t}{T_M}} - T_E \cdot e^{-\frac{t}{T_E}}}{T_M - T_E} \right) \approx \omega_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right); \quad (4.72)$$

$$i = \frac{I_{g.u} \cdot T_M}{T_M - T_E} \left(e^{-\frac{t}{T_M}} - e^{-\frac{t}{T_E}} \right) \approx I_{g.u} \cdot e^{-\frac{t}{T_M}}; \quad (4.73)$$

$$I_{\max} = I_{g.u} \left(\frac{T_E}{T_M} \right) \cdot \frac{T_E}{T_M - T_E} \approx I_{g.u}. \quad (4.74)$$

(4.72), (4.73) we (4.74) aňlatmalardan görnüşi ýaly, $T_E \ll T_M$ (goşmaça rezistoryň uly garşylygynda) ýakoryň induktiwligi geçiş prosesine hakykatda täsir etmeyär diýen ýalydyr.

Gönümel işe goýberilişde maksimal togy ýakoryň zynjyryna reaktor (induktiwlik) birikdirmek arkaly çäklendirmek mümkindir. Emma $4T_E > T_M$ ýagdaýda hereketlendirijiniň batlanma prosesinde islenilmeyän yrgyldyly häsiýet ýüze çykýar.

$T_M < 4T_E$ ýagdaýda α_1 we α_2 kökler kompleks sanlardyr:

$$\alpha_{1,2} = -\alpha \pm j\Omega,$$

$$\text{bu ýerde } \alpha = \frac{1}{2T_E}; \quad \Omega = \frac{1}{2T_E} \sqrt{4 \frac{T_E}{T_M} - 1}.$$

Seredilýän ýagdaýda burç tizlik:

$$\omega = \omega_{st} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - T_M/4T_E}} \cdot e^{-\alpha t} \sin(\Omega t + \psi) \right]. \quad (4.75)$$

Bu ýerde $\psi = \arctg \sqrt{4T_E/T_M - 1}$.

Tok üçin:

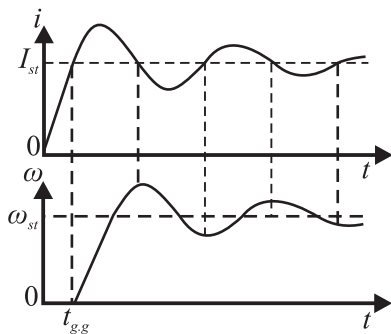
$$i = \frac{2 \cdot (I_{g,u} - I_{st})}{\sqrt{4T_E/T_M - 1}} \cdot e^{\alpha t} \sin(\Omega t) + I_{st}. \quad (4.76)$$

(4.75) we (4.76) aňlatmalardan görnüşi ýaly, burç tizligiň hem-de toguň üýtgeýşiniň sönýän yrgyldyly häsiýeti bardyr (4.57-nji surat).

4.57-nji suratdan görnüşi ýaly, bu prosesin yrgyldyly häsiýetiniň bardygy sebäpli, işe goýberiliş wagty has ulalýar we burç tizligi täzeden has uly sazlamak zerurlygy ýüze çykýar (durnuklaşan ululygyndan ýokarlanmagy) hem-de toguň maksimumyny çäklendirmegiň effektiwligi peselýär.

Ýagny $T_E = T_M/4$ araçäk ululygy üçin boş işe goýberilende $I_{\max} \approx 0,73 \cdot I_{g,u}$; $T_E = 1,25 \cdot T_M$ toguň maksimuly $I_{\max} \approx 0,52 \cdot I_{g,u}$ adatyça, toguň kommutasiýasynyň şerti boýunça rugsat berilýän ululygyndan has ýokarlanýar. Şol sebäpli induktiw sarymly (reaktorly) işe goýberiliş önümçilikde ulanylmaýar, onuň ýerine goýberiji rezistorlar peýdalanylýar.

Ýokarda görkezilişi ýaly, işe goýberiliş prosesinde goýberiji rezistorlar ýakoryň induktiwligine örän az täsir edýär.



4.57-nji surat. Baglanyşyksyz oýandyrylýan hemişelik toguň hereketlendirijisiniň ýakorynyň zynjyryna goşmaça induktiwlik birikdirilip işe goýberilende toguň we burç tizligiň wagta görä üýtgeýiş grafikleri

4.6. Hemişelik toguň maşynlary barada gysgaça taryhy maglumatlar

Hemişelik toguň hereketlendirijisini döretmegiň prinsipial mümkinçiligi 1821-nji ýylda M. Faradeý tarapyndan aýdylypdyr. Ol hemişelik magnitiň daşyndan hemişelik tokly simiň aýlanýandygyny tejribede görüpdir.

Soňky ýyllarda elektrik energiýanyň mehaniki energiýa öwrülişini görkezýän dürli görnüşli abzallar ýüze çykypdyr. Meselem: P.Barlouyň 1824-nji ýylda çap edilen kitabynda magnit meýdanynda ýerleşdirilen mis diskden hemişelik tok geçende onuň herekete gelýändigini aýdylyr. 1833-nji ýylda inlis alymy U. Riççi öz ylmy işinde dürli polýusly tok kommutatorly hereketlendirijiniň demonstrasion modeliniň işleýiş prinsipini beýan edipdir.

Bu hereketlendirijide oýandyryjy meýdanal şekilli magnit tarapyndan döredilip, onuň polýuslarynyň arasynda ýerleşdirilen elektromagnit hemişelik toguň çeşmesinden kommutatoryň üsti arkaly iýmitlenipdir. Hereketlendirijide elmydama bir tarapa ugrukdyrylan aýlaýjy momenti, hemişelik magnit bilen sarymynyň togunyň ugry periodiki üýtgedilip durýan elektromagnitiň özara täsiri netijesinde alnypdyr.

1834-nji ýylda peterburgly alym akademik B.S.Ýakobi tarapyndan taýýarlanan elektromagnit oýandyryjyly hemişelik toguň hereketlendirijisi dürli mehanizmleri herekete getirmek üçin ulanylyp başlapdyr. Hereketlendirijisi iýmitlendirmek üçin galwaniki elementlerden düzülen batareýalar peýdalanylýdyr.

1842-nji ýylda B.S.Ýakobi tarapyndan praktiki maksatlar üçin niýetlenen hemişelik toguň magnitoelektrik generatory taýýarlanylýdyr. Hemişelik magnit generatoryň hereket etmeýän bölegi, elektromagnit bolsa onuň hereket edýän bölegi bolupdyr.

1851-nji ýylda Zinsteden tarapyndan generatoryň hemişelik magnitini aýratyn magnitoelektrik generatordan iýmitlenýän elektromagnit bilen çalşyrmagy teklipl edilipdir.

1854-nji ýylda daniýaly alym S.Hiort tarapyndan öz-özünden oýandyrylýan hemişelik toguň generatoryna potent alnypdyr.

1856-njy ýylda wenger fizigi A.Ýedlik generatory öz-özünden oýandyrmak üçin maşynyň magnit geçirijisindäki galyndy magnit akymyny peýdalanmak baradaky pikiri aýdypdyr we 1861-nji ýylda öz-özünden oýandyrylýan generatory gurnapdyr.

1861-nji ýylda W.Simens öz-özünden oýandyrmagyň prinsipi yzygider oýandyrylýan generator üçin ulanypdyr. Bu generator ýşyklandyryjy çyralary iýmitlendirmek üçin önümçilikde köpçülikleýin ulanylypdyr.

1879-njy ýylda W. Simens yzygider oýandyrylýan generatorlary ilkinji elektrik demir ýoluny iýmitlendirmek üçin ulanypdyr.

1880-nji ýylda görnükli amerikan oýlap tapyjysy T.A. Edison generatoryň ýakorynyň magnitgeçirijisini daşy izolirlenen polat plastinkalardan ýygnamaklygy hödürleýdir. Şeýle edilmegi köwlenme toklaryň täsiri netijesinde ýüze çykýan energiýanyň ýitgileriniň örän azalmagyna getiripdir.

1884-nji ýylda kompensasion sarymyň, 1885-nji ýylda goşmaça sarymlaryň ulanylmagy ýakoryň reaksiýasynyň we toguň kommutasiýasynyň täsirleriniň peselmegine getiripdir. Şeýlelikde, XIX asyryň ahylarlaryna çenli şu günki ulanylýan hemişelik toguň maşynlarynyň konstruksiýasy taýýar bolupdyr.

EDEBIÝAT

1. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Türkmenistanyň durmuş-ykdysady ösüşiniň döwlet kadalaşdyrylyşy. I tom. – A.: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2010, 446 s.

2. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Türkmenistanyň durmuş-ykdysady ösüşiniň döwlet kadalaşdyrylyşy. II tom. – A.: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2010, 208 s.

3. Türkmenistanyň Prezidentiniň “Obalaryň, şäherleriň, etrapdaky şäherçeleriň we etrap merkezleriniň ilatynyň durmuş-ýaşayyş şertlerini özgertmek boýunça 2020-nji ýyla çenli döwür üçin” Milli maksatnamasy. – Aşgabat, 2007

4. “Türkmenistany ykdysady, syýasy we medeni taýdan ösdürmegiň 2020-nji ýyla çenli döwür üçin Baş ugry” Milli maksatnamasy. “Türkmenistan” gazetiniň, 2003-nji ýylyň 27-nji awgusty.

5. *Rejepow M.* Transformatorlar we elektrik maşynlar. – Aşgabat, 1992. 111 s.

6. *Rejepow M.* Elektrotehnika. – Aşgabat, 1994. 334 s.

7. *Вольдек А.И., Попов В.В.* Электрические машины. Машины переменного тока. Учебник для вузов. – Санкт-Петербург, Питер, 2008, 350 стр с илл.

8. *Иванов-Смоленский А.В.* Электрические машины. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МЭИ, 2004.

9. *Копылов И.В.* Электрические машины. – М.: “Энергоатомиздат”, 1986.

10. *Копылов И.В.* Проектирование электрических машин. – М.: “Энергия”, 1980.

11. *Крицштейн А.М.* Электрические машины. Учебное пособие для студентов. – Ульяновск: УлГТУ, 2005.

12. *Токарев Б.Ф.* Электрические машины. – М.: “Энергоатомиздат”, 1990. 624 с.

13. *Чиликин М.Г.* Общий курс электропривода. – М.: “Энергоатомиздат”, 1981.
14. *Юферев Ф.М.* Электрические машины автоматических устройств. – М.: “Высшая школа”, 1988.
15. *Москаленко В.В.* Электрический привод. – М.: Издательский центр “Академия”, 2007.
16. *Грищенко А.В.* Электрические машины и преобразователи подвижного состава. – М.: Издательский центр “Академия”, 2005. 320 с.
17. Под редакцией А.И.Бертинова. Специальные электрические машины. – М.: Энергоиздат, 1982, 552 с.
18. *Гольдберг О.Д., Свириденко И.С.* Инженерное проектирование и САПР электрических машин. – М.: Академия, 2008.
19. *Кацман М.М.* Электрические машины. – М.: Академия, 2001.
20. *Иванов А.В., Смоленский //* Электрические машины. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: МЭИ, 2006.
21. *Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф.* Электрические машины. – М.: Академия, 2006.

MAZMUNY

Giriş	7
-------------	---

ENERGIÝANYŇ ELEKTROMECHANIKI ÖZGERDILIŞI WE ELEKTRIK MAŞYNLARYNYŇ NOMINAL ULULYKLARY

Elektrik maşynlarynda energiýanyň elektromehaniki özgerdilişi	11
Elektrik maşynlarynyň nominal kuwwatlary, naprýaženiýeleri we aýlaw ýygyllyklary	14
Elektrik maşynlarynda energiýanyň ýitgileri	15
Elektrik maşynlarynyň peýdaly täsir koeffisiýenti	17
Elektrik maşynlaryň naprýaženiýeleriniň, toklarynyň we kuwwatlarynyň gabara ölçegleri hem-de massalary bilen özara baglanyşyklary	19

I. TRANSFORMATORLAR

1.1. Transformatoryň wezipesi we onuň işleýiş düzgüni	22
1.2. Transformatoryň boş iş düzgüni	28
1.3. Transformatoryň ýükli iş düzgüni	44
1.4. Transformatoryň çalşyрма shemasy	47
1.5. Transformatoryň gysga birikdiriliş tejribesi	51
1.6. Transformatoryň ikinji naprýaženiýesiniň üýtgemegi	56
1.7. Transformatoryň ikinji naprýaženiýesiniň sazlanlyşy	59
1.8. Transformatoryň peýdaly täsir koeffisiýenti	64
1.9. Transformatorlary özara parallel işe goýbermegiň şertleri	66
1.10. Transformatorlaryň elektrik ululyklarynyň we parametrleriniň oňnositel birliklerde aňladylyşy	73
1.11. Üçsarymly transformatorlar we awtotransformatorlar	76
1.12. Üçfazly transformatorlaryň simmetrik däl iş düzgünleriniň hasaplanylşy	82
1.12.1. Ikinji sarymlary neýtral simli “Ýyldyz” görnüşli birikdirilen transformatorlaryň toklarynyň simmetrik däl ýükde hasaplanylşy ...	84

1.12.2. Ikinji sarymlary “Üçburçluk” görnüşli birikdirilen transformatorlaryň toklarynyň simmetrik däl ýükde hasaplanylyşy . . .	87
1.12.3. Transformatoryň birinji sarymlarynyň faza naprýaženiýeleriniň simmetrik däl ýükde hasaplanylyşy	88
1.12.4. Simmetrik däl ýükde transformatoryň ikinji sarymlarynyň naprýaženiýeleriniň hasaplanylyşy	91
1.12.5. Transformatorlaryň ikinji sarymlarynyň nol yzygiderliliginiň garşylygynyň eksperimental kesgitlenilişi	94
1.12.6. Transformatoryň ikinji sarymlarynyň diňe bir fazasyna ýa-da iki fazasynyň arasyna ýük birikdirilende ýüze çykJak toklaryň hasaplanylyşy	95
1.13. Ýörite niýetlenen transformatorlar	100
1.13.1. Ölçeg transformatorlary	100
1.13.2. Üýtgeýän toguň fazalarynyň sanyny özgertmek üçin niýetlenen transformatorlar	104
1.13.3. Üçfazaly toklar ulgamyny altyfazaly toklar ulgamyna öwürmek üçin niýetlenen transformatorlar	105
1.13.4. Üýtgeýän toguň ýygylgyny özgertmek üçin niýetlenen transformatorlar	107
1.14. Transformatorlarda geçiş prosesleri	113
1.15. Transformatorlarda aşa naprýaženiýe	122
1.16. Transformatorlar barada gysgaça taryhy maglumatlar	127

II. ASINHON MAŞYNLAR

2.1. Üçfazaly asinhron elektrik hereketlendirijiler	128
2.1.1. Asinhron hereketlendirijiniň işleýiş düzgüni	128
2.1.2. Asinhron hereketlendirijiniň gurluşy	129
2.1.3. Aýlanýan magnit meýdanyň alnyşy	132
2.1.4. Üýtgeýän toguň maşynlarynyň sarymlarynyň saralyş usullary .	137
2.1.5. Asinhron hereketlendirijiniň boş iş düzgüni	142
2.1.6. İşleýän hereketlendirijide elektromagnit hadysalar	143
2.1.7. Asinhron hereketlendirijiniň çalşyрма shemasy	146
2.1.8. Aýlaýjy moment	150
2.1.9. Hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamasy	151
2.1.10. Asinhron hereketlendirijiniň mehaniki häsiýetnamalaryny onuň pasport ululyklary boýunça gurmak	155
2.1.11. Asinhron hereketlendirijiniň energetiki görkezijileri	158

2.1.12. Asinhron hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny sazlamak hem-de onuň hereketiniň ugruny üýtgetmek (rewersirmek)..	161
2.1.12.1. Asinhron hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny naprýaženiýesini üýtgetmek arkaly sazlamak	161
2.1.12.2. Asinhron hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny polýus jübütleriniň sanyny üýtgetmek arkaly sazlamak	164
2.1.12.3. Asinhron hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny tiristorlar arkaly sazlamak	170
2.1.12.4. Asinhron hereketlendirijiniň aýlaw ýygylgyny rotor zynjyrynyň garşylygyny üýtgetmek arkaly sazlamak	180
2.1.13. Asinhron hereketlendirijileriň işe goýberiliş usullary	181
2.1.14. Üçfazly asinhron hereketlendirijileriň simmetrik däl iş düzgünleriniň hasaplanylyşy	188
2.2. Birfazly asinhron hereketlendirijiler	198
2.2.1. Birfazly asinhron hereketlendirijileri işe goýbermegiň şertleri ..	202
2.2.2. Polýuslary ekranlanan birfazly asinhron hereketlendirijiler ..	209
2.2.3. Üçfazly asinhron hereketlendirijileri birfazly hereketlendiriji hökmünde ulanmak	211
2.3. Ýörite niýetlenen asinhron maşynlar	212
2.3.1. Asinhron ýygylk özgerdijiler	212
2.3.2. Selsinler	213
2.4. Asinhron hereketlendirijilerde geçiş prosesleri	217
2.5. Asinhron maşynlar barada gysgaça taryhy maglumatlar	226

III. SINHRON MAŞYNLAR

3.1. Sinhron generatorlar	228
3.1.1. Sinhron generatorlaryň gurluşy we işleýiş düzgüni.	228
3.1.2. Sinhron generatorlaryň oýandyrylyş shemalary	231
3.1.3. Sinhron generatorýň boş iş düzgüni.	236
3.1.4. Sinhron generatorýň ýükli iş düzgüni. Ýakoryň reaksiýasy ...	237
3.1.5. Sinhron generatorýň diagrammasy	239
3.1.6. Sinhron generatorýň daşky we sazlaýjy häsiýetnamalary	241
3.1.7. Sinhron generatorlaryň özara parallel işe goýberilişi	242
3.1.8. Sinhron generatorýň reaktiw kuwwatynyň sazlanlyşy	244
3.1.9. Sinhron generatorýň aktiw kuwwatynyň sazlanlyşy	246
3.1.10. Sinhron generatorýň energoulgama görä parallel işleýişiniň durnuklylygy	248
3.1.11. Sinhron generatorlaryň simmetrik däl iş düzgünleri	249

3.2. Sinhron hereketlendirijiler	253
3.2.1. Sinhron hereketlendirijiniň işleýiş düzgüni	253
3.2.2. Sinhron hereketlendirijiniň diagrammasy we onuň burç häsiýetnamasy	256
3.2.3. Sinhron hereketlendirijiniň oýandyryjy togunyň onuň iş düzgünine täsiri	258
3.3. Sinhron kompensatorlar	260
3.4. Sinhron hereketlendirijilerde geçiş prosesleri	261
3.5. Sinhron maşynlar barada gysgaça taryhy maglumatlar	264

IV. HEMIŞELIK TOGUŇ MAŞYNLARY

4.1. Hemişelik toguň generatorlary	266
4.1.1. Hemişelik toguň generatorynyň gurluşy we işleýiş düzgüni	266
4.1.2. Generatoryň elektrik hereketlendiriji güýji	269
4.1.3. Hemişelik toguň generatorynyň oýandyrylyş usullary	270
4.1.4. Ýakoryň reaksiýasy	273
4.1.5. Toguň kommutasiýasy	274
4.1.6. Elektromagnit moment.	276
4.1.7. Hemişelik toguň generatorynyň esasy deňlemeleri	277
4.1.8. Hemişelik toguň generatorynyň esasy häsiýetnamalary	279
4.1.9. Hemişelik toguň generatorlaryny özara parallel işe goýbermegiň şertleri	290
4.2. Hemişeleik toguň hereketlendirijileri	292
4.2.1. Hemişelik toguň hereketlendirijisiniň deňlemeleri	292
4.2.2. Hemişelik toguň hereketlendirijisiniň häsiýetnamalary.	295
4.2.3. Hemişelik toguň hereketlendirijileriniň işe goýberilişi	303
4.2.4. Parallel oýandyrylýan hereketlendirijileriň aýlaw ýygylgyny sazlamagyň usullary.	304
4.2.5. Wentelli hereketlendirijiler.	308
4.3. Hemişelik toguň ýörite niýetlenen maşynlary	311
4.4. Hemişelik toguň maşynlarynda ýakoryň sarymlarynyň halkalaýyn saralyşy.	315
4.5. Hemişelik toguň hereketlendirijilerinde geçiş prosesleri	321
4.6. Hemişelik toguň maşynlary barada gysgaça taryhy maglumatlar	332
Edebiýat	334

*Mülkaman Rejepow,
Döwran Hommadow*

ELEKTRIK MAŞYNLARY

Ýokary okuw mekdepleri üçin okuw kitaby

Redaktor	<i>N. Kakalyýewa</i>
Teh. redaktor	<i>T. Aslanowa</i>
Suratçy	<i>Ý. Osmanow</i>
Kompýuter bezegi	<i>Ý. Peskowa</i>
Neşir üçin jogapkär	<i>G. Gurbanow</i>

Ýygnamaga berildi 21.09.2014. Çap etmäge rugsat edildi 08.12.2014.

Ölçeği 60x90 $\frac{1}{16}$. Edebi garnitura.

Şertli çap listi 21,25. Çap listi 21,25.

Hasap-neşir listi 14,769. Neşir № 119. Sargyt № 2193. Sany 700.

Türkmenistanyň Ylymlar akademiýasynyň “Ylym” neşirýaty.

744000. Aşgabat, Türkmenbaşy şaýoly, 18.

“Hatdat” hususy kärhanasy.

74400. Aşgabat, Magtymguly şaýoly, 74.