I БЎЛИМ. ТРАНСФОРМАТОРЛАР

I БОБ. ТРАНСФОРМАТОРЛАРНИНГ ИШЛАТИЛИШИ, ТУЗИЛИШИ ВА ИШЛАШ ПРИНЦИПИ

1. Трансформаторларнинг ишлатилиши

Ҳозирги вақтда халқ хўжалигининг барча соҳаларида турли хил электр машиналари, трансформаторлар ва бошқа электр асбоб-ускуналари ишлатилмоқда. Электр машиналари ва трансформаторлар маълум қувватга мўлжаллаб тайёрланади. Бу қувват машина ишлаганда ундан ажралиб чиқадиган иссиқлик миқдори билан аниқланади. Ҳар бир электр машинаси, трансформатор ёки бошқа электр асбобининг паспортида уларнинг нормал шароитда ишлашини характерловчи катталикларнинг номинал қийматлари, масалан, номинал қуввати, номинал кучланиши, номинал токи ва бошқалар кўрсатилган бўлади.

Амалда ишлатиладиган электр асбоб-ускуналарининг номинал кучланиши 6 В, 12 В, 24 В, 36 В, 127 В, 220 В, 380 В, 660 В, 6 кВ, 10 кВ, 35 кВ, 110 кВ ва бошқаларга тенг бўлиши мумкин. Кўпгина шаҳарларда паст кучланишли электр тармоғининг кучланиши $U = 220$ В га тенг. Баъзан кучланиши 127 В бўлган истеъмолчини кучланиши 220 В бўлган электр тармоғига улаб ишлатиш керак бўлиб қолади. Бундай истеъмолчини 220 В ли электр тармоғига тўғридан-тўғри улаш мумкин эмас; бу ҳолда уни электр тармоғига кучланишни пасайтирувчи трансформатор орқали уланади (1-расм).

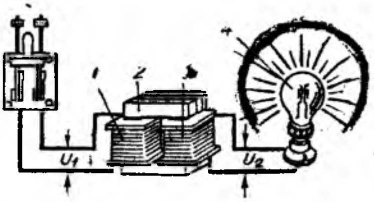
Ўзгарувчан ток кучланишининг қийматини ўзгартириб берувчи статик электромагнит аппарат **т р а н с ф о р м а т о р** дейилади.

Электр тармоқларида электр энергиясини маълум масофага узатишда (кучланишни ошириш учун) ва уни истеъмолчилар орасида тақсимлашда (юқори кучланишни пасайтириш учун) трансформаторлар кенг ишлатилади.

Электр тармоғининг муҳим аппарати ҳисобланган трансформаторни рус электротехниги П. Н. Яблочков 1876 йилда ихтиро қилган. Трансформаторни янада такомиллаштириш устида рус ихтирочиси И. Ф. Усагин ҳам кўпгина тадқиқот ишлари олиб борган.

Электр энергияси турли хил электростанцияларда ишлаб чиқарилади. Одатда, электростанциялар табиий энергетика ресурслари мавжуд бўлган районларда қурилади. Бундай районлар эса кўпинча саноат марказларидан анча узоқда бўлади. Электростанцияларда ишлаб чиқарилган электр энергияси электр узатиш линиялари орқали саноат марказларига, яъни истеъмолчиларга

узатилади. Сўнгги вақтларда электр энергияси узатилиши лозим бўлган масофа ва узатиладиган қувватлар тобора ортиб бормоқда.



1-расм. Трансформаторнинг электр тармоғига уланиши:

1 — бирламчи чулғам, *2* — магнит ўтказгич (пўлат ўзак), *3* — иккиламчи чулғам, *4* — истеъмолчи.

Электр энергияси маълум масофага узатилганда линия симларида содир бўладиган қувват исрофи мумкин қадар кам бўлиши лозим. Шундагина электр узатиш линиясининг фойдали иш коэффициенти катта бўлади, яъни истеъмолчиларга кўпроқ энергия етиб боради. Энергия узатувчи линия симларида қувват исрофи, асосан, улардан ўтувчи ток кучининг квадратига ҳамда линия симларининг актив қаршилигига боғлиқдир. Ток кучи қанча катта бўлса, қувват исрофи шунча катта бўлади. Линияларда ток кучи катта бўлса, бу симларнинг кўндаланг кесим юзаларини катта қилиб олишга тўғри келади. Қувват исрофини камайтириш учун симларнинг актив қаршилигини камайтириш лозим. Маълум узунликдаги симнинг актив қаршилигини, асосан, унинг кўндаланг кесим юзини катталаштириш йўли билан камайтириш мумкин.

Линияларда кўндаланг кесим юзи катта бўлган симларнинг ишлатилиши электр узатувчи линиялар учун сарфланадиган рангли металлар (мис, алюминий ва бошқалар) сарфини кўпайтиради ҳамда симларнинг оғирлигини ошириб юборади. Оғир симларни кўтариб туриш учун бақувват таянчлар ўрнатиш лозим бўлади. Ўз навбатида бундай таянчлар учун кўп металл ва ёғоч материаллар сарфлаш талаб қилинади. Бундай шароитда электр энергиясини маълум масофага узатиш анча қимматга тушади ва баъзан мақсадга мувофиқ бўлмай қолади.

Бу масалани бошқача ҳал қилиш мумкин. Маълумки, электр токининг қуввати, асосан, кучланиш ва ток кучи қийматларининг кўпайтмаси $P = UI$ билан аниқланади. Бу формулага мувофиқ, маълум қувватда кучланиш катта бўлса, ток кучи кичкина бўлади ва аксинча. Маълум қувватни узоқ масофага узатишда кучланиш қиймати неча марта оширилса, симлардан ўтадиган ток кучининг қиймати шунча марта камаяди. Энергия узатишда линия симларида ток кучи кичик бўлса, кучланиш пасайиши ҳам, қувват исрофи ҳам кам бўлади. Бундан ташқари, ток кучи кичкина бўлганда электр узатиш линияларида кўндаланг кесим юзи кичикроқ бўлган симлар ишлатишга имкон яратилади. Натижада линия қуриш учун сарфланадиган рангли металлар ҳамда таянчлар қуриш учун ишлатиладиган металл ва ёғоч материаллар сарфи камаяди. Электр энергиясини узоқ масофага узатиш таннархи арзонлашади. Демак, электр энергиясини узоқ масофага **кучланиш қийматини ошириб узатиш** фойдали экан.

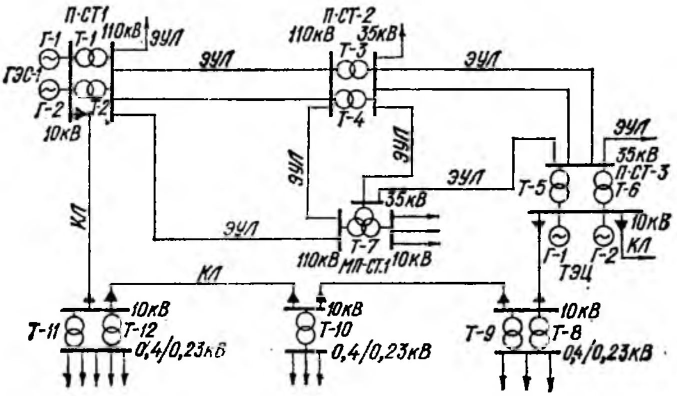
Ўзгарувчан ток кучланиши қийматини трансформаторлар ёрдамида исталганча ошириш ҳам, пасайтириш ҳам мумкин. Энер-

гетика системаларида ва юқори ҳамда паст кучланишли электр тармоқларида кучланиш қийматини ошириб берувчи ёки камайтириб берувчи трансформаторлар кенг ишлатилади.

Ҳозирги вақтда электростанцияларда ишлаб турган ёки янги ўрнатилаётган генераторларнинг номинал кучланиши 6...24 кВ дан ошмайди. Энергияни узоқ масофага, чунончи 10...24 кВ кучланишда, узатиш (юқоридаги мулоҳазалар асосида) мақсадга мувофиқ бўлмайди. Шунинг учун катта қувватларни узоқ масофага узатишда ўта юқори кучланишлардан (масалан, 110 кВ, 220 кВ, 500 кВ, 750 кВ ва ҳоказо) фойдаланилади. Бундай линияларда қувват исрофи анча камаяди, энергия узатиш линиясининг ФИК катта бўлади. Шунинг учун ҳам ҳар бир электр станция қошидаги подстанцияда кучланишни бир неча ўн марта ошириб берадиган куч трансформаторлари ўрнатилади. 2-расмдаги схемада кўрсатилган Т-1, Т-2, Т-5, Т-6 трансформаторлари кучланишни ошириб берадиган трансформаторлардир.

Узатиладиган қувват қанча катта ва масофа қанча узоқ бўлса, электр узатувчи линия кучланиши шунча катта бўлади. Умуман, маълум миқдордаги электр қувватини узоқ масофага узатишда линия кучланишининг қиймати техника-иқтисодий кўрсаткичларни ҳисоблаб чиқиш йўли билан аниқланади.

Масалан, Ўзбекистон энергетика системасида Фарҳод ГЭСи билан Тошкент ва Чирчиқ шаҳарларидаги юқори кучланишли электр тармоқларини бирлаштирувчи линиялар орқали электр энергияси 110 кВ кучланишда узатилмоқда. Куйбишевдаги В. И. Ленин номли ГЭС билан Москва энергетика системасини бирлаштирувчи линиялар орқали энергия 500 кВ кучланишда узатилмоқда. Ҳозирги вақтда мамлакатимизда ўта қувватли электр станциялар қурилмоқда, уларда ишлаб чиқариладиган электр энергиясини жуда узоқ масофаларга (2000 км ва ундан ортиқ) уза-



ЭУЛ-электр узатиш линияси, КЛ-кабель линияси МП-ст-марказий подстанция

2-расм. Энергетика системасининг бир қисми.

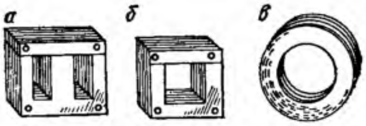
тиш мўлжалланмоқда. Бу ўз навбатида янада юқори кучланишли (масалан, 750 кВ, 1150 кВ) ўзгарувчан ток электр узатиш линиялари қурилишини талаб қилмоқда. Мамлакатимизда кучланиши 750 кВ бўлган магистраль электр узатиш линиялари ишлаб турибди. Эндиликда кучланиши 1150 кВ бўлган электр узатиш линияларини қуриш ўзлаштирилмоқда. Бундай ўта юқори кучланишли линиялар орқали Сибирь, Шимолий Қозоғистон ва Урал энергетика системалари бирлаштирилади. Экибастуз билан Марказий районларни бирлаштирувчи линия электр энергиясини кучланиши 1500 кВ (±750 кВ) бўлган ўзгармас ток билан узатади. Бундай линия орқали 6 млн. кВт қувватни узоқ масофага узатиш кўзда тутилмоқда.

Шаҳар ва қишлоқларда жойлашган саноат ва қишлоқ хўжалик корхоналари орасида ҳам электр энергияси юқори кучланишда (масалан, 6 кВ, 10 кВ ва 35 кВ) ҳаво линиялари ёки кабеллар ёрдамида узатилади. Саноат марказларида узел подстанциялари қурилади. Бу подстанцияларда кучланишни пасайтирувчи к у ч т р а н с ф о р м а т о р л а р и ўрнатилади. Бундан ташқари, саноат корхоналари подстанцияларида ҳам кучланишни пасайтирувчи трансформаторлар ўрнатилади. Бундай подстанцияларда кучланишни 6,10 ва 35 кВ дан 660 В ёки 400/230 В гача бўлган пасайтирувчи трансформаторлар ўрнатилади. 2-расмда кўрсатилган Т-4, Т-3, Т-7 трансформаторлари марказий узел подстанцияларида; Т-8, Т-9, . . .Т-12 трансформаторлари эса корхона подстанцияларида ўрнатилган кучланишни пасайтирувчи трансформаторлардир.

Шундай қилиб, электр энергияси электростанциядан истеъмолчиларга етиб келгунча унинг кучланиши трансформаторлар ёрдамида бир неча марта ўзгартирилар экан. Энергетика системаларида ва электр тармоқларида ўрнатиладиган, кучланишни ошириб ёки пасайтириб берадиган трансформаторлар к у ч т р а н с ф о р м а т о р л а р и дейилади. Куч трансформаторларининг қуввати 50 кВА дан 1000000 кВА гача (стандарт шкала бўйича) бўлиши мумкин.

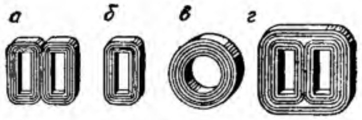
2. Бир фазали ва уч фазали трансформаторларнинг тузилиши

Истеъмолчиларни электр энергияси билан таъминловчи тармоқларда бир фазали ва уч фазали трансформаторлар кенг ишлатилади. Бир фазали трансформатор, асосан, ферромагнит ўзакдан ва унинг стерженларига ўралган иккита ёки ундан ортиқ чулғамдан тузилади. Ферромагнит ўзак трансформаторнинг магнит системаси, яъни магнит ўтказгичи ҳисобланади. Ферромагнит ўзак магнит оқими ўтадиган контурнинг магнит қаршилигини камайтиради ва чулғамларнинг электромагнит боғланишларини кучайтиради. Қуввати унча катта бўлмаган трансформаторларнинг магнит системаси бронли (*а*), стерженли (*б*) ва тороидал (*в*) шаклга эга бўлиши мумкин (3-расм). Амалда юпқа электротехника пўлатидан ишланган лентадан ўраб тайёрланган магнит ўтказ-



3- расм. Бир фазали кичик қувватли трансформаторнинг магнит ўтказгичлари:

а — зирхли, *б* — стерженли, *в* — ҳалқасимон.

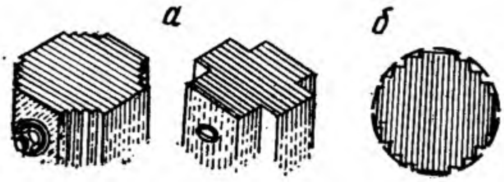


4- расм. Лентасимон пўлатдан ўралган магнит ўтказгичлар:

а — зирхли, *б* — стерженли, *в* — ҳалқасимон, *г* — уч стерженли.

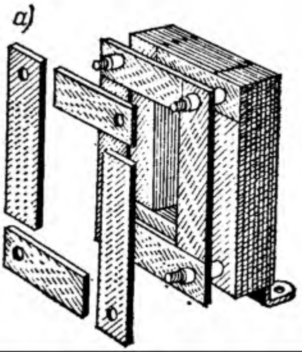
гичлар кенг қўлланилади (4-расм). Трансформаторларнинг пўлат ўзаги юқори легирланган пўлатдан тайёрланади.

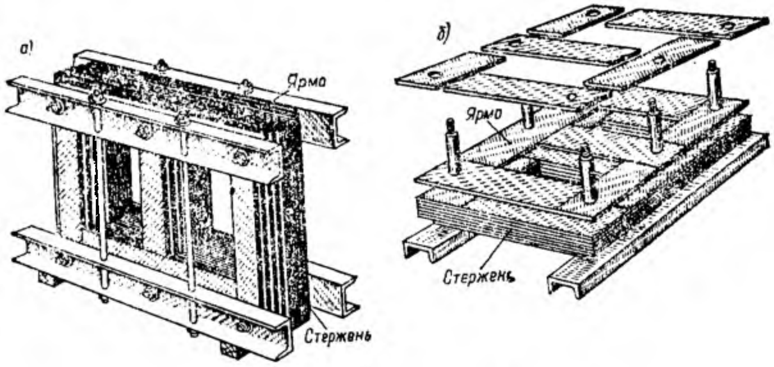
Трансформатор ишлаганда унинг чулғамларидан ўзгарувчан ток ўтади. Бу ток трансформаторнинг магнит ўтказгичида ўзга-[redacted]



5- расм. Ферромагнит ўзак стерженининг кўндаланг кесими:

а — **бурчаклари кесилган тўртбурчак шаклида,** ***б*** — **доира, зинасимон.**

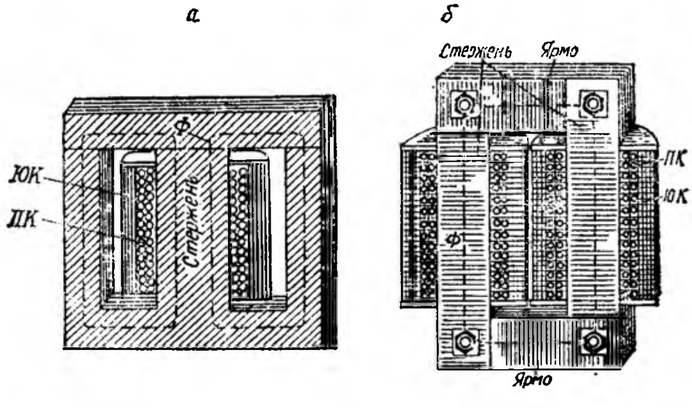




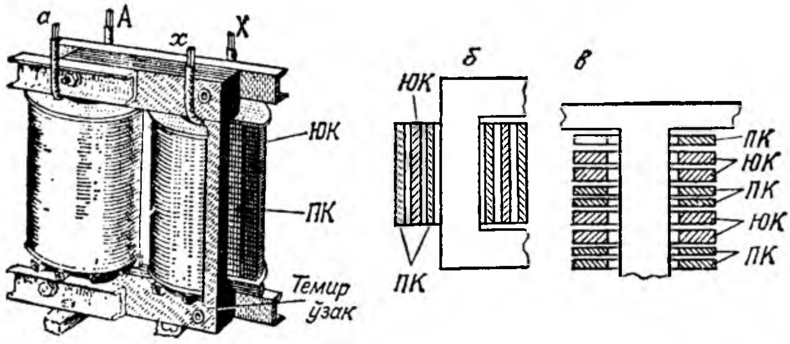
7-расм. *а* — уч стерженли (уч фазали) магнит ўтказгич, *б* — магнит ўтказгични йиғиш.

мида қизиш температурасининг маълум даражада ўзгаришига чидамли бўлиши ва трансформаторнинг доимо яхши ишлашини таъминлаши лозим. Чулғамлар конструкцияси тез совийдиган, ўзгарувчан электр майдонига узоқ вақт чидайдиган ҳамда ишлатиш давомида вужудга келадиган ўткинчи каттароқ кучланишларга қисқа вақт давомида бардош берадиган ва механик жиҳатдан пишиқ бўлиши лозим.

Катта қувватли трансформаторларда баъзан цилиндрик (9-расм, *а*) ёки қўш концентрик чулғам қўлланилади (9-расм, *б*). Бунда паст кучланишли чулғам икки қисмга бўлиниб, улар орасига юқори кучланишли чулғам ўрнатилади. Трансформаторларда паст ва юқори кучланишли чулғамлар галма-гал ўрнатилиши ҳам мумкин. Бунда паст ва юқори кучланишли чулғамларнинг айрим



8-расм. Стерженли (*а*) ва зирхли (*б*) бир фазали трансформаторда паст кучланишли (ПК) ва юқори кучланишли (ЮК) чулғамларнинг жойлашиши.



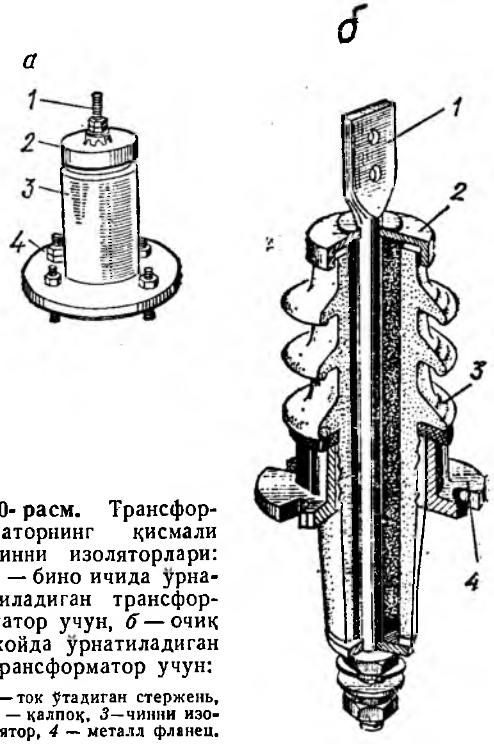
9-расм. Трансформаторнинг паст кучланишли ва юқори кучланишли чулғамларининг жойлашиши.

секциялари алоҳида дисклар шаклида тайёрланади ва улар стерженга галма-ғал ўрнатилади (9-расм, *в*).

Трансформатор чулғамларининг бош ва охирги учлари бак қопқоғида ўрнатилган махсус чинни изоляторлар ичидан ўтказилиб, уларнинг учидаги қисмаларга чиқарилади. Чинни изоляторларнинг ўлчам ва шакллари трансформаторнинг паст ҳамда юқори кучланишлари қийматига боғлиқ бўлади (10-расм, *а* ва *б*).

Трансформаторни ишлатиш учун унинг бирламчи чулғамини энергия манбаига уланади. Трансформаторнинг энергия манбаига ёки электр тармоғига уланадиган чулғами унинг **бирламчи чулғами** дейилади. Бу чулғамнинг бош қисмаси *А* ҳарфи билан, охирги қисмаси *X* ҳарфи билан белгиланади. Истеъмолчига уланадиган чулғам трансформаторнинг **иккиламчи чулғами** дейилади. Иккиламчи чулғамнинг бош қисмаси *а* ҳарфи билан, охирги қисмаси *х* ҳарфи билан белгиланади.

Трансформаторлар кучланиши пасайтиришга ёки оширишга мўлжал-



10-расм. Трансформаторнинг қисмали чинни изоляторлари: *а* — бино ичида ўрнатиладиган трансформатор учун, *б* — очиқ жойда ўрнатиладиган трансформатор учун:

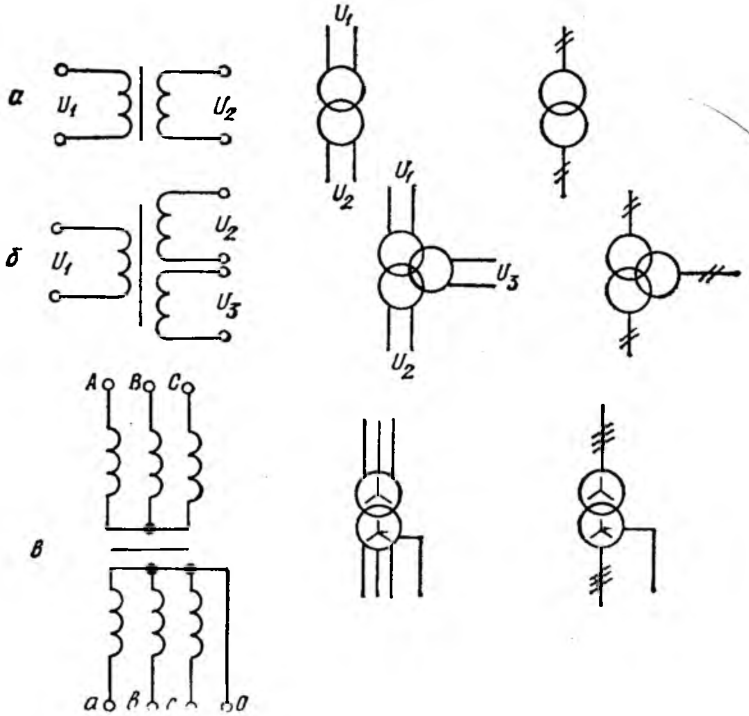
1 — ток ўтадиган стержень, *2* — қалпоқ, *3* — чинни изолятор, *4* — металл фланец.

лаб тайёрланади. Иккиламчи чулғамдан олинадиган кучланиш унинг бирламчи чулғамига берилаётган кучланишдан кичик бўлса, кучланишни пасайтирувчи трансформатор ва аксинча, иккиламчи чулғамнинг кучланиши бирламчи чулғамга берилаётган кучланишдан катта бўлса, кучланишни оширувчи трансформатор дейилади.

Трансформаторнинг чулғамлари иккита бўлса, икки чулғамли (паст ва юқори кучланишли); учта ва ундан ортиқ бўлса, уч чулғамли (юқори, ўртача ва паст кучланишли) ва мос ҳолда кўп чулғамли трансформатор дейилади. Уч фазали трансформаторлар ҳам икки ёки уч чулғамли бўлиши мумкин. Радиотехникада ва автоматикада ишлатиладиган кичик қувватли трансформаторлар кўп чулғамли бўлади.

Трансформаторлар электр схемаларда 11-расмда тасвирланган шартли белгилар билан кўрсатилади.

Чулғамлар изоляциясини мустаҳкамлаш мақсадида улар орасига қоғоз-бакелит цилиндрлар ўрнатилади. Турли фазалардаги юқори кучланиш чулғамлари орасига ҳам изоляцион тўсиқлар қўйилади. Чулғамларни ярмодан изоляциялашда изоляцион материал-картон шайба ва қистирмалардан фойдаланилади.



11-расм. Бир фазали икки чулғамли (*а*), бир фазали уч чулғамли (*б*) ва уч фазали трансформаторнинг (*в*) принципиал схемаси ва шартли белгилари.

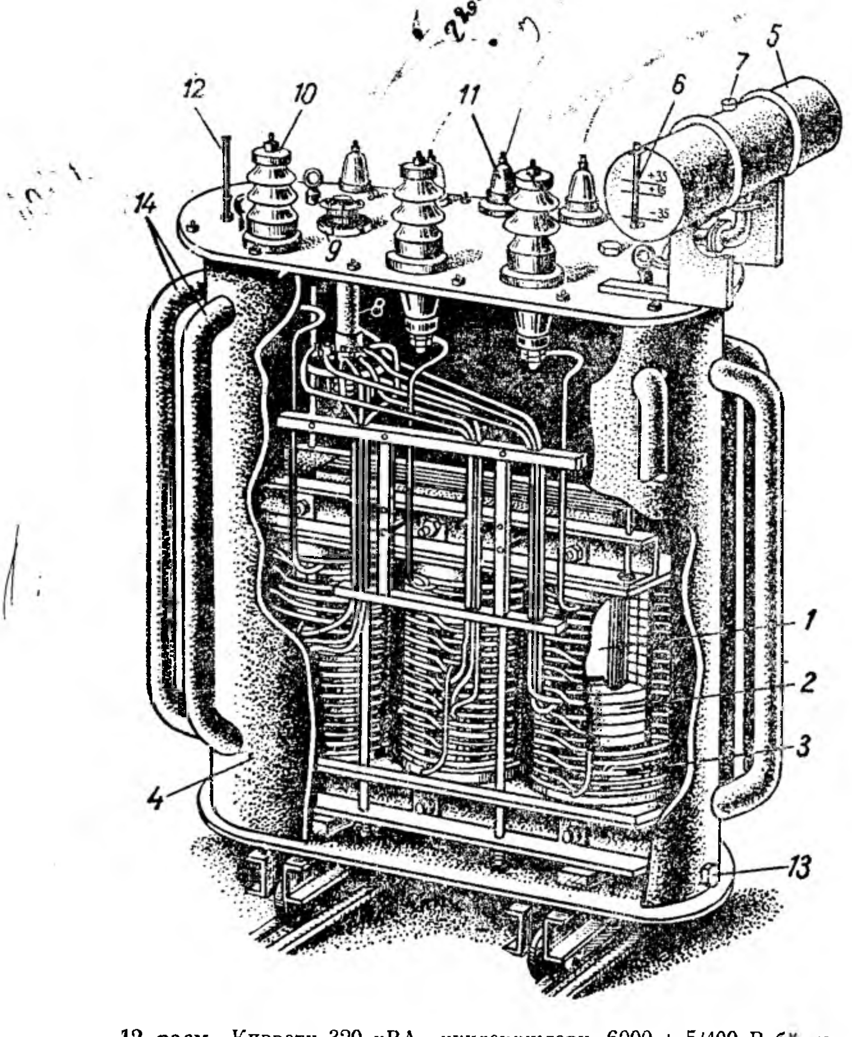
Трансформатор ишлатилганда у доим қизийди. Ишлаш давомида муҳит температураси + 35°С бўлганда трансформатор чулғамларининг температураси 70°С дан; ферромагнит ўзакники 75°С дан; мойнинг устки қатламида 60°С дан ортиб кетмаслиги лозим.

Амалда совитиш усулига қараб қуруқ (С маркали), мойли (М маркали) ва ёнмайдиган суюқ диэлектрик билан тўлдирилган куч трансформаторлари кенг ишлатилади. Қуруқ трансформаторлар бино ичида, цехларда ўрнатилади, улар ишлатишда қулай. Ҳавонинг электр мустаҳкамлиги трансформаторларга қуйиладиган махсус мойнинг электр мустаҳкамлигидан пастроқ бўлганлиги учун қуруқ трансформаторларда изоляцион бўшлиқлар ва вентиляцион каналлар каттароқ қилинади. Қуруқ трансформаторларнинг қуввати 1600 . ..2500 кВА, юқори кучланиши 15 . .. 20 кВ гача бўлиши мумкин.

Мойли трансформаторларда ферромагнит ўзакни чулғамлар билан бирга махсус минерал мой—трансформатор мойи билан тўлдирилган металл бакка жойлаштирилади. Мойнинг иссиқлик ўтказиш хусусияти ҳавоникига нисбатан юқорироқ бўлгани учун чулғамлар ва ўзак қизиганда мой иссиқликни ташқарига узатувчи муҳит вазифасини бажаради. Трансформатор мойи чулғамлар изоляциясининг мустаҳкамлигини оширади, атмосфера таъсирида намланишдан ҳамда изоляция материалларини бузилишдан сақлайди. Трансформаторларда электр мустаҳкамлиги 70...120 кВ/см бўлган махсус тайёрланган минерал мой ишлатилади. Кичик қувватли (30 кВА гача) куч трансформаторлари бакининг деворлари текис бўлади. Каттароқ қувватли (1800 кВА гача) трансформаторларда совитиш юзасини катталаштириш мақсадида бак девори қобирғасимон қилиб тайёрланади, бу мақсадда бак деворларига махсус трубалар пайвандланади. Қуввати 1800. . . 10000 кВА гача бўлган трансформаторларда бакнинг ташқи томонида трубали радиаторлар ўрнатилади. Чулғамлар ва ферромагнит ўзакка тегиб турган мой қизийди ва юқорига табиий равишда кўтарилади, унинг ўрнига ўзакдан узоқда турган совуқ мой келади. Шу асосда радиатор трубаларида мойнинг табиий ҳаракати вужудга келади. Қуввати 10000...63000 кВА бўлган трансформаторларда радиатор трубалари ташқи томондан махсус вентиляторлар билан совитиб турилади. Янада катта қувватли трансформаторларда мой насос ёрдамида махсус совитувчи қурилмалардан ўтказилади ва мойнинг мажбурий ҳаракати таъминланади. Ёнмайдиган суюқ диэлектрик билан тўлдирилган трансформаторлар ёнғиндан хавфсиздир. Уларда синтетик изоляцион материал — совтол ва у билан бирга қўшимча аралашма ишлатилади. Совтол полихлордифенил билан трихлорбензолнинг аралашмасидан иборат модда, қўшимча аралашма ёпишқоқликни ҳамда қотиш температурасини пасайтириш учун қўшилади. Бу моддаларнинг нисбати мос ҳолда нормал иқлим учун 65% ва 35%; тропик иқлим учун 90% ва 10% ни ташкил қилади. Лекин совтол трансформатор мойидан қимматроқ, зарарли таъсири ҳам

бор. Бундай трансформаторларнинг қуввати 160. . .2500 кВА гача, юқори кучланиши эса 6...10 кВ бўлиши мумкин.

Трансформатор мойи изоляциясининг хусусиятига намлик жуда ёмон таъсир қилади. Ҳатто ҳаводаги намлик ҳам мойнинг электр мустаҳкамлигини пасайтириб юборади. Бундан ташқари, бакдаги мой ёзда иссиқдан кенгаяди, қишда эса совуқдан тораяди. Ҳавонинг трансформатор мойига зарарли таъсирини камайтириш ҳам-



12- расм. Қуввати 320 кВА, кучланишлари 6000 ± 5/400 В бўлган ТМ-320/6 маркали (уч фазали) трансформатор:

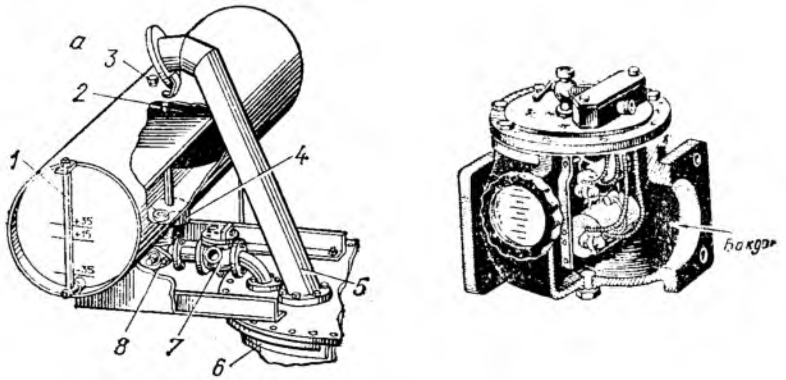
1 — пўлат ўзак, *2* — паст кучланиш чулғами, *3* — юқори кучланиш чулғами, *4* — бак, *5* — кенғайтирувчи бак, *6* — мой сатҳини кўрсатувчи шиша найча, *7* — мой қуйиладиган тешик, *8* — ўрамлар сонини ўзгартирувчи қурилма, *9* — қурилма дастаси, *10* — юқори кучланиш чулғами қисмаси, *11* — паст кучланиш чулғами қисмаси, *12* — термометр, *13* — мой чиқариладиган тешик, *14* — радиатор трубалари.

да бак ҳажмини кенгайтириш мақсадида қуввати 25 кВА ва ундан ортиқ бўлган трансформаторлар қопқоғи устига махсус **кенгайтирувчи бак** ўрнатилади (12-расм).

Кенгайтирувчи бак асосий бак билан труба орқали туташтирилади. Одатда, трансформатор мойи кенгайтирувчи бакнинг ярмигача тўлдирилади, бунда мойнинг ҳаво билан туташадиган юзаси анча камаяди. Мойда ҳавонинг зарарли таъсири ҳам, мойнинг ифлосланиши ҳам камаяди. Мойнинг ҳаво таъсирида таркибий қисмларга ажралиши (оксидланиши) натижасида ҳосил бўладиган чўкиндилар кенгайтирувчи бак тагига чўкади. Кенгайтирувчи бакнинг ҳаво билан туташадиган жойига, бирор идишда, ҳавонинг намлигини ўзида олиб қолувчи модда—сорбент қўйилади. Қуввати 160 кВА ва ундан ортиқ бўлган трансформаторларда мойни тозалаб туриш учун **термосифон фильтр** ўрнатилади. Бу тадбирлар натижасида трансформатор мойининг электр мустаҳкамлиги узоқ вақт яхши сақланади. Жуда катта қувватли трансформаторларда мойнинг хусусиятини янада узоқ вақт яхши сақлаш мақсадида кенгайтирувчи бак герметик беркитилган бўлади. Вақт-вақти билан трансформатор мойи тозаланиб ва алмаштирилиб турилади. Кенгайтирувчи бакнинг ён томонига ундаги мойнинг сатҳини кўрсатувчи шиша найча ўрнатилади.

Катта қувватли (1000 кВА ва ундан ортиқ) трансформаторлар бакининг уст томонида бир учи асосий бак билан туташган, иккинчи учи қайрилган ва ойнаванд (мембранали) труба ўрнатилади. Ишлаб турган трансформаторнинг ўрамлари ёки чулғамлари қисқа туташиб қолганда ёки нагрузкаси ҳаддан ташқари кўпайиб кетганда у тезда қизиб кетади, мой парчаланади, кўп миқдорда газ ажралади. Бак ичида босим ортиб кетади. Бундай шароитда труба учидаги ойна синиб кетади ва газ ташқарига чиқади. Бундай эҳтиёт трубаси бўлмаган трансформатор баки деформацияланади ёки бутунлай ишдан чиқади. Асосий бакнинг ён томонида мойнинг температурасини кўрсатиб турувчи махсус симобли термометр; катта қувватли ва герметик трансформаторларда термосигнализаторлар ўрнатилади.

Қуввати 1000 кВА ва ундан ортиқ бўлган трансформаторларда уни ички бузилишлардан сақлайдиган махсус сақлагич асбоб—**газ релеси** бўлиб, у асосий бакни кенгайтирувчи бак билан туташтирувчи трубага ўрнатилади (13-расм). Трансформатор чулғамлари ёки чулғам ўрамлари қисқа туташганда ва умуман бакда мойнинг парчаланишидан хавфли портловчи газ кўп ажралиб чиққан пайтда мой асосий бакдан кенгайтирувчи бак томон оқади ва газ релесининг контактлари беркилади ҳамда сигнал берилади ёки трансформаторни автоматик тарзда тармоқдан узиб қўяди. Газ релесида мой устида қалқиб турадиган иккита қалқовуч (баллон) бўлиб, қалқовучларнинг ён томонида нормал шароитда доимо очиқ ҳолда турадиган симоб контактлар бўлади, улар шиша идишга ўрнатилади. Қалқовучлар устма-уст ўрнатилади. Уларнинг вазияти мой ҳаракатининг тезлигига қараб ўзгаради. Бирор сабабга кўра асосий бакдан газ ажралиб чиқа



13-расм. Кенгайтирувчи бак (*а*) ва газ релеси (*б*):

1 — мой сатҳини кўрсатувчи шиша найча, *2* — ҳаво алмаштирувчи труба, *3* — мой қуйиладиган пробкали тешик, *4* — чўкиндилар чўкадиган идиш, *5* — учи ойнаванд труба, *6* — трансформатор баки, *7* — газ релеси, *8* — кенгайтиргични ажратувчи жўмрак.

бошласа, мой асосий бакдан кенгайтирувчи бак томон секин ҳаракатланади ва биринчи қалқовучнинг вазияти ўзгаради, симоб контактлари беркилади ва огоҳлантирувчи сигнал бериш курилмаси ишга тушиб, трансформатор нонормал режимда ишлаётганлиги ҳақида хабар беради. Агар трансформаторда хавфли бузилиш бўлса, газ ажралиши тезлашади, трубада мойнинг ҳаракат тезлиги ҳам ортади. Бунда иккинчи қалқовучнинг вазияти ўзгаради, унинг симоб контактлари беркилади. Бу контакт трансформаторни тармоқдан узиб қўйишга импульс беради ва уни хавфли ички бузилишлардан сақлайди.

Ҳар бир трансформаторнинг баки деворида ўрнатилган темир тахтачада унинг техник таърифи ёзилган бўлади. ГОСТ 11677—74 бўйича тахтачада қуйидагилар кўрсатилади:

1) трансформаторнинг маркаси, номери ва ишлаб чиқарган заводнинг номи ҳамда адреси; 2) номинал қуввати (кВА да); 3) юқори ва паст номинал кучланиши (В ёки кВ да); 4) юқори ва паст кучланишли чулғамларининг номинал токи (А да); 5) ўзгарувчан ток частотаси; 6) фазалар сони; 7) юқори ва паст кучланишли чулғамларининг уланиш схемалари ва группаси; 8) қисқа туташиш кучланиши (u_k%) 9) совитилиш усули; 10) трансформаторнинг массаси (кГ ёки т); 11) мойнинг массаси (кГ ёки т); 12) кучланишни ўзгартирувчи переключателнинг вазияти ва ҳоказо.

Трансформаторларнинг маркаси ҳарфлар ва рақамлар билан кўрсатилади. Маркадаги: Т—уч фазали; О—бир фазали; М—мой билан совитиладиган; Д—мойни ташқаридан шамол билан ёки мажбурий ҳаракатлантириб совитиладиган; Ц—мойни совуқ сувли совитгичдан ўтказиб совитиладиган; ДЦ—юқоридаги иккала усул билан совитиладиган; Г—яшинга чидамли (марка охирида кўрсатилади); Н—кучланиши нагрузкани узмасдан ростланадиган (мар-

ка охирида кўрсатилади); Н — ёнмайдиган суюқ диэлектрик билан тўлдирилган (иккинчи ўринда) деган маъноларни беради. Трансформатор маркасида Т ҳарфи бўлса, бу уч чулғамли трансформаторни ифодалайди. Маркада ҳарфли ифодадан кейинги рақам унинг номинал қувватини (кВА) да; иккинчи рақам юқори номинал кучланишни кўрсатади. Масалан, ТЦТНГ-63000/220 марка—уч фазали, уч чулғамли, мойи мажбурий совитиладиган, кучланиши нагрузкани узмай ростланадиган, яшинга чидамли, қуввати 63000 кВА ва юқори кучланишли чулғамининг номинал кучланиши 220 кВ бўлган трансформаторни ифодалайди ёки ТМ-6300/35—қуввати 6300 кВА ва юқори кучланишли чулғамининг кучланиши 35 кВ бўлган икки чулғамли, уч фазали, мой билан табиий совитиладиган трансформаторни билдиради.

Трансформаторлар ишлатилишига қараб бир неча хилга бўлинади:

1. Бир фазали ёки уч фазали куч трансформаторлари — электр энергиясини узоқ масофага узатишда, уни истеъмолчилар орасида тақсимлашда ва умуман, истеъмолчиларни электр энергияси билан таъминлашда ишлатилади.

2. Автотрансформаторлар — кучланиш қийматини бир оз ўзгартириш ёки кучланиш қийматини нолдан бошлаб ошириш учун ҳамда катта қувватли асинхрон двигателларни юргизиш учун ишлатилади;

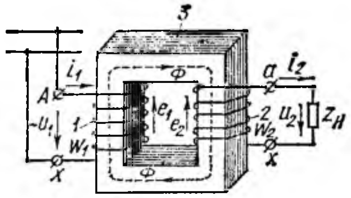
3. Ўлчов трансформаторлари (кучланиш трансформаторлари ва ток трансформаторлари) — электр ўлчаш схемаларида, юқори кучланишларни ва катта токларни оддий ўлчаш приборлари билан ўлчаш учун ишлатилади.

4. Махсус трансформаторлар — пайвандлаш трансформаторлари; синов трансформаторлари; радио, телевидение, алоқа ва автоматика қурилмаларида ишлатиладиган трансформаторлар; ўзгарувчан токнинг фазалари сонини ёки частотасини ўзгартирувчи трансформаторлар махсус трансформаторлар ҳисобланади.

Трансформаторларнинг турлари кўп бўлишига қарамай, уларнинг ишлаш принциплари ва уларда содир бўладиган физик ҳодисалар, асосан, бир хилдир. Келгуси бобларда амалда жуда кенг ишлатиладиган бир фазали ва уч фазали куч трансформаторлари назариясини батафсил ўрганамиз.

Трансформаторларнинг ишлаш принципи

Трансформатор ишлаши учун унинг бирламчи чулғамини кучланиши $u = U_m \sin \omega t$ бўлган ўзгарувчан ток манбаига ёки электр тармоғига уланади (14-расм). Бунда бирламчи чулғамдан ўзгарувчан ток ($i_1 = I_{m1} \sin \omega t$) ўта бошлайди Бу ток ферромагнит ўзакда ўзгарувчан магнит оқими ($\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$) ҳосил қилади. Ферромагнит ўзакнинг магнит қаршилиги ҳавонинг ёки трансформатор мойининг магнит қаршилигидан анча кичик бўлгани учун магнит оқимининг асосий қисми (иш оқими) шу ўзак ор-



14-расм. Бир фазали трансформаторнинг электромагнит схемаси:

1 — бирламчи чулғам, *2* - иккиламчи чулғам, *3* — магнит ўтказгич (пўлат ўзак).

қали туташади ва иккала чулғамни ҳам қуршаб олади, натижада электромагнит индукция қонунига биноан иккала чулғамда ҳам ЭЮК ҳосил бўлади. Максвелл таърифига асосан, чулғамларнинг ҳар бир урамида ҳосил бўладиган ЭЮК $e_0 = -\frac{d\Phi}{dt}$ билан аниқланади.

Бирламчи чулғам ўрамлари сонини w_1 ва иккиламчи чулғам ўрамлари сонини w_2 билан белгилаймиз. Ҳосил бўладиган ЭЮК чулғамларнинг ўрамлари сонига пропорционал бўлади. Демак, бирламчи ва иккиламчи чулғамларда ҳосил бўладиган ЭЮК ларнинг оний қийматлари қуйидагича аниқланади:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\psi_1}{dt}, \qquad (1-1)$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\psi_2}{dt}, \qquad (1-2)$$

бу ерда ψ_1 ва ψ_2 — бирламчи ва иккиламчи чулғамлар билан илашган магнит оқими; $\frac{d\Phi}{dt}$ — магнит оқимининг вақт бирлигида ўзгариши.

Бирламчи чулғамда ҳосил бўладиган ЭЮК (e_1) табиатан ў з-и н д у к ц и я электр юритувчи кучидир. Иккиламчи чулғамда ҳосил бўладиган ЭЮК (e_2) ў з а р о и н д у к ц и я электр юритувчи кучидир. Демак, аниқроқ қилиб айтганда, трансформатор ўзаро индукция ҳодисаси асосида ишлар экан. Трансформаторнинг иккиламчи чулғамига истеъмолчи (нагрузка) уланади. Иккиламчи чулғам ЭЮК истеъмолчи учун ўзгарувчан ток манбаи ҳисобланади.

Трансформатор фақат ўзгарувчан ток тармоғига улангандагина ишлайди, ўзгармас ток тармоғига уланганда эса ишламайди, чунки бирламчи чулғам ўзгармас ток тармоғига уланганда ундан ўтадиган ўзгармас ток ферромагнит ўзакда ўзгармас магнит оқими ҳосил қилади. Магнит оқими вақт бирлигида ўзгармаганлиги сабабли чулғамларда ЭЮК ҳосил бўлмайди. Лекин занжирда электр токининг ҳар қандай ўзгариши чулғамларда ЭЮК ҳосил бўлишига сабаб бўлади. Ўзгармас ток тармоғига уланган трансформатор чулғамларида ЭЮК нинг ҳосил бўлиши, трансформатор тармоққа уланаётганда ёки узилаётганда яхши сезилади, чунки трансформатор тармоққа уланганда унинг чулғамида ток нолдан бирор қийматгача ортиб боради ёки у тармоқдан узилганда, ток кучи бирор қийматдан нолгача камая боради. Демак, худди шу вақтда чулғамлар билан илашган магнит оқими вақт бирлигида ўзгаради ва оқим қиймати турғун бўлганда ЭЮК ҳосил бўлмайди. Демак, трансформатор ўзгармас ток

тармоғига уланганда ишламас экан. Лекин шуни эътиборга олиш керакки, трансформатор ўзгармас ток манбаига уланганда унинг бирламчи чулғамида ЭЮК ҳосил бўлмаганлиги сабабли шу чулғам токининг қиймати кўпайиб кетади. Токнинг қиймати бирламчи чулғамнинг фақат актив қаршилиги билан $\left(I_1 = \frac{U_1}{R_1}\right)$ аниқланади. Бу эса трансформатор учун хавфлидир.

II БОБ. ТРАНСФОРМАТОРЛАРНИНГ ИШЛАШ ҚОНУНИЯТЛАРИ ВА ВЕКТОР ДИАГРАММАЛАРИ

4. Трансформатор чулғамларида ҳосил бўладиган асосий электр юритувчи кучлар

Ҳозирги вақтда энергетика системаларида ва электр тармоқларида кучланишни оширувчи ва пасайтирувчи уч фазали куч трансформаторлари кенг қўлланилмоқда. Шунга қарамай, трансформаторларда содир бўладиган физик процессларни, аввало, бир фазали икки чулғамли куч трансформатори мисолида ўрганамиз. Илгари айтиб ўтилганидек, трансформатор ишлаши учун унинг бирламчи чулғами ўзгарувчан ток манбаига уланиши лозим (14-расм). Бунда бирламчи чулғамдан ўтувчи ток I_1 бирламчи чулғамнинг магнитловчи кучи I_1w_1 ни ҳосил қилади. Бу магнитловчи куч трансформаторнинг асосий магнит оқими Ф ни, бу оқим эса иккала чулғамда, олдин айтилганидек, e_1 ва e_2 ЭЮК ни ҳосил қилади. Бу ЭЮК лар қиймати чулғамларнинг ўрамлар сонига пропорционал бўлади, яъни

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Лекин ЭЮК нинг қиймати бошқа катталикларга ҳам боғлиқ. Масалан, қандай катталикларга боғлиқ бўлишини аниқлаш учун синусоидал магнит оқими ифодасини, яъни $\varphi = \Phi_m \sin \omega t$ ни (1—1) ва (1—2) ифодаларга қўйиб, уни дифференциаллаймиз:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} = -w_1 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = -\omega w_1 \Phi_m \cos\omega t.$$

Лекин

$$\cos \omega t = -\sin(\omega t - \pi/2) \text{ бўлгани учун}$$

$$e_1 = \omega w_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90°). \quad (1-3)$$

Шунга ўхшаш

$$e_2 = \omega w_2 \Phi_m \sin(\omega t - 90°). \quad (1-4)$$

Олинган формулалар трансформатор чулғамларида ҳосил бўладиган ЭЮК ҳам синусоидал қонун бўйича ўзгаришини ва фазаси бўйича магнит оқимидан 90° бурчакка (чорак даврга) орқада қолишини кўрсатади. Энди (1—3) дан e_1 нинг максимал қий-

матини аниқлаймиз. Агар $\sin(\omega t - 90°) = 1$ бўлса, $e_1 = E_{1m}$ бўлади. Бунда:

$$e_1 = E_{1m} = \omega w_1 \Phi_m$$

ёки

$$E_{1m} = \omega w_1 \Phi_m. \qquad (1-5)$$

Бу ифодада ўзгарувчан токнинг бурчак частотаси: $\omega = 2\pi f$. ЭЮК нинг таъсир этувчи қийматини аниқлаш учун унинг максимал қийматини $\sqrt{2}$ га бўлиш лозим, яъни

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} w_1 f \Phi_m = 4{,}44\, w_1 f \Phi_m. \qquad (1-6)$$

Худди шу йўл билан иккиламчи чулғам ЭЮК нинг таъсир этувчи қийматини ҳам аниқлаймиз:

$$E_2 = 4{,}44\, w_2 f \Phi_m, \ (B) \qquad (1-7)$$

Демак, трансформаторнинг бирламчи ва иккиламчи чулғамларида ҳосил бўладиган ЭЮК ларнинг қиймати чулғамларнинг ўрамлар сонига, ўзгарувчан ток частотасига ҳамда магнит оқимининг максимал қийматига боғлиқ экан. Юқоридаги формулаларда магнит оқими вебер ҳисобида ўлчанади.

Трансформатор чулғамларининг бир ўрамида ҳосил бўладиган ЭЮК қуйидагича аниқланади:

$$E_{ў} = 4{,}44 f \Phi_m = 4{,}44 f B_{n\max} \cdot S_n.$$

Бу формулада: $B_{n\max}$ — пўлатнинг тўйиниш даражаси билан чегараланади. Бу шароитда бир ўрамнинг ЭЮК асосан, пўлат ўзакнинг кўндаланг кесими юзи билан аниқланишига имконият яратилади. Ўрам ЭЮК пўлатнинг сифатига ҳам боғлиқ бўлиб, юқори сифатли пўлатларда ўрам ЭЮК ҳам каттароқ бўлади. $B_{n\max}$ нинг маълум чегарадан катта бўлиши пўлатнинг ўта тўйинишига сабаб бўлади.

Трансформаторларда бирламчи чулғам ЭЮК E_1 нинг иккиламчи чулғам ЭЮК E_2 га нисбати, мос ҳолда бирламчи ва иккиламчи чулғамларнинг ўрамлари сони нисбатига тенг бўлади, яъни:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4{,}44\, w_1 f \Phi_m}{4{,}44 w_2 f\, \Phi_m} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Бу нисбат трансформаторнинг **т р а н с ф о р м а ц и я л а ш к о э ф ф и ц и е н т и** дейилади. Трансформациялаш коэффициенти K ҳарфи билан белгиланади. Демак,

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \qquad (1-8)$$

Шундай қилиб, агар бирламчи чулғам кучланиши U_1 нинг қиймати берилган бўлса, ўрамлар сонини танлаш йўли билан трансформатордан исталган қийматли U_{20} кучланишни олиш мумкин.

Агар трансформаторда бирламчи чулғам ўрамларининг сони w_1, иккинчи чулғам ўрамларининг сони w_2 дан катта ($w_1 > w_2$) бўлса, трансформатор кучланишни пасайтириб беради. Бундай трансформатор кучланишни пасайтирувчи трансформатор дейилади. Агар, аксинча, яъни $w_1 < w_2$ бўлса, трансформатор кучланишни оширувчи трансформатор бўлади. Амалда саноат корхоналари подстанцияларида кучланишни пасайтирувчи трансформаторлар ўрнатилади; электростанция подстанцияларида, яъни электр узатиш линияларининг бошида кучланишни бир неча ўн марта ошириб берадиган трансформаторлар ўрнатилади.

Трансформаторлар номинал кучланиш ва номинал ток билан узоқ муддат ишлашга мосланиб тайёрланади.

Трансформаторнинг паспортида кўрсатилган бирламчи чулғам кучланиши унинг бирламчи номинал кучланиши дейилади. Салт ишлаганда ва бирламчи кучланиш номинал қийматга тенг бўлгандаги иккиламчи чулғам кучланиши трансформаторнинг иккиламчи номинал кучланиши дейилади. Трансформаторнинг паспортида ёзилган қувват унинг номинал қуввати дейилади. Трансформаторнинг номинал қуввати ва номинал кучланиши орқали аниқланадиган бирламчи ва иккиламчи чулғамларнинг токлари унинг номинал токлари дейилади. Узоқ вақт номинал ток билан ишлаганда трансформатор чулғамлари ва чулғамлар изоляциясининг температураси йўл қўйиладиган қийматдан ошмайди. Кучланиш ва ток қиймати номинал қийматлардан ортиб кетганда, трансформатор узоқ вақт ишлай олмайди.

Бир ва уч фазали куч трансформаторлари амалда бир неча хил шароитларда, яъни турли режимларда:

1) салт (нагрузкасиз) ишлаши;

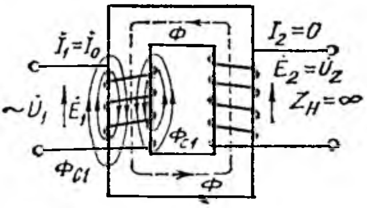
2) нормал шароитда нагрузка билан ишлаши;

3) ишлаб турган трансформаторнинг чулғамлари қисқа туташиб қолганда ёки электр тармоғи қисқа туташганда, лаборатория шароитида қисқа туташиш тажрибаси ўтказилаётганда қисқа туташиш режимида ишлаши мумкин.

Амалда куч трансформаторлари доимо нагрузка билан ишлайди. Қуйида трансформаторнинг турли шароитларда ишлашини кўриб чиқамиз.

5. Трансформаторнинг салт ишлаши

Агар трансформаторнинг бирламчи чулғами синусоидал кучланиш ($u_1 = U_{1m} \cdot \sin \omega t$) га уланса, лекин иккиламчи чулғам қисмаларига истеъмолчи уланмаса, бунда трансформатор салт ишлайди. Бунда трансформаторнинг иккиламчи чулғами қисмалари очиқ ҳолда қолади, яъни иккинчи чулғам токи $I_2 = 0$ бўлади (15-расм). Трансформаторнинг салт ишлаши ўзгарувчан ток занжирига уланган ферромагнит ўзакли ғалтакнинг ишлашидан фарқ қилмайди. Трансформатор салт ишлаганда унинг бирламчи чулғам токи I_1 салт ишлаш токи дейилади. Салт ишлаш токини I_0 билан белгилаймиз, яъни бунда $I_1 = I_0$ бўлади.



15- расм. Трансформаторнинг салт ишлаш схемаси.

Трансформатор салт ишлаганда бирламчи чулғам токи, яъни салт ишлаш токи I_0 бирламчи чулғамнинг магнитловчи кучи $I_0 w_1$ ни ҳосил қилади. Бу магнитловчи куч трансформаторнинг асосий магнит оқими Ф ни ҳосил қилади. Асосий магнит оқимнинг максимал қийматини магнит занжири учун Ом қонуни асосида қуйидагича аниқланади:

$$\Phi_m = \sqrt{2}\left(\frac{I_0 w_1}{R_m}\right), \qquad (1-9)$$

бу ерда R_m — трансформатор ферромагнит ўзагининг магнит қаршилиги.

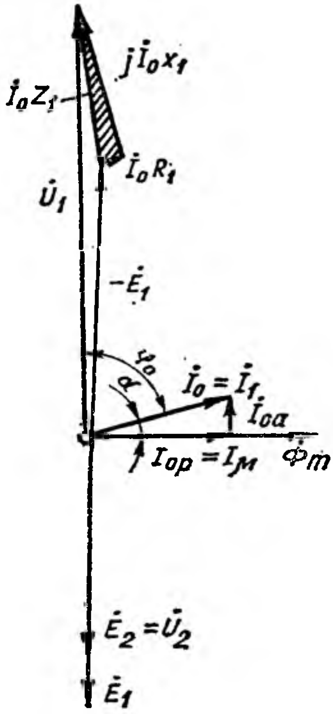
Магнитловчи куч $I_0 \cdot w_1$ асосий магнит оқими Φ ни ҳосил қилади. Магнит оқимининг қиймати U_1 $(U_1 \approx E_1)$ бирламчи чулғам ўрамлари сони w_1 га ва частотага боғлиқ бўлади, яъни $\Phi_m = \frac{E_1}{4{,}44 w_1 f}$. Магнит оқими трансформатор чулғамларида E_1 ва E_2 асосий ва сочилма ЭЮК E_{c1} ни ҳосил қилади. Оқимнинг бир қисми қисман бирламчи чулғам ўралган стержень (ўзак) ва ҳаво билан қуршалади. Бу оқимни бирламчи чулғамнинг **с о ч и л м а о қ и м и** дейилади ва Φ_{c1} билан белгиланади. Сочилма магнит оқимининг қиймати жуда кичкина бўлади, асосий магнит оқими Φ нинг бир неча процентинигина ташкил қилади. Сочилма магнит оқими бирламчи чулғамда **с о ч и л м а Э Ю К** E_{c1} ни ҳосил қилади. Сочилма ЭЮК нинг қиймати бирламчи чулғамнинг сочилма индуктив қаршилигида кучланиш пасайиши билан эътиборга олинади, яъни $E_{c1} = -jI_0 x_1$. Трансформатор салт ишлаганда иккиламчи чулғам кучланиши (U_2) иккиламчи чулғам ЭЮК E_2 га тенг бўлади, яъни $\dot{E}_2 = \dot{U}_2$.

Салт ишлаш шароитида трансформаторга тармоқдан бериладиган кучланиш, асосан, бирламчи чулғамда ҳосил бўладиган ўзиндукция ЭЮК E_1 билан ҳамда жуда оз қисми, бирламчи чулғамнинг актив ва индуктив қаршиликларида кучланишнинг пасайиши $(\dot{I}_0 R_1$ ва $j\dot{I}_0 x_1)$ билан мувозанатлашади. Шундай экан, трансформаторнинг салт ишлаши учун **Э Ю К л а р в а т о к л а р т е н г л а м а с и н и** қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (\dot{E}_1) + j\dot{I}_0 x_1 + \dot{I}_0 R_1, \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2, \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0. \end{aligned}\right\} \qquad (1-10)$$

Энди трансформаторнинг салт ишлаш режими учун вектор диаграммасини қурамиз. Вектор диаграммани қуришда векторнинг учи ва охири тушунчаси киритилади. Одатда, векторнинг йўналишини кўрсатувчи томони унинг **о х и р и**, вектор бошлана-

диган нуқта унинг боши деб қабул қилинган. Вектор диаграммани қуришдан олдин унда қатнашувчи катталиклар учун масштаб танланади. Салт ишлаш режими учун вектор диаграмма қуришни асосий магнит оқими Φ_m нинг векторини танланган масштабда бирор O нуқтадан исталган йўналишда, масалан, горизонтал йўналишда чизамиз (16-расм).



16-расм. Салт ишлаш режими учун ток ва кучланишлар вектор диаграммаси.

Трансформаторларнинг салт ишлаш токи бирламчи чулғамнинг номинал токига нисбатан жуда кичкина бўлади ва амалда номинал токнинг 2 ... 10% идан ошмайди.

Салт ишлаш токи икки қисмдан иборат бўлади: салт ишлаш токининг реактив қисми I_{0p} ва салт ишлаш токининг актив қисми I_{0a}. Салт ишлаш токининг реактив қисми трансформаторнинг ферромагнит ўзагида унинг магнит оқимини ҳосил қилади. Шунинг учун ҳам токнинг бу қисмини кўпинча магнитловчи ток (I_μ) дейилади. Магнитловчи ток салт ишлаш токининг асосий қисмини ташкил қилади. Магнитловчи токнинг қиймати трансформаторнинг магнит занжирини ҳисоблаш йўли билан аниқланади. Вектор диаграммада эса бу токнинг (яъни, I_{0p} ёки I_μ) вектори магнит оқими вектори йўналишида чизилади.

Трансформатор ишлаши учун салт ишлаш режимида ўзгарувчан ток манбаидан қандайдир актив қувватни қабул қилади. Бу қувват, асосан, магнитланиш процессига сарфланади. Ферромагнит ўзакда магнит оқими доимо ўзгариб турганлиги учун бу актив қувват қайта магнитланишга (гистерезисга) ҳамда уюрма токлар ҳосил бўлишига сарфланади. Бу қувват трансформаторнинг пўлатида сарфланадиган ёки исроф бўладиган қуввват дейилади. Салт ишлаш қуввати, тахминан пўлатда исроф бўладиган қувватга тенг, яъни $P_0 = \Delta p_n$ бўлади. Пўлатда исроф бўладиган қувват қанча катта бўлса, салт ишлаш токининг актив қисми ҳам шунча катта бўлади. Агар ферромагнит ўзак қалинлиги 0,35 ... 0,5 мм бўлган айрим пластинкалардан йиғилса ва частота 50 Гц бўлганда I_{0a} салт ишлаш токи I_0 нинг кўпи билан 10% ини ташкил қилади. I_{0a} нинг қиймати гистерезис ва уюрма токлар таъсирида сарфланадиган актив қувват қиймати билан аниқланади. Салт ишлаш токининг актив қисми $\dot{I}_{0a}$ нинг вектори

фазаси бўйича $I_{0р}$ векторидан 90° олдинда келадиган қилиб чизилади. Бунда салт ишлаш токи $\dot{I}_0$ нинг вектори $\dot{I}_{0а}$ ва $\dot{I}_{0р}$ векторларининг геометрик йиғиндиси билан аниқланади. Вектор диаграммадан I_0 нинг эффектив қийматини қуйидагича аниқлаш мумкин:

$$I_0 = \sqrt{I_{оа}^2 + I_{ор}^2}. \qquad (1-11)$$

Демак, I_0 вектори магнит оқими Φ_m векторидан α бурчакка олдинда келадиган бўлади. α бурчак **магнитавий орқада қолиш бурчаги** дейилади.

Асосий магнит оқими бирламчи ва иккиламчи чулғамларда E_1 ва E_2 ЭЮК ни ҳосил қилади. Илгари айтилганидек, бу ЭЮК нинг векторлари фазалари жиҳатидан магнит оқими векторларидан 90° орқада келадиган қилиб чизилади. Трансформаторга электр тармоғидан бериладиган $\dot{U}_1$ кучланиш векторини аниқлаш учун бирламчи чулғам учун ЭЮК тенгламасига мурожаат қиламиз. Бунда $(-\dot{E}_1)$ вектор миқдор жиҳатидан $\dot{E}_1$ векторга тенг ва йўналиши жиҳатдан унга қарама-қарши чизилади. Бирламчи чулғамнинг актив қаршилигида кучланиш пасайиши, яъни $\dot{I}_0R_1$ вектор $(-\dot{E}_1)$ вектор охиридан $\dot{I}_0$ вектор йўналишида чизилади. Чулғамнинг индуктив қаршилигида кучланиш пасайиши, яъни $j\dot{I}_0x_1$ вектор фазаси жиҳатидан $\dot{I}_0$ вектордан 90° олдинда қилиб чизилади. Бу вектор $\dot{I}_0R_1$ вектор охиридан $\dot{I}_0$ векторга тик қилиб чизилади. $\dot{I}_0R_1$ ва $j\dot{I}_0x_1$ векторларнинг геометрик йиғиндиси бирламчи чулғамнинг тўла қаршилигида кучланиш пасайиши, яъни $\dot{I}_0z_1$ векторни беради. Шундай қилиб, диаграммада бирламчи чулғамнинг актив, индуктив ва тўла қаршиликларида кучланишлар пасайиши **учбурчагини** ҳосил қиламиз (16-расм). Чулғам қаршиликлари ва улардаги кучланиш пасайиши жуда кичкина бўлгани учун вектор диаграммада бу учбурчак жуда кичкина бўлади.

Трансформаторга тармоқдан бериладиган кучланиш $\dot{U}_1$ вектори $(-\dot{E}_1)$ ва $\dot{I}_0z_1$ векторларнинг йиғиндиси билан аниқланади ёки вектор $\dot{I}_0x_1$ учини нуқта O билан туташтириб $\dot{U}_1$ векторни оламиз.

Трансформатор салт ишлаганда унинг иккиламчи чулғамидан олинадиган фойдали қувват (P_2) нолга тенг. Лекин трансформатор ишлаши учун тармоқдан қандайдир қувват қабул қилади. Бу қувват **салт ишлаш қуввати** (P_0) дейилади. Салт ишлаш қуввати магнитланиш процессига сарфланадиган қувватдан (бу ҳақда юқорида айтиб ўтилди) ҳамда бирламчи чулғамдан ток ўтганда унинг актив қаршилигида иссиқлик энергиясига айланадиган қувват ($I_0^2R_1$) дан иборат. Салт ишлаш токи I_0 ва чулғамнинг актив қаршилиги R_1 кичкина бўлганлиги учун бирламчи чулғамда иссиқликка айланадиган қувват ($I_0^2R_1$) миқдори жуда озгина бўлади; шунинг учун ҳисоблашларда кўпинча у эътибор-

га олинмайди. Бу шароитда тармоқдан олинадиган қувват фақат магнитланиш процессида ($\Delta p_{гис} + \Delta p_{ую}$) сарфланади дейилса бўлади. Лекин аслида:

$$P_0 = \Delta p_{гис} + \Delta p_{ую} + I_0^2 R_1. \qquad (1-12)$$

Салт ишлаш қуввати P_0 нинг қиймати, трансформаторнинг салт ишлаш параметрлари ва бошқалар салт ишлаш тажрибасидан аниқланади. Салт ишлаш тажрибаси ҳақида кейинчалик тўхталамиз.

6. Трансформаторнинг нагрузка билан (нормал шароитда) ишлаши

Дастлаб нагрузкали трансформаторнинг бирламчи ва иккиламчи чулғамлари учун ЭЮК тенгламасини аниқлаймиз.

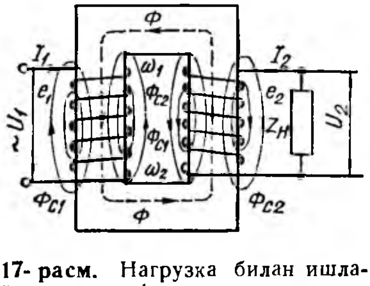
Трансформаторнинг иккиламчи чулгами қисмаларига истеъмолчи, яъни нагрузка уланганда унинг бирламчи чулғамидан I_1 ва иккиламчи чулғамидан I_2 ток ўтади. Бу токлар ҳосил қилган магнитловчи кучлар ($I_1 w_1$ ва $I_2 w_2$) биргаликда трансформаторнинг асосий магнит оқими Φ ни ҳосил қилади. Асосий магнит оқими асосан трансформаторнинг пўлат ўзаги орқали туташади (17-расм). Айни вақтда бу токлар ҳар бир чулғам атрофида қисман ўзак ва ҳаво орқали туташадиган Φ_{c1} ва Φ_{c2} сочилма оқимларни ҳам ҳосил қилади. Бу ерда Φ_{c1} — бирламчи чулғам ва ҳаво орқали туташадиган сочилма магнит оқими; Φ_{c2} — иккиламчи чулғам ва ҳаво орқали туташадиган сочилма магнит оқими. Сочилма оқимлар ҳам вақт бирлиги ичида ўзгарганлиги учун бу оқимлар илашган ўрамларда қўшимча, яъни сочилма ЭЮК ҳосил қилади. Сочилма оқимлар таъсирида ҳосил бўладиган ЭЮК *сочилма ЭЮК* дейилади. Сочилма ЭЮК ни E_{c1} ва E_{c2} билан белгилаймиз. Сочилма ЭЮК ҳам ўзиндукция ЭЮК дир. Уларнинг қиймати (1 — 6) формула ёрдамида аниқланиши мумкин, яъни

$$E_{c1} = 4{,}44\, w_1 f \Phi_{c1},$$
$$E_{c2} = 4{,}44\, w_2 f \Phi_{c2}.$$

Электр юритувчи кучлар E_{c1} ва E_{c2} ни I_1 ва I_2 токлар ҳосил қиладиган ва шу ЭЮК ни компенсацияловчи реактив кучланиш пасайишлари билан алмаштириш анча қулайлик туғдиради, яъни уларнинг қиймати чулғамларнинг индуктив қаршиликларида кучланиш пасайиши билан аниқланади:

$$\dot{E}_{c1} = -j \dot{I}_1 x_1, \qquad (1-13)$$
$$\dot{E}_{c2} = -j \dot{I}_2 x_2, \qquad (1-14)$$

бу ерда x_1 ва x_2 — сочилма оқимлар таъсирида вужудга келадиган бирламчи ва иккиламчи чулғамларнинг индуктив қаршиликлари. Ҳарфлар устига қўйилган нуқта уларнинг вектор қийматини билдиради.



17- расм. Нагрузка билан ишлаётган трансформаторда сочилма оқимлар.

Сочилма ЭЮК реактив характерга эга бўлади. ($-j$) кўпайтувчиси эса сочилма ЭЮК I_1 ва I_2 токларга нисбатан 90° орқада қолишини кўрсатади.

Шундай қилиб, трансформаторнинг ҳар бир чулғамида, айнан бир вақтда, асосий ЭЮК ва сочилма оқимлар ҳосил қиладиган сочилма ЭЮК ҳосил бўлади. Олдин айтиб ўтилганидек, бирламчи чулғамда ҳосил бўладиган $\dot{E}_1$ электр юритувчи кучи ўзиндукция ЭЮК бўлиб, унинг йўналиши трансформаторга тармоқдан бериладиган кучланиш U_1 йўналишига тескари, қиймати эса тармоқ кучланиши қийматига, деярли тенг бўлади. Тармоқ кучланишининг озгина қисми бирламчи чулғамнинг актив ва индуктив қаршиликларида кучланиш пасайишига сарфланади. Трансформатор номинал нагрузка билан ишлаганда бирламчи чулғамнинг актив ва реактив қаршиликларида кучланиш пасайиши тармоқ кучланишининг тахминан 2,5...5% ни (салт, яъни нагрузкасиз ишлаганда эса U_1 нинг 0,125 ... 0,25% ни) ташкил қилади.

Бирламчи чулғамга тармоқдан бериладиган кучланиш U_1 вақтнинг ҳар бир моментида шу чулғамда ҳосил бўладиган барча ЭЮК лар йиғиндиси билан мувозанатлашади. Кирхгофнинг иккинчи қонуни асосида трансформаторнинг бирламчи чулғами учун ЭЮК лар тенгламаси қуйидагича ёзилади:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{c1} = \dot{I}_1 R_1$$

ёки

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) - \dot{E}_{c1} + \dot{I}_1 R_1,$$

ёки бу тенгламадаги сочилма ЭЮК ни сочилма индуктив қаршиликдаги кучланиш пасайиши билан ифодаласак:

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 R_1, \qquad (1-15)$$

бу ерда: $\dot{I}_1 R_1$ ва $\dot{I}_1 x_1$ — бирламчи чулғамнинг актив ва индуктив қаршиликларидаги кучланиш пасайиши.

Трансформаторнинг чулғамлари солиштирма қаршиликлари кичкина бўлган (кўпинча мис ёки алюминий) симлардан ўралади. Шунинг учун чулғамнинг актив қаршилигида кучланиш пасайиши $\dot{E}_1$ қийматига нисбатан жуда кичкина бўлади шунингдек, трансформаторнинг сочилма индуктив қаршиликлари ва, демак, мос ҳолда уларда кучланиш пасайиши ҳам жуда кичкина бўлади. Шунинг учун тақрибий ҳисоблашларда чулғамнинг актив ва индуктив қаршиликларида кучланиш пасайиши эътиборга олинмаса ҳам бўлади. У ҳолда тармоқдан, трансформаторнинг бирламчи чулғамига бериладиган $\dot{U}_1$ кучланиш шу чулғамда ҳосил бўладиган асосий ЭЮК $\dot{E}_1$ билан, тахминан мувозанатлашади, яъни

$$\dot{U}_1 \approx (-\dot{E}_1). \qquad (1-16)$$

Трансформаторнинг иккиламчи чулғамида ҳосил бўладиган асосий ЭЮК $\dot{E}_2$ га истеъмолчига нисбатан, ток манбаи сифатида қараш мумкин. Иккинчи чулғам кучланиши $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 z_н$ билан аниқланади. Юқоридаги мулоҳазалар асосида иккиламчи чулғам учун ЭЮК тенгламасини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{с2} = \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_2 z_н$$

ёки (1 — 14) ифодага асосланиб:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 R_2. \qquad (1-17)$$

Трансформатор иккиламчи чулғамининг актив ва индуктив қаршиликлари ва уларда кучланишнинг пасайиши $\dot{E}_2$ га нисбатан жуда кичкина бўлади. Тақрибий ҳисоблашларда улар ҳам эътиборга олинмаслиги мумкин. У ҳолда

$$\dot{U}_2 \approx \dot{E}_2 \quad \text{бўлади.} \qquad (1-18)$$

Лекин трансформатор салт ишлаб турганда (яъни $I_2 = 0$ бўлганда), $\dot{U}_2$ нинг қиймати $\dot{E}_2$ га тенг бўлади, яъни $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$.

Юқоридаги мулоҳазалар асосида трансформаторнинг трансформация коэффициентини бирламчи ва иккиламчи кучланишлар нисбати билан ҳам аниқлаш мумкин, яъни

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2}. \qquad (1-19)$$

Нагрузка билан ишлаб турган трансформаторда асосий магнит оқими йиғинди магнитловчи куч, яъни $\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2$ томонидан ҳосил қилинади ва бирламчи ҳамда иккиламчи чулғамларда асосий ва сочилма ЭЮК лар ҳосил бўлади. Лекин трансформаторга уланган нагрузка қиймати доимо ўзгариб туради. Эксплуатация давомида трансформаторнинг нагрузкаси номинал қийматдан ошиб кетмаслиги лозим.

Трансформаторнинг бирламчи ва иккиламчи чулғами магнитловчи кучларининг ўзаро боғланиши анча мураккаб. Магнитловчи кучларнинг ўзаро боғланишини кейинроқ тушунтирамиз. Қисқа қилиб айтганда, трансформаторнинг иккиламчи чулғами токи I_2 нинг ҳар қандай ўзгариши, мос ҳолда унинг бирламчи чулғами токи I_1 нинг ўзгаришига сабаб бўлади. Пўлат ўзакда ҳосил бўладиган асосий магнит оқимининг қиймати иккиламчи чулғамга уланадиган нагрузка қийматига қараб жуда оз (7. . . 8%) ўзгариши трансформаторга хос хусусиятдир. Демак, трансформаторнинг магнит оқими салт ишлаш ҳолатидан нагрузкаси номинал қийматгача ўзгарганда деярлик ўзгармас экан.

7. Трансформаторнинг қисқа туташиш шароитида ишлаши

Трансформатор нормал нагрузка билан узоқ йиллар ишлашга мўлжаллаб тайёрланади. Ўта нагрузка билан узоқ вақт ишлай олмайди. Чунки бунда унинг бирламчи ва иккиламчи чулғам ток-

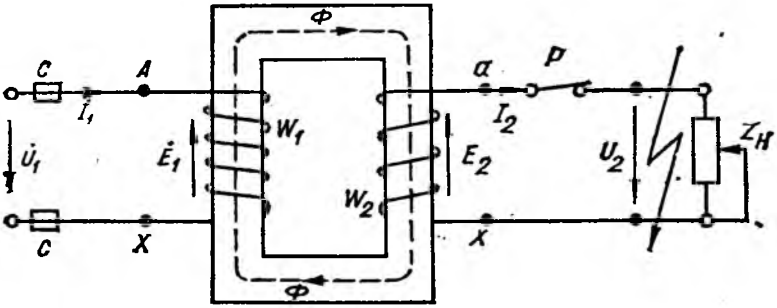
лари номинал қийматдан ортиб кетади, бу шароитда трансформатор тез қизийди ва ҳатто ишдан чиқиши ҳам мумкин. Лекин амалда шундай ҳоллар ҳам бўладики, иккиламчи чулғам қисмалари ёки истеъмолчилар тармоғи қисқа туташиб қолиши натижасида трансформатор қисқа муддат қисқа туташиш шароитида ишлайди (18-расм). Бошқача айтганда, трансформаторнинг иккиламчи чулғами қисмалари қисқа туташтирилиб унинг бирламчи чулғамига кучланиш U_1 берилса, трансформатор қисқа туташиш шароитида ишлайди ва тез ишдан чиқади. Бунда истеъмолчининг қаршилиги $z_н = 0$ бўлгани учун иккиламчи чулғам токи I_2 жуда катта бўлади. Иккиламчи чулғам кучланиши эса $U_2 = I_2 \cdot z_н = 0$ бўлади. Трансформатор бундай шароитда ишлай олмайди. Чунки бу шароитда бирламчи ва иккиламчи чулғам токлари уларнинг номинал қийматларидан 8 . . . 25 баравар ёки ундан ортиқ кўпайиб кетади. Қисқа туташиш шароитида бирламчи ва иккиламчи чулғамдан ўтадиган токлар қисқа туташиш токлари дейилади ва $I_{1к}$, $I_{2к}$ билан белгиланади. Катта қисқа туташиш токлари чулғамларни тез қиздириб юборади, уларнинг изоляцияларини бузади. Бундан ташқари, қисқа туташиш токлари чулғамларда шундай электродинамик кучлар ҳосил қиладики, бу кучлар таъсирида трансформатор бузилади ва ҳатто портлаб кетиши ҳам мумкин. Номинал кучланишда қисқа туташиш токининг қиймати:

$$I_к \sqrt{2} = \frac{100 \cdot \sqrt{2}}{U_к\%} \cdot I_н$$

билан аниқланади.

Бу ерда $U_к\%$ — қисқа туташиш кучланиши.

Шунинг учун ҳар бир трансформатор бошида анча мустаҳкам ва пишиқ тайёрланиши лозим. Шу билан бирга ишлатилаётганда чулғамларда токнинг кўпайиб кетишидан, яъни қисқа туташиш токларидан сақлаш учун трансформаторлар махсус сезгир сақлагич аппаратлар билан жиҳозланиши лозим. Сезгир сақлагич аппаратлар қисқа туташиш шароити вужудга келиши билан трансформаторни электр тармоғидан жуда қисқа (0,5 с ва ундан ҳам кам)



18- расм. Трансформаторнинг қисқа туташиш шароитида ишлаши.

вақт ичида узиб қўяди ва уни бузилишдан сақлайди. Агар сақлагич аппаратлар ишламай қолса, трансформатор бутунлай ишдан чиқади. Шундай қилиб, қисқа туташиш шароити трансформатор учун жуда хавфли авария шароитидир.

Магнитловчи кучлар тенгламаси

Салт ишлаш шароитида трансформаторнинг бирламчи чулғамига тармоқ кучланиши берилса, салт ишлаш токи I_0 бирламчи чулғамда магнитловчи куч $I_0 w_1$ ни ҳосил қилади. Бу магнитловчи куч ферромагнит ўзак орқали туташадиган асосий магнит оқими Φ_m ни ҳосил қилади. Магнит оқимининг қиймати магнит занжири учун Ом қонуни формуласи бўйича (1—9) ифодадан аниқланади.

Трансформаторнинг иккиламчи чулғамига нагрузка уланганда, яъни у нормал шароитда ишлаганда, иккинчи чулғамдан нагрузка токи I_2 ўта бошлайди. Нагрузка уланиши билан бирламчи чулғам токи I_0 I_1 гача кўпаяди. Бунда ток I_2 қанча бўлса, ток I_0 шунча кўпаяди. Шу асосда трансформаторда ЭЮК лар мувозанати сақланади ҳамда турли шароитларда магнит оқими деярлик бир хилда қолиши таъминланади.

Трансформатор бирламчи ва иккиламчи чулғамларининг токлари (I_1 ва I_2) мос чулғамларда магнитловчи кучлар $I_1 w_1$ ва $I_2 w_2$ ни ҳосил қилади. Бу шароитда трансформаторларнинг магнит оқимини магнитловчи кучлар $I_1 w_1$ ва $I_2 w_2$ биргаликда ҳосил қилади. Магнит оқимининг қиймати энди қуйидагича аниқланади:

$$\Phi_m = \sqrt{2}\frac{I_1 w_1 + I_2 w_2}{R_м}. \qquad (1-20)$$

Юқоридаги мулоҳазалар асосида бизга маълумки, трансформатор турли шароитларда ишлаганда унда магнит оқими деярли ўзгармайди. Бу хусусиятни яна бошқача тушунтириш мумкин. Бунинг учун (1—6) ифодадан магнит оқимини қуйидагича аниқлаймиз:

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4{,}44\, w_1 f},$$

агар $E_1 \approx U_1$ бўлса, унда

$$\Phi_m = \frac{U_1}{4{,}44\, w_1 f}. \qquad (1-21)$$

Бу формулада w_1 ва f ўзгармасдир; тармоқ кучланиши U_1 нагрузка қиймати ҳар қандай ўзгарганда ҳам деярли бир хил бўлади. Электр энергиясининг сифати тармоқда кучланиш қиймати ва частотасининг бир хил бўлиши билан аниқланади. Юқоридаги формула трансформаторда ҳосил бўладиган магнит оқими нагрузка тури ва қийматига деярли боғлиқ эмаслигини кўрсатади. Лекин, аслида, истеъмолчи токи ортиши билан трансформаторнинг магнит оқими бир оз ўзгаради.

Бу мулоҳазалар асосида (1—9) ва (1—20) ифодаларни тенглаштириш мумкин:

$$\sqrt{2}\frac{I_0 w_1}{R_м} = \sqrt{2}\left(\frac{I_1 w_1 + I_2 w_2}{R_м}\right)$$

ёки $\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2$, (1—22)

бу ерда $I_0 w_1$ — ферромагнит ўзакда трансформаторнинг асосий магнит оқимини ҳосил қилувчи йиғинди магнитловчи куч.

(1—22) ифода нагрузка билан ишлаётган трансформатор учун магнитловчи кучлар тенгламасидир.

Нагрузка билан ишлаётган трансформаторнинг магнитловчи кучлар тенгламасидан шу шароит учун токлар тенгламасини ёзиш мумкин. Бунинг учун (1—22) ифоданинг ҳар икки томонини бирламчи чулғам ўрамлари сони w_1 га бўламиз:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}$$

ёки

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 \qquad (1—23)$$

бу ерда $\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1}$ бирламчи чулғам ўрамлари сонига келтирилган иккиламчи чулғам токи.

Келтирилган электр катталиклар ҳақида кейинроқ батафсил тўхталиб ўтамиз. Энди (1—23) ифодадан бирламчи чулғам токи $\dot{I}_1$ ни аниқлаймиз:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \qquad (1—24)$$

Бу тенглама нагрузка билан ишлаётган трансформатор учун токлар тенгламасидир.

Демак, нагрузка билан ишлаётган трансформаторнинг бирламчи чулғам токи $\dot{I}_1$ икки қисмдан иборат экан: салт ишлаш токи $\dot{I}_0$ ва иккинчи чулғам токининг магнитсизлаш таъсирини компенсацияловчи $(-\dot{I}'_2)$ қисми. Бу тенгламадан кўриниб турибдики, агар $I_2 = 0$ бўлса, $(-\dot{I}'_2)$ ток ҳам нолга тенг бўлади. Бу ҳолда $\dot{I}_1 = \dot{I}_0$ бўлади. Бу шароит эса салт ишлаш шароитидир.

Агар иккиламчи чулғам қисмаларига нагрузка уланса, бу занжирдан ток $\dot{I}_2$ ўта бошлайди. Ток $\dot{I}_2$ ҳосил қиладиган магнитловчи куч $\dot{I}_2 w_2$ пўлат ўзакда асосий магнит оқими Φ га тескари йўналган магнит оқимини ҳосил қилади. Бу шароитда асосий магнит оқими камайиши лозим. Агар трансформаторнинг асосий магнит оқими камайса, бирламчи ва иккиламчи чулғам ЭЮК ларининг мувозанати бузилади. Лекин амалда бундай бўлмайди. Чунки бу шароитда магнит оқимининг (ва бунинг натижасида $\dot{E}_1$ ЭЮК нинг) камайиши ўз-ўзидан бирламчи чулғам токининг

ортишига олиб келади. Шунинг учун ҳам агар $\dot{I}_2 = 0$ бўлса, $\dot{I}_1 = \dot{I}_0$ бўлади. Нагрузка токи $\dot{I}_2$ қанча катталашса, бирламчи чулғам токи $\dot{I}_1$ ҳам мос равишда шунча катталашади. Агар ток $\dot{I}_2$ қанча камайса, ток $\dot{I}_1$ ҳам шунча камаяди. Шундай қилиб, ток $\dot{I}_2$ нинг ҳар қандай ўзгариши ток $\dot{I}_1$ нинг худди шундай ўзгаришига олиб келади. Бирламчи чулғам магнитловчи кучининг бир қисми (яъни, $-\dot{I}_2' w_2$) тескари оқим ҳосил қилувчи иккиламчи чулғам магнитловчи кучи $\dot{I}_2 w_2$ нинг таъсирини йўқотади, яъни компенсациялаб туради ва шу асосда ферромагнит ўзакда магнит оқими нагрузка қийматининг ҳар қандай ўзгаришига қарамай, деярли бир хилда қолади. Демак, бирламчи чулғам токининг иккинчи қисми $(-\dot{I}_2')$ ҳосил қиладиган магнитловчи куч (яъни, $-\dot{I}_2' w_2$) магнитловчи куч $\dot{I}_2 w_2$ га тенг ва йўналиши бўйича унга қарама-қарши бўлади.

Олдин айтиб ўтганимиздек, трансформаторнинг салт ишлаш токи бирламчи чулғам номинал токининг жуда оз қисмини (амалда 2 ... 10% ини) ташкил қилади. Шунинг учун, кўпинча, тақрибий ҳисоблашларда токлар тенгламасида $\dot{I}_0$ эътиборга олинмайди.

У ҳолда:

$$\dot{I}_1 \approx -\dot{I}_2' \text{ ёки } \dot{I}_1 = -\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} \text{ бўлади.}$$

Бундан:

$$\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \approx \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{K}.$$

Маълумки, кучланишни пасайтирувчи трансформаторларда $U_1 > U_2$ бўлади. Лекин трансформатор ишлаётганда унинг ишлаши учун (ўзида) сарфланадиган қувват жуда кичик бўлади. Шунинг учун трансформаторнинг бирламчи ва иккиламчи чулғами қувватлари деярли тенг дейиш мумкин. Демак, трансформаторнинг катта кучланишли чулғамида ток кучи кичкина; кучланиши кичик бўлган чулғамида ток кучи катта бўлар экан. Шундай экан, трансформаторнинг трансформациялаш коэффициентини унинг бирламчи ва иккиламчи токлари нисбати билан ҳам аниқлаш мумкин, яъни

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_2}{w_1} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}. \quad (1\text{-}25)$$

Трансформаторда бирламчи чулғам токининг иккинчи қисми, яъни $(-\dot{I}_2')$ нинг қуввати трансформатор орқали истеъмолчига узатиладиган қувватга тенгдир, яъни:

$$(-I_2') E_1 \cos\psi_2 = I_2 \frac{w_2}{w_1} \cdot E_2 \frac{w_1}{w_2} \cos\psi_2 = E_2 I_2 \cos\psi_2.$$

Шундай қилиб, нагрузка уланганда бирламчи чулғамда ҳосил бўладиган ток ($-\dot{I}'_2$) иккиламчи чулғамнинг магнитловчи кучини мувозанатлайди ҳамда иккиламчи чулғам орқали истеъмолчиға узатилаётган қувватни электр тармоғи орқали трансформаторнинг бирламчи чулғамиға келишини таъминлайди.

Юқорида келтирилған ифодалар ва мулоҳазалар асосида нагрузка билан ишлаётган трансформатор учун ЭЮК лар ва токлар тенгламасини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 R_1, \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 R_2, \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2). \end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}26)$$

9. Трансформаторнинг келтирилган токи, кучланиши ва параметрлари

Трансформаторларда умумий ҳолда $w_1 \neq w_2$, $E_1 \neq E_2$, $I_1 \neq I_2$. Бирламчи ва иккиламчи чулғамларда ток кучи ва кучланишлар ҳар хил бўлгани учун чулғамлар параметрлари ҳам, яъни уларнинг актив ва индуктив қаршиликлари ҳам мос ҳолда ҳар хил бўлади. Бу фарқ трансформациялаш коэффициенти катта бўлган трансформаторларда айниқса катта бўлади. Бу эса трансформаторнинг турли шароитларда ишлашини тадқиқ қилишни ва ҳисоблашни ҳамда улар учун вектор диаграмма қуришни қийинлаштиради. Чунки, бирламчи чулғамга тегишли катталиклар вектори узунлиги бўйича иккиламчи чулғамнинг шундай катталиклари векторидан анча фарқ қилади ва диаграмма қуришни қийинлаштиради. Бу қийинчиликдан қутулиш учун иккиламчи чулғам ЭЮК, кучланиши, токи ва ҳамма параметрлари бирламчи чулғам ўрамлари сонига келтирилади. Келтирилган трансформаторда ўрамлар сони w_2 бўлган иккиламчи чулғам, ўрамлар сони w_1 бўлган ҳаёлий чулғам билан алмаштирилади. Иккиламчи чулғам ЭЮК, кучланиши, токи ва қаршиликлари қуйида келтирилган формулалар ёрдамида бирламчи чулғам ўрамлари сониға келтирилади. Келтириш ҳисоблашлари шундай олиб борилиши лозимки, иккиламчи чулғамда келтиришдан олдин ва келтиришдан кейин қуйидаги шартлар бажарилиши керак:

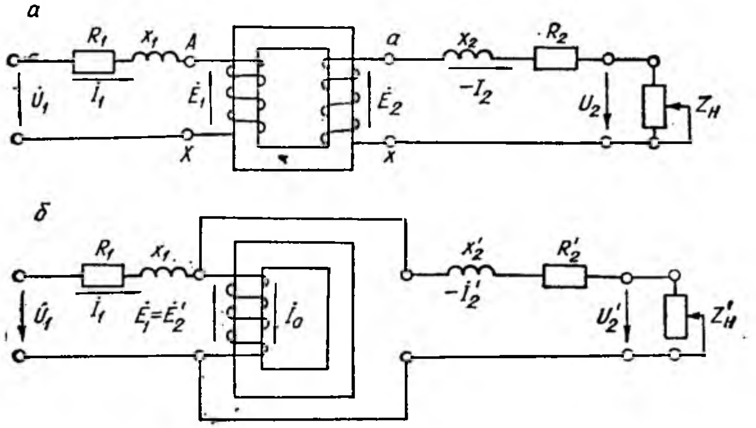
1) келтирилган ва келтирилмаган иккиламчи чулғам магнитловчи кучлари тенг бўлиши лозим, яъни $\dot{I}_2 w_2 = \dot{I}'_2 w_1$;

2) чулғамлар қуввати ва исроф бўладиган қувват тенг бўлиши керак, яъни:

$$P_2 = P'_2; \quad \Delta p_{э2} = \Delta p'_{э2};$$

3) келтирилган ва келтирилмаган иккиламчи чулғам токи ва кучланиши орасидаги силжиш бурчаги ўзгармас қолиши лозим, яъни $\angle\varphi = \angle\varphi^1$.

Иккиламчи чулғам параметрларини бирламчи чулғам ўрамлари сонига келтириш йўли билан трансформациялаш коэффициенти $K = \frac{w_1}{w_2}$ бўлган ҳақиқий трансформатор ўрнида трансформациялаш коэффициенти $K = \frac{w_1}{w_1} = 1$ бўлган хаёлий трансформатор олинади. Бундай трансформатор келтирилган трансформатор дейилади (19-расм). Одатда, саноат корхоналари подстанцияларида кучланишни пасайтирувчи трансформаторлар ўрнатилади. Уларнинг бирламчи кучланишлари кўпинча $\dot{U}_1 = 10000$ В ва иккиламчи кучланишлари $\dot{U}_2 = 400$ В бўлади. Бундай трансформатор учун вектор диаграмма қуришда кучланиш масштаби танланади. Агар 1 см = 400 В деб олинса, бирламчи кучланиш векторининг узунлиги 25 см, иккиламчи кучланиш векторининг узунлиги 1 см бўлади. Бундай векторларни чизиб трансформаторнинг бошқа параметрларини анализ қилиш анча ноқулай. Шунинг учун иккиламчи чулғамга тегишли катталиклар бирламчи чулғам ўрамлар сонига келтирилади. Келтирилган катталиклар (′) билан ифодаланади. Масалан: E'_2, U'_2, I'_2, R'_2, x'_2, z'_2 ва ҳоказо. Энди келтириш формулалари билан танишамиз. Юқорида айтиб ўтганимиздек, иккиламчи чулғамга тегишли катталикларни бирламчи чулғам ўрамлари сонига келтириш трансформаторнинг энергетика балансига таъсир қилмаслиги керак, яъни ҳақиқий трансформаторнинг иккиламчи чулғами қуввати $U_2 I_2$ келтирилган трансформаторнинг иккиламчи чулғами қуввати $U'_2 I'_2$ га тенг бўлиши лозим, яъни:



19-расм. Иккиламчи чулғам катталикларини бирламчи чулғам ўрамлари сонига келтириш схемалари:

а — магнитловчи занжир қаршиликлари аниқланмаган трансформаторнинг эквивалент схемаси, *б* — иккиламчи чулғам занжири қаршиликлари бирламчи чулғам ўрамлари сонига келтирилган трансформатор.

$$U_2I_2 = U_2'I_2'. \quad (1\text{-}27)$$

Бирламчи чулғам ўрамлари сонига келтирилган иккиламчи чулғам токи маълум:

$$I_2' = I_2 \frac{w_2}{w_1}.$$

Бу ифодани (1-27) га қўйиб, бирламчи чулғам ўрамлари сонига келтирилган иккиламчи чулғам кучланишини аниқлаймиз:

$$U_2' = \frac{I_2}{I_2'},\ U_2 = \frac{I_2}{I_2}\frac{w_1}{w_2},\ U_2 = U_2\frac{w_1}{w_2}$$

ёки

$$U_2' = U_2 \cdot K = U_1. \quad (1\text{-}28)$$

Шунга ўхшаш:

$$E_2' = E_2\frac{w_1}{w_2} = E_2 \cdot K = E_1. \quad (1\text{-}29)$$

Бирламчи чулғамнинг келтирилган қаршилиги, қаршиликдан ток ўтганда исроф бўладиган қувватлар тенглиги шартидан аниқланади:
яъни

$$I_2^2R_2 = I_2^{1 2}R_2^1.$$

Бундан иккиламчи чулғамнинг келтирилган актив қаршилиги:

$$R_2^1 = R_2\left(\frac{I_2}{I_2^1}\right)^2 = R_2\left(\frac{I_2}{I_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 = R_2\left(\frac{w_1}{w_2}\right).$$

Демак,

$$R_2^1 = R_2 \cdot K^2. \quad (1\text{-}30)$$

Худди шунингдек, иккиламчи чулғамнинг келтирилган индуктив қаршилиги:

$$x_2^1 = x_2 \cdot \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 = x_2 \cdot K^2. \quad (1\text{-}31)$$

Иккиламчи чулғамнинг келтирилган тўла қаршилиги:

$$z_2^1 = z_2 \cdot K^2. \quad (1\text{-}32)$$

Трансформаторнинг иккиламчи чулғами қисмаларига уланган истеъмолчининг келтирилган қаршилиги:

$$z_н^1 = z_н\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 = z_н \cdot K^2. \quad (1\text{-}33)$$

Амалда ток, кучланиш ва қаршиликларнинг келтирилган қийматларини билиб, қайта ҳисоблаш йўли билан, уларнинг ҳақиқий қийматларини аниқлаш ёки ҳақиқий қийматларини билиб, келтирилган қийматларини аниқлаш мумкин бўлади.

Иккиламчи чулғам кучланиши, токи ва қаршиликлари бир-

ламчи чулғам ўрамлари сонига келтирилган трансформаторнинг ЭЮК лари ва токлари тенгламасини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 R_1,\\ U_2^1 &= E_2^1 - j\dot{I}_2^1 x_2^1 - \dot{I}_2^1 R_2^1,\\ \dot{I} &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2).\end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}34)$$

10. Трансформаторнинг эквивалент электр схемаси

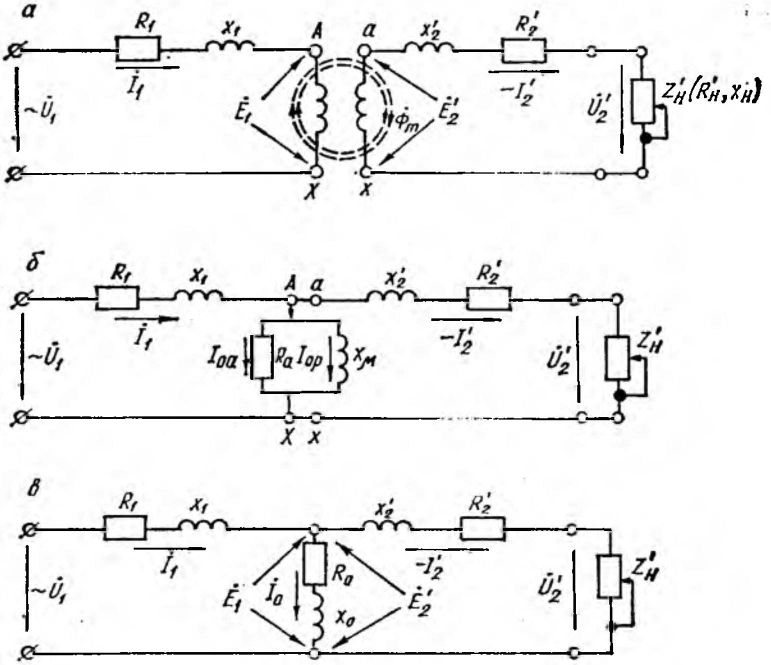
Трансформатор электр тармоғининг асосий элеменгларидан биридир. Ҳар қандай электр тармоғининг турли ишлаш шароитлари ҳисоблаб чиқилиши керак.

Бунинг учун электр тармоғининг схемаси чизилади. Схемала электр тармоғининг айрим элементлари уларнинг эквивалент электр схемалари билан алмаштирилади. Ҳақиқий трансформаторни ҳам келтирилган параметрлар асосида тузилган ва шу трансформаторга эквивалент бўлган электр схема билан алмаштириш мумкин. Бунинг учун олдин бирламчи ва иккиламчи чулғамларнинг актив ва индуктив қаршиликларини ҳамда магнитловчи шохобча қаршиликларининг қийматлари аниқлаб олинади ва унинг эквивалент электр схемаси тузилади. Трансформаторнинг эквивалент электр схемаси унинг ЭЮК лари ва токлари тенгламаларига маънодошдир, яъни эквивалент схемани шу тенгламалар асосида қуриш мумкин ёки эквивалент схема асосида трансформаторнинг асосий тенгламаларини чиқариш мумкин.

Эквивалент электр схеманинг параметрлари тўғри аниқланганда, реал трансформатор ўрнида унинг эквивалент электр схемаси электр тармоғига уланса, бу схема электр тармоғидан шу трансформатор оладиган қувватни олади ҳамда ток кучи ва фаза бўйича силжиш бурчаги ҳам бир хил бўлади. Трансформаторнинг эквивалент схемаси айрим актив ва индуктив қаршиликлардан йиғилади. Электр жиҳатдан берилган трансформаторнинг ўрнини боса оладиган электр схема трансформаторнинг **эквивалент электр схемаси** дейилади. Бу схеманинг ҳар бир қисмида ток ва кучланишни ўлчаш ҳамда лозим бўлганда уларни ҳисоблаб аниқлаш мумкин бўлади.

Реал трансформаторни унинг эквиваленг электр схемаси билан алмаштириш электромагнит процессларни анализ қилишни, турли шароитларда трансформаторнинг қандай ишлашини ўрганишни ва электр тармоғини ҳисоблашни осонлаштиради. Уч фазали трансформаторлар учун эквивалент электр схема унинг фақат битта фазаси учун қурилади. 20-расм, *а* да трансформатор чулғамларининг актив ва индуктив қаршиликлари шартли равишда чулғамлардан ажратиб кўрсатилган, лекин чулғамларнинг ўзаро магнит алоқаси қолдирилган.

Эквивалент схемада трансформаторнинг магнитловчи занжири,



20- расм. Трансформаторнинг эквивалент электр схемаси.

яъни салт ишлаш токи $\dot{I}_0$ ўтадиган қисми ҳам электр қаршиликлари билан тасвирланади. Бунда салт ишлаш токи $\dot{I}_0$ нинг икки қисмдан, яъни токнинг актив қисми $\dot{I}_{0a}$ ва реактив қисми $\dot{I}_{0p}$ дан иборат бўлишини эслаш лозим. Шундай экан, схеманинг магнитловчи шохобчасини параллел уланган актив R_a ва индуктив x_μ қаршиликлар билан ифодалаш мумкин. Ҳақиқатан ҳам ток $\dot{I}_{0a}$ ни актив қаршилик R_a ва реактив ток $\dot{I}_{0p}$ ни индуктив қаршилик x_μ ҳосил қилиши тушунарли (20- расм, *б*). Шундай қилиб, эквивалент схемада трансформаторнинг магнитловчи шохобчасини ҳам актив ва индуктив қаршиликлар билан тасвирлаш мумкин экан.

Иккиламчи чулғам параметрлари бирламчи чулғам ўрамлари сонига келтирилган трансформаторда $k = 1$ бўлгани учун бирламчи чулғам ЭЮК E_1 келтирилган иккиламчи чулғам ЭЮК E_2' га тенг бўлади. Демак, эквивалент схемадаги нуқталар „А" ва „а" ҳамда „Х" га „х" бир хил потенциалга эга бўлади, шу асосда бу нуқталарни бирлаштириш мумкин, бундай схема 20- расм, *б* да келтирилган. Маълумки, параллел уланган қаршиликларни (R_a ва x_μ) уларга эквивалент бўлган, кетма-кет уланган қаршиликлар билан алмаштириш мумкин. Кўп ҳолларда магнитловчи

занжирнинг параллел уланган қаршиликлари кетма-кет уланган қаршиликлар билан (R_0 ва x_0) алмаштирилади. Бундай схемадан фойдаланиш анча қулай. Шундай қилиб, келтирилган трансформаторнинг амалда кенг ишлатиладиган Т симон эквивалент электр схемаси олинади (20-расм, *в*). Бу схема учта шохобчадан иборат:

1) қаршиликлари R_1 ва x_1 ҳамда токи $\dot{I}_1$ бўлган бирламчи чулғамга тегишли шохобча;

2) қаршиликлари R_2' ва x_2' ҳамда токи $(-\dot{I}_2')$ бўлган иккиламчи чулғамга тегишли шохобча;

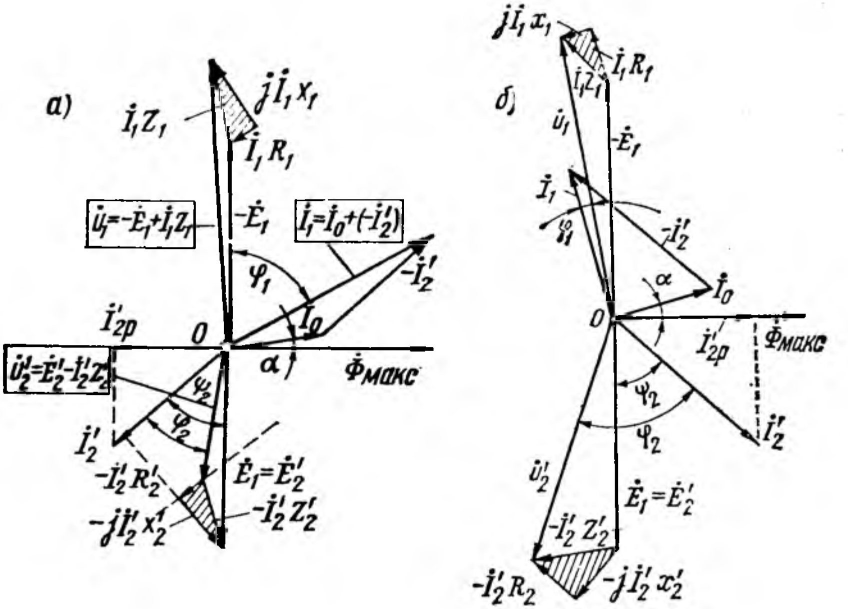
3) қаршиликлари R_0 ва x_0 ҳамда токи $\dot{I}_0$ бўлган магнит занжирига тегишли шохобча.

Бу схемадаги токлар I_1 ва $-I_2'$ га бирламчи ва иккиламчи чулғам контурларидан ўтадиган контур токлари сифатида қараш мумкин. Схемадаги истеъмолчи қаршилигини ($z_н$ ёки $R_н$ ва $x_н$) нолдан чексизгача ўзгартириб, трансформаторнинг қисқа туташиш ва нагрузкасиз ишлаш режимларига оид схемаларни олиш мумкин. Трансформаторнинг эквивалент электр схемасида нагрузка қаршилигидан бошқа ҳамма параметрлар ўзгармасдир Бу ўзгармас параметрларнинг қийматлари трансформаторнинг нагрузкасиз ишлаш ва қисқа туташиш шароитида ишлаш тажрибаларидан аниқланади.

11. Нагрузка билан ишлаётган трансформаторнинг вектор диаграммаси

Нагрузка билан ишлаётган трансформаторнинг ЭЮК лари ва токлари тенгламалари асосида ёки эквивалент электр схемаси асосида вектор диаграмма қуриш мумкин. Вектор диаграмма чулғамлардаги кучланиш ва токларнинг ўзаро боғланишларини тушунарли тасвирлайди. Вектор диаграмма қуришдан олдин, турли катталиклар учун, масштаб танланади. Номаълум катталиклар бизга маълум формулалар ёрдамида аниқланади. Магнит оқимининг қиймати (1—6) формуладан аниқланади. Вектор диаграмма 0 нуқтадан бирор йўналишда, масалан, горизонтал йўналишда магнит оқимининг векторини чизишдан бошланади (21-расм, *а*). Магнитловчи ток ёки салт ишлаш токи $\dot{I}_0$ магнит оқимининг векторидан бурчак α га олдинда келадиган қилиб чизилади. Бирламчи чулғам ЭЮК нинг вектори $\dot{E}_1$ магнит оқимининг векторидан 90° орқада қолади. Иккиламчи чулғамнинг келтирилган ЭЮК вектори $\dot{E}_2'$ қиймати бўйича $\dot{E}_1$ га тенг ва у билан бир хил йўналган. Иккиламчи чулғамнинг келтирилган токи қуйидагича аниқланади:

$$\dot{I}_2' = \dot{I}_2 \frac{1}{K} = \frac{\dot{E}_2'}{\sqrt{(R_2' + R_н')^2 + (x_2' + x_н')^2}}, \qquad (1\text{-}35)$$



21-расм. Нагрузкаси актив-индуктив (*а*) ва актив-сиғим (*б*) қаршиликлардан иборат бўлган трансформаторнинг вектор диаграммаси.

бу ерда $R_н'$ ва $x_н'$ — иккиламчи чулғамга уланган нагрузканинг келтирилган актив ва реактив қаршиликлари.

Ток $\dot I_2'$ нинг йўналиши нагрузка характерига боғлиқ. Агар нагрузка актив ва индуктив қаршиликлардан иборат бўлса, $\dot I_2'$ вектор $\dot E_2'$ вектордан бурчак ψ_2 га орқада қоладиган қилиб чизилади. Бу бурчак қиймати қуйидагича аниқланади:

$$\psi_2 = \operatorname{arctg}\frac{x_2' + x_н'}{R_1' + R_н'}. \qquad (1\text{-}36)$$

Истеъмолчиларга бериладиган иккиламчи чулғамнинг келтирилган кучланиш $\dot U_2'$ вектори $\dot E_2'$ вектордан шу чулғамнинг актив ва индуктив қаршиликларида кучланиш пасайишлари $\dot I_2' R_2'$ ва $j\dot I_2' x_2'$ векторларининг айирмаси билан аниқланади. Бунда $j\dot I_2' x_2'$ вектор $\dot I_2'$ вектордан 90° олдинда чизилади. Бу векторни $\dot E_2'$ векторнинг охиридан бошлаб чизамиз. Бунинг учун $\dot E_2'$ вектор охиридан $\dot I_2'$ векторга ёки унинг давомига тик чизиқ туширамиз. $j\dot I_2' x_2'$ вектор шу тик чизиқда ётади. Актив қаршиликдаги кучла-

ниш пасайиши $\dot{I}_2'R_2'$ вектор $\dot{I}_2^2$ токнинг вектори йўналишида чизилади. Бунинг учун $j\dot{I}_2'x_2'$ вектор охиридан $\dot{I}_2'$ векторга параллел чизиқ чизамиз. $\dot{I}_2'R_2'$ вектор ана шу чизиқда ётади. Диаграммада $j\dot{I}_2'x_2'$ ва $\dot{I}'R_2'$ векторларнинг йўналиши шартли танланади. $\dot{I}_2'R_2'$ вектор охирини $\dot{E}_2'$ вектор охири билан бирлаштириб, иккиламчи чулғамнинг тўла қаршилигида кучланиш пасайиши векторини, яъни $\dot{I}_2' \cdot z_2'$ векторни оламиз.

Диаграммада кучланиш пасайишлари учбурчаги жуда кичкина бўлади. Энди $\dot{I}_2'R_2'$ вектор охирини *0* нуқта билан бирлаштириб $\dot{U}_2$ векторни оламиз Нагрузка характери актив-индуктив бўлгани учун $\dot{U}_2$ вектор $\dot{I}_2'$ вектордан φ_2 бурчакка олдинда бўлади.

Бирламчи чулғам токи $\dot{I}_1$ векторини аниқлаш учун, нагрузка билан ишлаётган трансформаторнинг токлари тенгламаси $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2')$ асосида $\dot{I}_0$ векторга $(-\dot{I}_2')$ векторни қўшамиз. Бунинг учун $\dot{I}_0$ вектор охиридан йўналиши бўйича $\dot{I}_2'$ га тескари, лекин қиймати жиҳатдан унга тенг бўлган $(-\dot{I}_2')$ векторни чизамиз. Бу вектор учини *0* нуқта билан бирлаштириб ток $\dot{I}_1$ векторини оламиз.

Диаграммада тармоқ кучланиши вектори $\dot{U}_1$ трансформаторнинг салт ишлаш шароити учун қурилган вектор диаграммада кўрсатилган йўл билан аниқланади. Бунинг учун нуқта 0 дан $\dot{E}_1$ векторга тенг ва унга қарама-қарши йўналган $-\dot{E}_1$ векторни чизамиз. Бу вектор охиридан $\dot{I}_1$ вектор йўналишида бирламчи чулғамнинг актив қаршилигидаги кучланиш пасайишини, яъни $\dot{I}_1R_1$ векторни; $j\dot{I}_1x_1$ векторни эса $\dot{I}_1$ векторга нисбатан 90° олдинда чизамиз ва $j\dot{I}_1x_1$ вектор охирини *0* нуқта билан бирлаштириб, тармоқ кучланиши $\dot{U}_1$ векторини ҳосил қиламиз. Энди $\dot{U}_1$ вектор охирини вектор $-\dot{E}_1$ охири билан бирлаштириб, бирламчи чулғамнинг тўла қаршилигидаги кучланиш пасайиши $\dot{I}_1z_1$ векторини оламиз. Иккиламчи чулғамга уланган нагрузка актив-индуктив характерда бўлса, иккиламчи чулғам токининг реактив қисми (бу ток магнитловчи токка нисбатан тескари йўналган бўлгани учун) трансформатор пўлат ўзагини магнитсизлайди. Нагрузка актив-индуктив характерда бўлгани учун диаграммада $\dot{U}_1$ вектор $\dot{I}_1$ векторга нисбатан φ_1 бурчакка олдинда бўлади. 21-расм, *а* да нагрузкаси актив-индуктив характерда бўлган трансформаторнинг вектор диаграммаси чизилган.

Магнитловчи ток ва трансформатор чулғамларининг индуктив қаршиликлари таъсирида вектор диаграммада φ_1 бурчак φ_2 бурчакдан катта бўлади. Натижада трансформаторда бирламчи чулғам занжирида қувват коэффициенти $\cos\varphi_1$ иккиламчи чулғам қувват коэффициентидан, яъни $\cos\varphi_2$ дан кичикроқ бўлади.

21-расм, *б* да нагрузка актив-сиғим характерда бўлган трансформаторнинг вектор диаграммаси кўрсатилган. Диаграммани қуриш йўли юқорида кўрсатилгандек бўлса ҳам нагрузка характери бошқача бўлгани учун унинг кўриниши ҳам бошқача. Бу диаграммада $\dot{I}'_2$ вектор вектор $\dot{E}'_2$ дан ψ_2 бурчакка олдинда чизилади. Бурчакнинг катта ёки кичиги актив ва сиғим қаршиликларнинг қийматларига боғлиқ бўлади ва қуйидаги формула билан аниқланади:

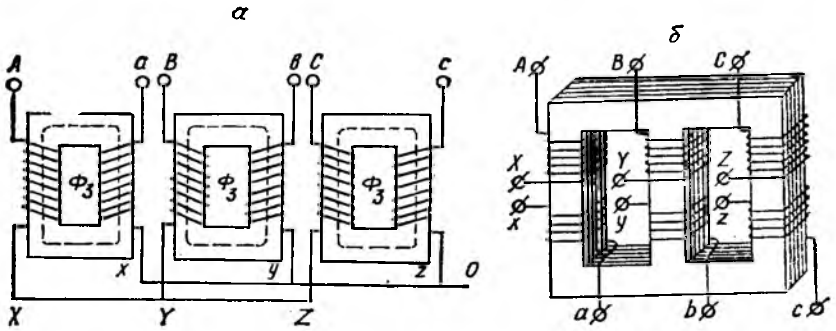
$$\psi_2 = \operatorname{arctg}\frac{x'_2 - x'_н}{R'_2 + R'_н}. \qquad (1\text{-}37)$$

Сиғим қаршилиги каттароқ бўлганда бу қаршиликда кучланиш пасайиши иккиламчи чулғамнинг сочилма индуктив қаршилигидаги кучланиш пасайиши билан компенсацияланади. Бу ҳолда $\dot{U}'_2$ вектор вектор $\dot{E}'_2$ дан каттароқ бўлиши мумкин. Бундан ташқари, иккиламчи чулғам токининг реактив қисми ($\dot{I}'_{2р} = \dot{I}'_2 \cdot \sin\psi_2$) салт ишлаш токининг реактив қисми билан бир фазада бўлганлиги учун у ферромагнит ўзакни қўшимча магнитлайди; натижада бирламчи чулғам токи худди шундай қийматли актив-индуктив характердаги истеъмолчига уланган трансформатор токидан кичикроқ бўлади. Умуман, трансформаторнинг вектор диаграммаси унда бўладиган иш процессларини ўзида тўла акс эттиради.

12. Уч фазали трансформатор

Ҳозирги вақтда турли хил электр станцияларда электр энергияси уч фазали ток сифатида ишлаб чиқарилмоқда. Ишлаб чиқарилган электр энергиясини узоқ масофаларга узатиш учун ток кучланиши уч фазали трансформаторлар ёрдамида кўп марта оширилмоқда. Истеъмолчилар подстанцияларида эса кучланишни пасайтирувчи уч фазали трансформаторлардан кенг фойдаланилмоқда. Умуман, истеъмолчиларни электр энергияси билан узлуксиз таъминлашда уч фазали трансформаторларнинг аҳамияти жуда катта.

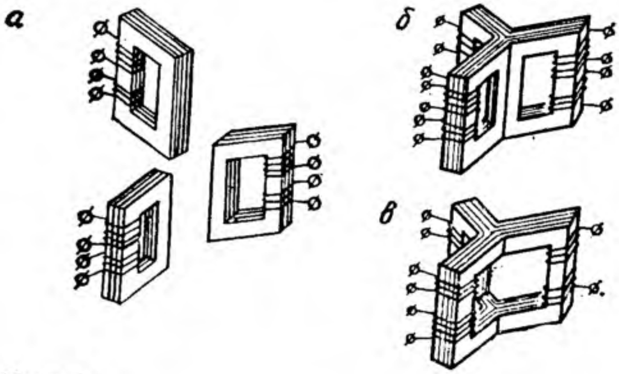
Уч фазали ўзгарувчан ток кучланишининг қийматини бир группага бирлашган учта бир фазали (22-расм, *а*) ёки битта уч фазали (22-расм, *б*) трансформатор ёрдамида ўзгартириш мумкин. Уч фазали электр тармоғи системасида учта бир фазали трансформаторнинг чулғамлари бизга маълум бўлган усулларда уланиб ишлатилади. Бунда улар бир бутун агрегат сифатида ишлайди. Бир фазали трансформаторлар группасининг габаритлари катта, вазни оғир ва таннархи қиммат бўлганлиги сабабли улар



22- расм.

фақат катта қувватли марказий подстанциялардагина ишлатилади. Учта бир фазали трансформатордан тузилган уч фазали трансформаторнинг магнит системаси ўзаро боғланмаган бўлади (22-расм, *а*). Агар учта бир фазали трансформаторнинг паст ва юқори кучланиш чулғамлари ферромагнит ўзакнинг бир томонидаги стерженга ўралса ва чулғамлар ўралмаган стерженларни бир нуқтага бирлаштирсак, симметрик магнит занжир ҳосил бўлади (23- расм, *б*).

Уч фазали трансформаторнинг бирламчи чулгамига бериладиган уч фазали кучланиш чулғамларда уч фазали ток ҳосил қилади. Уч фазали ток трансформаторнинг ферромагнит ўзагида амплитудалари тенг бўлган ва бир-биридан 120° га силжиган учта магнит оқими ҳосил қилади. Демак, бунда бир нуқтага бирлашган учта чулғамсиз стерженлардан уч фазали магнит оқимининг йиғиндиси ўтади. Уч фазали системада истеъмолчи юлдуз усулида уланганда ва линия симларида токлар ўзаро тенг бўлганда ноль симда токлар йиғиндиси нолга тенг бўлганидек, бир нуқтага бирлашган магнит оқимларининг йиғиндиси ҳам нолга тенг бўлади. Бу ҳолда бир нуқтага бирлашган чулғамсиз учта стер-



23- расм.

жень ташлаб юборилса ҳам бўлади. Бунда 23-расм, *в* да кўрсатилган уч стерженли симметрик магнит занжирни оламиз. Бундай мураккаб шаклга эга бўлган ферромагнит ўзакни тайёрлаш анча қийин. Шунинг учун амалда уч фазали трансформаторларда 22-расм, *б* да кўрсатилган уч стерженли носимметрик магнит занжирли ферромагнит ўзак ишлатилади.

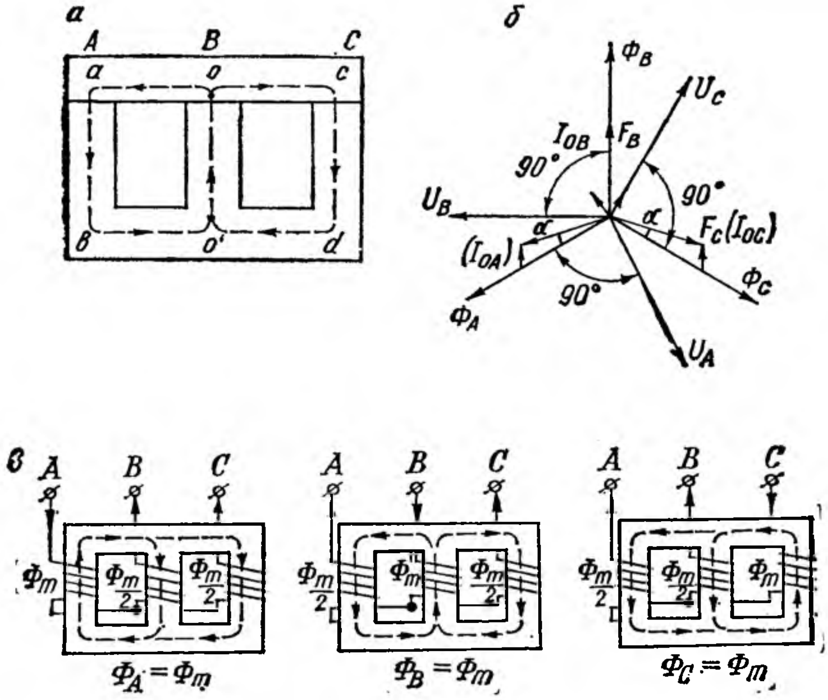
Уч фазали трансформаторни рус инженери Михаил Осипович Доливо-Добровольский 1891 йилда ихтиро қилган. Уч фазали трансформатор уч стерженли ферромагнит ўзак ҳамда паст ва юқори кучланишли чулғамлардан тузилади. Ферромагнит ўзак учта стержень ва уларни паст ҳамда юқори томондан бирлаштирувчи иккита ярмодан иборат (7-расм, *а*). Бундай ферромагнит ўзакнинг стерженлари бир текисликда ётади ва носимметрик магнит занжири ҳосил қилади. Уч стерженли магнит занжирда айрим фазаларга тегишли қисмларининг узунлиги бир хил эмас; ўртадаги стерженда магнит занжирининг узунлиги четки стерженларнинг магнит занжири узунлигидан қисқа.

Уч стерженли трансформаторда уч фазали ток ҳосил қиладиган уч фазали магнит оқимлари ўзаро 120° га силжиган; вақтнинг исталган пайтида бу оқимларнинг максимал (ёки оний) қийматларининг йиғиндиси нолга тенг, яъни:

$$\dot{\Phi}_{Am} + \dot{\Phi}_{Bm} + \dot{\Phi}_{Cm} = 0. \qquad (1\text{-}38)$$

Ферромагнит ўзакда бу оқимлар ярмонинг *0* ва *0'* нуқталарида туташади (24-расм, *а*). Бунда $\dot{\Phi}_В$ магнит оқимининг ўтадиган йўли оқимлар $\dot{\Phi}_А$ ва $\dot{\Phi}_С$ нинг ўтадиган йўлига қараганда қисқароқ; шунинг учун ўзак шу қисмларининг магнит қаршиликлари ҳам ҳар хил бўлади. Натижада салт ишлаш токларининг қийматлари айрим фазаларда тенг бўлмайди, лекин айрим фаза чулғамларининг ўрамлари сони тенг. Амалда ток $\dot{I}_{ОВ}$ нинг қиймати токлар $\dot{I}_{ОА}$ ва $\dot{I}_{ОС}$ га қараганда кичикроқ бўлади. Магнит оқимлари ўзаро 120° га силжиган бўлса ҳам, лекин ток $\dot{I}_{ОВ}$ билан токлар $\dot{I}_{ОА}$ ва $\dot{I}_{ОС}$ орасидаги силжиш бурчаги 120° дан кичикроқ бўлади (24-расм, *б*). Бунинг натижасида векторлар $\dot{I}_{ОА}$ ва $\dot{\Phi}_А$ ҳамда $\dot{I}_{ОС}$ ва $\dot{\Phi}_С$ ўзаро бурчак α га силжиган бўлади. Ток $\dot{I}_{ОА}$ $\dot{\Phi}_А$ дан бурчак α га орқада қолади; ток $\dot{I}_{ОС}$ $\dot{\Phi}_С$ вектордан бурчак α га олдинда бўлади. Трансформаторда магнит оқимининг вектори тармоқ кучланиши векторидан 90° кейинда бўлади (24-расм, *б*).

Магнит оқими $\dot{\Phi}_А$ ўзакнинг *oabo'* (24-расм, *а*) контуридан ўтганда магнит потенциалининг пасайиши $\dot{\Phi}_А(R_{СТ} + 2R_Я)$ га тенг бўлади. Бу ерда: $R_{СТ}$ — стерженнинг магнит қаршилиги; $R_Я$ —



24- расм.

пастки ёки устки ярмо ярмининг магнит қаршилиги. Фаза C га тегишли стержень учун $\Phi_C(R_{ст}+2R_я)$; лекин фаза B га тегишли стержень учун магнит потенциалининг пасайиши $\Phi_B\ R_{ст}$ га тенг бўлади. Агар магнит оқимлар $\dot{\Phi}_A$, $\dot{\Phi}_B$ ва $\dot{\Phi}_C$ ни ҳосил қилувчи магнитловчи кучлар мос ҳолда $\dot{F}_A$, $\dot{F}_B$ ва $\dot{F}_C$ бўлса, (амплитуда қийматлари) Кирхгофнинг иккинчи қонуни асосида магнит занжирининг контурлари учун тенглама тузиш мумкин:

$OabO'$ контури учун: $\Phi_A(R_{ст}+2R_я)-\Phi_B R_{ст}=F_A-F_B$,

$OcdO'$ контури учун: $\Phi_C(R_{ст}+2R_я)-\Phi_B R_{ст}=F_C-F_B$.

Маълумки, ноль сими бўлмаган уч фазали системада токларнинг ва шунга мос ҳолда магнит юритувчи кучларнинг алгебраик йиғиндиси нолга тенг, яъни:

$$\dot{F}_A+\dot{F}_B+\dot{F}_C=0.$$

Олинган тенгламаларни F_A, F_B ва F_C ларга нисбатан ечиб, қуйидагиларни оламиз:

$$F_A=(R_{ст}+2R_я)\Phi_A+2/3R_я\Phi_B; \qquad (1\text{-}39)$$

$$\dot{F}_В = R_{ст}\dot{\Phi}_В + 2/3R_я\dot{\Phi}_В; \qquad (1\text{-}40)$$

$$\dot{F}_С = (R_{ст} + 2R_я)\dot{\Phi}_С + 2/3R_я\dot{\Phi}_В. \qquad (1\text{-}41)$$

(1-40) тенгламадан кўриниб турибдики, магнитловчи куч $\dot{F}_В$ фақат магнит оқими $\dot{\Phi}_В$ га боғлиқ. Демак $\dot{F}_В$ вектор фазаси бўйича оқим $\dot{\Phi}_В$ билан бир йўналишда бўлади. Лекин магнитловчи кучлар $\dot{F}_А$ ва $\dot{F}_С$ эса иккита магнитловчи кучнинг геометрик йиғиндиси билан аниқланади. Булардан бири асосий оқим $\dot{\Phi}_А$ ёки $\dot{\Phi}_С$ билан бир хил йўналишда, бошқаси эса магнит оқими $\dot{\Phi}_В$ йўналишида бўлади (24-расм, *б*). Шунинг учун ҳам магнитловчи куч $\dot{F}_А$ оқим $\dot{\Phi}_А$ дан қандайдир бурчак α га кейинда бўлади; магнитловчи куч $\dot{F}_С$ эса оқим $\dot{\Phi}_С$ дан бурчак α га олдинда бўлади.

Шундай қилиб, магнитловчи кучлар $\dot{F}_А$, $\dot{F}_В$ ва $\dot{F}_С$ ва, демак, магнитловчи токлар $\dot{I}_{ОА}$, $\dot{I}_{ОВ}$ ва $\dot{I}_{ОС}$ носимметрик система ҳосил қилади. Бунда $F_А = F_С > F_В$ ёки мос ҳолда $I_{ОА} = I_{ОС} > I_{ОВ}$ бўлади. Демак, уч стерженли уч фазали трансформаторнинг бирламчи чулғамига уч фазали симметрик кучланиш берилса ҳам айрим фаза чулғамларида носимметрик салт ишлаш токлари (магнитловчи токлар) ҳосил бўлар экан.

Салт ишлаш токларининг носимметриклиги ферромагнит ўзак алоҳида аҳамиятга эга бўлган кичик қувватли трансформаторларда айниқса сезиларли бўлади. Бунда $I_{ОА} = I_{ОС} = (1{,}2\ldots1{,}5) \times \times I_{ОВ}$ бўлади. Катта қувватли трансформаторларда бу носимметриклик анча текисланади. Уч фазали трансформаторларда салт ишлаш токи сифатида айрим фаза токларининг ўртача арифметик қиймати олинади. Умуман салт ишлаш токининг қиймати кичкина бўлгани учун трансформаторга бир оз нагрузка уланганда салт ишлаш токининг носимметриклиги билинмай қолади. Уч стерженли ферромагнит ўзакда магнит носимметриклигини, яъни чекка фазаларда магнит қаршилигини камайтириш мақсадида ўзак ярмосининг кўндаланг кесими юзаси стерженларнинг кўндаланг кесими юзасига қараганда 10 — 15 % каттароқ олинади. Уч стерженли трансформаторда магнит оқимлари векторларининг геометрик йиғиндиси оний вақтда нолга тенг. Бирор оний вақтда оқим $\dot{\Phi}_А$ ўзининг максимал мусбат қийматига эришса, оқимлар $\dot{\Phi}_В$ ва $\dot{\Phi}_С$ нинг йўналиши тескари, қиймати эса максимал қийматларининг ярмига тенг бўлади (24-расм, *в*).

13. Чулғамларнинг уланиш усуллари

Уч фазали уч стерженли трансформаторда айрим фазаларнинг бирламчи ва иккиламчи чулғамлари битта стерженга ўралади. Уч фазали трансформаторда учта бирламчи (юқори кучланиш) ва учта иккиламчи (паст кучланиш) чулғам бўлади. Юқори кучланиш чулғамларининг бош учлари „А“, „В“, „С“ ва охирги учлари „Х“, „У“. „Z“ ҳарфлари билан, паст кучланиш чулғамларининг бош учлари „а“, „в“, „с“ ва охирги учлари эса „х“, „у“, „z“ ҳарфлари билан белгиланади (25- расм). Агар трансформатор уч чулғамли бўлса, унинг ўртача кучланиш чулғамларининг бош учлари A_m, B_m, C_m ва охирги учлари X_m, $У_m$, Z_m ҳарфлари билан белгиланади. Уч фазали трансформаторнинг паст ва юқори кучланиш чулғамлари, асосан икки хил усулда уланади:

а) юлдуз усулида (25- расм, а), шартли белгиси: Y

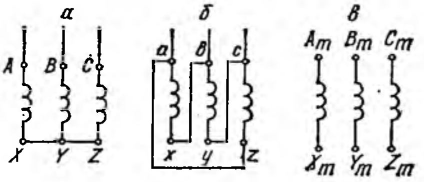
б) учбурчак усулида (25- расм, *б*), шартли белгиси: Δ

Агар трансформаторнинг паст ёки юқори кучланиш чулғамлари юлдуз усулида уланган бўлса ва унинг нейтрал нуқтасидан ноль сим ташқи клеммага чиқарилса, бу клемма *О* ҳарфи билан белгиланади. Бундай юлдуз усулида улашнинг шартли белгиси $\underline{Y}$ бўлади. Уч чулғамли трансформаторда ўртача кучланишга тегишли чулғамнинг нейтрал нуқтасидан чиқарилган клемма O_m ҳарфи билан белгиланади. Уч фазали трансформаторнинг чулғамлари юлдуз усулида уланганда: $\dot{U}_л = \sqrt{3}\dot{U}_ф$; $\dot{I}_л = \dot{I}_ф$ бўлишини ва учбурчак усулида уланганда: $\dot{U}_л = \dot{U}_ф$: $\dot{I}_л = \sqrt{3}\dot{I}_ф$ бўлишини эсдан чиқармаслик керак. Уч фазали электр тармоғида ишлайдиган учта бир фазали трансформатор чулғамларининг учлари юқоридагича белгиланади ҳамда паст ва юқори кучланиш чулғамлари кўрсатилган усулларда уланади. Одатда, уч фазали икки чулғамли трансформаторнинг юқори кучланиш чулғами уланиш усулининг шартли белгиси каср суратида, паст кучланиш чулғамларининг уланиш усулининг шартли белгиси каср махражида кўрсатилади. Масалан:

Y/Y, Y/$\underline{Y}$, Y/Δ, Δ/$\underline{Y}$ ва ҳоказо.

Уч фазали трансформатор чулғамларининг уланиш усулларини амалда тўғри бажариш учун ҳар бир чулғамнинг бош ва охирги учларини аниқ белгилаб олиш лозим. Уч фазали трансформаторларда чулғамларнинг уланиш усуллари техника-иқтисодий мулоҳазалар асосида танланади.

Чулғамлар юлдуз усулида уланганда чулғамнинг ўрамлар сони, учбурчак усулида уланишга қараганда $\sqrt{3}$ марта камроқ бўлишига эришилади, чунки бунда $U_л = \sqrt{3}\,U_ф$. Кичик қувватли трансформаторларнинг чулғамлари кўпин-



25- расм.

ча юлдуз-юлдуз усулида уланади. Катта қувватли трансформаторнинг чулғамлари одатда, юлдуз-учбурчак усулида уланади. Бунда юқори кучланиш чулғами (масалан, юқори кучланиши 35, 110 ва 220 кВ бўлганда) юлдуз усулида ва паст кучланиш чулғамлари (6,10 кВ ли) учбурчак усулида уланади.

Уч фазали трансформаторнинг трансформация коэффициенти, салт ишлаш шароитида, асосан бирламчи ва иккиламчи чулғамлар фаза кучланишларининг нисбати билан аниқланади:

$$K = \frac{U_{AO}}{U_{ao}} = \frac{w_{юк}}{w_{пк}}. \tag{1-42}$$

Умуман, уч фазали трансформаторнинг трансформация коэффициентини икки усулда аниқлаш мумкин: а) фазали трансформация коэффициенти: юқори кучланиш чулғамининг фаза кучланишини паст кучланиш чулғами фаза кучланишига нисбати ёки юқори ва паст кучланиш чулғамларининг ўрамлари сони нисбати билан аниқланади, яъни:

$$K_ф = \frac{U_{ф.юк}}{U_{ф.пк}} = \frac{w_{юк}}{w_{пк}},$$

б) салт ишлаш шароитида юқори ва паст кучланиш чулгамлари линия кучланишларининг нисбати билан ҳам аниқлаш мумкин, яъни

$$K_л = \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{U}_{ab}};$$

Y/Y ва Δ/Δ уланиш схемалари учун фазали кучланишлар бўйича ва линия кучланишлари бўйича трансформация коэффициентлари ўзаро тенг, яъни: $K_л = K_ф$.

Y/Δ уланиш схемаси учун $K_л = \sqrt{3}K_ф$ ва Δ/Y схемаси учун $K_л = \frac{K_ф}{\sqrt{3}}$ бўлади.

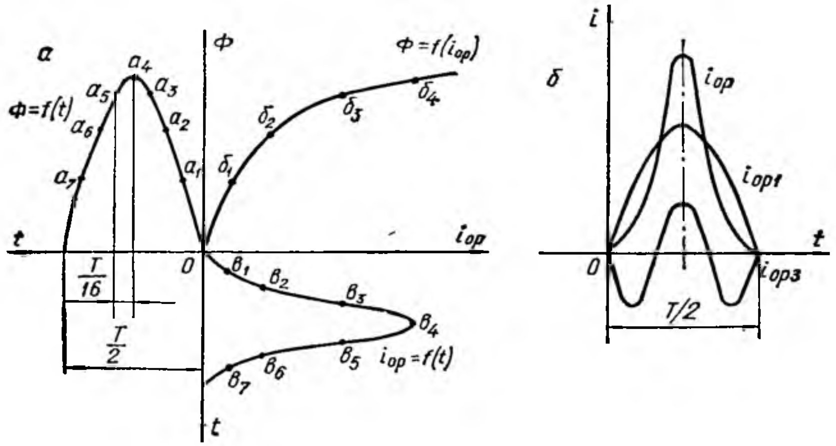
14. Трансформаторнинг ферромагнит ўзаги магнитланаётганда содир бўладиган ҳодисалар

Трансформатор ферромагнит ўзагининг магнитланиш процесси қатор ҳодисалар билан алоқадорки, баъзан бу ҳодисалар трансформаторнинг нормал ишлашига таъсир этиши ҳам мумкин. Шунинг учун ҳам бу ҳодисаларни ўрганиш лозим.

Аввал бир фазали трансформаторнинг салт ишлаш шароитини кўриб чиқамиз. Олдин айтиб ўтилганидек, салт ишлаш токи актив ва реактив қисмлардан иборат бўлади. Бу ток реактив қисмининг, яъни магнитловчи токнинг оний қиймати i_{op} магнит оқими Φ билан ўзаро эгри чизиқли характерда боғланган. Бу боғланиш ферромагнит ўзакнинг магнитланиш эгри чизиғидир. Магнитланиш эгри чизиғининг эгрилиги пўлат турининг магнитланиш хусусиятига, унинг ўлчамларига ва магнит системасининг шакли-

га боғлиқ. $\Phi = f(i_{ар})$ боғланиш 26- расм, *а* да координата ўқларининг ўнг квадратида келтирилган.

Умуман, бирламчи чулғами синусоидал кучланишга уланган трансформаторнинг ферромагнит ўзагида магнит оқими синусоидал ўзгаради, $(\phi = \Phi_m \sin \omega t)$. Лекин магнит оқими синусоидал ўзгарса ҳам, ферромагнит ўзакнинг магнитланиш характеристикаси эгри чизиқли бўлгани учун, магнитловчи ток $i_{ор}$ билан, шу ток ҳосил қилаётган магнит оқими орасидаги богланиш бузилади, яъни магнит оқими синусоидал ўзгарса ҳам магнит тўйиниши сабабли магнитловчи ток $i_{ор}$ нинг ўзгариши синусоидал бўлмайди. Магнит оқимининг вақт бирлиги ичида ўзгариши, яъни $\Phi = f(t)$ эгри чизиғи 26- расм, *а* нинг чап квадрантида келтирилган. $\Phi = f(i_{ор})$ ва $\Phi = f(t)$ эгри чизиқлари орқали салт ишлашдаги магнитловчи токнинг вақт бирлиги ичида ўзгаришининг эгри чизиғини, яъни $i_{ор} = f(t)$ ни аниқлаш мумкин бўлади. Бунинг учун координата ўқларининг ўнг квадрантида $\Phi = f(i_{ор})$ ва чап квадрантида $\Phi = f(t)$ эгри чизиқларини чизиб ҳамда вақт ўқини бир неча қисмга (масалан, бир даврни 8 қисмга) бўламиз. Вақт бўлакларига тўғри келадиган магнит оқимининг қийматларини (a_1, a_2, a_3, a_4 . . . нуқталарни) аниқлаймиз. Бу нуқталар координаталарини магнитланиш эгри чизиғи $\Phi = f(i_{ор})$ га ўтказиб, $б_1$, $б_2$, $б_3$ ва бошқа нуқталарни аниқлаймиз. Иккала эгри чизиқлардаги *а* ва *б* ларга мос нуқталарнинг пастки ўнг квадрантда учрашган нуқталари магнитловчи ток эгри чизиғига тегишли $в_1$, $в_2$, $в_3$ ва бошқа нуқталар бўлади (26- расм). Расмдан кўриниб турибдики, ҳақиқатан ҳам магнит оқими синусоидал бўлганда магнитловчи токнинг ўзгариш эгри чизиғи синусоидал бўлмас экан. Бунинг сабаби бир фазали трансформатор магнитловчи токининг реактив ташкил этувчиси таркибида токнинг асосий гармоникаси $i_{ор1}$ дан ташқари токнинг учинчи ва бешинчи гармоникалари, яъни $i_{ор3}$



26- расм.

ҳамда i_{op5} ва бошқаларнинг борлигидадир (26- расм, б). Юқори легирланган пўлатдан тайёрланган магнит системаларида ҳамда магнит индукцияси Б = 1,4 Т атрофида бўлганда токнинг учинчи гармоникаси биринчи гармониканинг 30 % ни; бешинчи гармоникаси 15 % ни ташкил қилиши мумкин. Бу мулоҳазалар салт ишлаш токининг фақат реактив қисмига, яъни магнитловчи токкагина тегишли, холос. Чунки салт ишлаш токининг актив қисми i_{oa} синусоидал ўзгаради. Лекин салт ишлаш токи актив қисми i_0 нинг жуда оз қисмини (фақат 10 % ини) ташкил қилади. Шунинг учун салт ишлаш токининг ўзгариш эгри чизиғи унинг реактив қисмининг ўзгариш эгри чизиғи каби қолаверади дейиш мумкин.

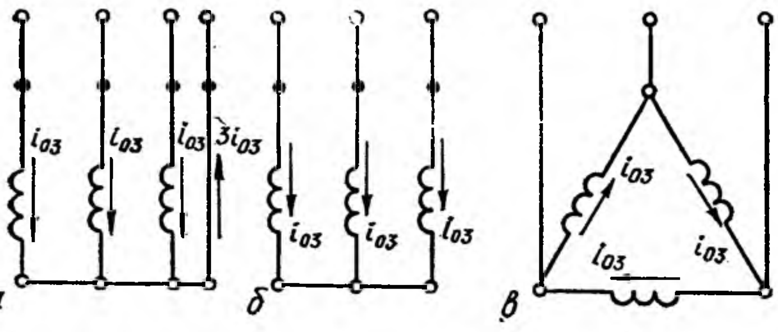
Энди уч фазали трансформаторнинг магнитланиш процессини кўриб чиқамиз. Уч фазали схемаларда ЭЮК лар ва токлар таркибида уларнинг асосий гармоникаларидан ташқари юқори гармоникалар ҳам бўлгани учун (масалан, частотаси $f_3 = 3f_1$ бўлган учинчи гармоника) уларнинг шакли синусоидал бўлмайди. ЭЮК ларнинг учинчи гармоникаси учун қуйидаги тенгламаларни ёзиш мумкин:

$$\left.\begin{aligned} E_{A3} &= E_{3m}\sin 3\omega t, \\ E_{B3} &= E_{3m}\sin 3(\omega t - 120^\circ) = E_{3m}\sin 3\omega t, \\ E_{C3} &= E_{3m}\sin 3(\omega t - 240^\circ) = E_{3m}\sin 3\omega t. \end{aligned}\right\} \quad (1\text{-}43)$$

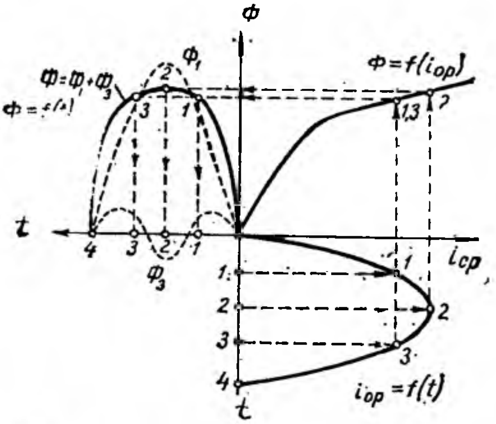
Демак, турли фазаларда учинчи гармоника ЭЮК лари ўзаро тенг ва фазалари бир хил экан. Учинчи гармоника ЭЮК ларининг таъсири чулғамларнинг уланиш усулларига боғлиқ. Бирламчи чулғамлар юлдуз усулида уланганда, учинчи гармониканинг фаза ЭЮК лари, уларнинг айирмаси билан аниқланадиган учинчи гармониканинг линия ЭЮК ларини ташкил қилмайди. Чунки учинчи гармоника фаза ЭЮК лари ўзаро тенг ва бир хил йўналгандир. Шунинг учун вақтнинг исталган пайтида уларнинг айирмаси доимо нолга тенг бўлади. Демак, учинчи гармоника кучланиши линия кучланишида ҳам, ток таркибида ҳам бўлмайди. Салт ишлаш токи таркибида учинчи гармоника токининг бўлмаслиги магнит оқимининг вақт бўйича ўзгариш эгри чизиғи эгрилигини оширади. Ферромагнит ўзакда магнит оқими синусоидал бўлмайди ва унинг таркибида учинчи гармоника магнит оқими бўлади (бу ҳақда кейинроқ яна тўхталамиз).

Агар уч фазали трансформаторнинг бирламчи чулғами ноль симли юлдуз усулида уланган бўлса, унинг айрим фаза чулғамларидан токнинг учинчи гармоникаси i_{op3} ўтади. Ноль симдан эса учинчи гармоника токларининг йиғиндиси, яъни $3i_{op3}$ ўтади (27-расм, *а*). Агар чулғамлар ноль симсиз юлдуз усулида уланган бўлса, учинчи гармоника токлари учун берк занжир йўқ, шунинг учун салт ишлаш токи таркибида учинчи гармоника токлари бўлмайди (27- расм, *б*).

Магнит оқимининг ўзгариш эгри чизиғини ҳосил қилиш учун координата ўқининг ўнг томондаги пастки квадрантида $i_{op} = f(t)$ эгри чизиғини чизамиз. Ток таркибида уч ва унга каррали гар-



27- расм.



28- расм.

моникалар бўлмаса, унинг шакли деярли синусоидал бўлади (28-расм). Юқоридаги ўнг квадрантга магнитланиш эгри чизиғи, яъни $\Phi = f(i_{op})$ ни чизамиз. Токнинг ўзгариш ярим даврини бир неча бўлакларга бўлиб (масалан, тўрт бўлакка), бу бўлаклар ординаталарини аниқлаймиз, бу нуқталарни магнитланиш эгри чизиғи $\Phi = f(i_{op})$ га ўтказамиз ва юқоридаги чап квадрантда шу нуқталарга мос келадиган магнит оқими эгри чизиғининг нуқталарини аниқлаймиз. Олинган нуқталарни бирлаштириб, $\Phi = f(t)$ эгри чизиғи синусоидал эмаслигини кўрамиз. Чунки магнит оқими таркибида биринчи гармоника магнит оқими Φ_1 билан бирга учинчи гармоника магнит оқими Φ_3 ҳам бўлади (28-расм). Оқимнинг учинчи гармоникаси трансформатор ишига таъсир этади ва натижада ЭЮК лар E_1 ва E_2 таркибида учинчи гармоника ЭЮК лари ҳосил бўлади ва уларнинг шакли синусоидал бўлмайди. Лекин уч стерженли трансформаторда айрим фазаларнинг учинчи гармоника магнит оқимлари Φ_3 нинг йўналиши бир хил бўлади. Улар ферромагнит ўзак орқали туташмайди, балки ҳаво ва трансформа-

тор баки деворлари ёки унинг қопқоғи орқали туташади. Бундай туташишда магнит қаршилиги катта бўлгани учун оқимнинг учинчи гармоникаси унча катта бўлмайди. Шунинг учун ЭЮК ларнинг ўзгариш эгри чизиғи деярли синусоидал бўлади. Амалда учинчи гармоника магнит оқимлари фақат бак деворларида уюрма токлар таъсирида исроф бўладиган қувватни аниқлаш мақсадида эътиборга олинади.

Агар трансформаторнинг бирламчи ёки иккиламчи чулғами учбурчак усулида уланса, учинчи гармоника ЭЮК лари айрим фаза чулғамларининг берк контурида учинчи гармоника токларини ҳосил қилади (27- расм, *в* га қаранг). Бу токларнинг йўналиши бир хил бўлади, чунки айрим фаза чулғамлари кетма- кет уланган берк контур ҳосил қилади. Натижада синусоидал магнит оқими ҳосил бўлиши учун шароит яратилади, трансформаторнинг ЭЮК лари E_1 ва E_2 синусоидал бўлади.

Бир группага бирлашган учта бир фазали трансформаторнинг магнит занжири ўзаро боғланмаганлиги учун магнит оқимининг учинчи ва унга каррали гармоникалари (биринчиси ҳам) магнит ўтказгич орқали туташади. Бундай туташишда магнит қаршилиги кичкина. Шунинг учун учинчи гармоника магнит оқими ва ЭЮК катта бўлади. Бир фазали трансформаторлар группасида трансформатор пўлатининг расмий тўйинишида учинчи гармоника ЭЮК биринчи гармониканинг 50 ... 60 % ни ташкил қилади. Трансформаторларда бу ҳол фаза кучланишини ошириб юборади. Шунинг учун бир группага бирлашган бир фазали трансформаторларда чулғамларни юлдуз-юлдуз усулида улаб ишлатишдан фойдаланилмайди.

III БОБ. ТРАНСФОРМАТОР ПАРАМЕТРЛАРИНИ ТАЖРИБА ЎТКАЗИШ ЙЎЛИ БИЛАН АНИҚЛАШ

Олдинги параграфларда бир фазали трансформаторнинг турли шароитларда ишлаши, бу шароитлар учун унинг асосий тенгламалари ва бошқа муҳим масалалар билан муфассал танишдик Ҳар қандай трансформатор заводда тайёрлангандан сўнг, лаборатория шароитида тажриба ўтказиш йўли билан унинг турли шароитларда ишлаши текшириб кўрилади. Бу тажрибалардан аниқланган маълумотлар трансформаторнинг паспортида кўрсатилади. Умуман, трансформаторлар узоқ вақт ишлашга мўлжаллаб тайёрланади. Лекин вақти- вақти билан унинг қандай ишлаши ва муҳим параметрлари текшириб турилади. Электр тармоғини ҳисоблашда трансформаторнинг эквивалент электр схемасига тегишли параметрларини аниқлаш талаб қилинади. Кўпинча капитал ремонтдан ёки ички бузилишлардан сўнг лаборатория шароитида, трансформаторнинг асосий параметрларини аниқлаш мақсадида, турли шароитларда ишлатиб тажрибалар ўтказилади. Бу тажрибалар салт ишлаш ва қисқа туташиш тажрибаларидир. Бу тажрибалардан олинган маълумотлар трансформаторнинг паспортида кўрсатилган маълумотлар билан солиштирилади ва ишлашга яроқлилиги аниқланади.

15. Трансформаторни салт ишлатиб тажриба ўтказиш

Трансформаторнинг трансформация коэффициентини, унинг ферромагнит ўзагида, яъни пўлат ўзагида исроф бўладиган қувват қийматини, эквивалент электр схемасининг айрим параметрларини ва бошқа қатор катталикларни аниқлаш мақсадида салт ишлатиш тажрибаси ўтказилади. Бир ва уч фазали трансформаторлар учун салт ишлатиш тажрибасини ўтказиш схемалари 29- расм, *а* ва *б* да келтирилган. Схемани йиғиш учун лозим бўлган ўлчов приборлари танланади. Тажриба ўтказилаётган пайтда трансформаторнинг бирламчи чулғамига кучланиш автотрансформатор ёки индукцион регулятор орқали берилади, иккиламчи чулғами клеммаларига истеъмолчи уланмайди. Одатда, куч трансформаторининг паст кучланишли чулғами тармоққа уланади. Тажриба ўтказилаётган пайтда трансформаторнинг бирламчи чулғамида кучланиш нолдан $U_1 = 1{,}1U_{1н}$ гача ўзгартирилади. Кучланишнинг бир неча қийматлари учун ҳамма электр ўлчов приборларининг кўрсатаётган катталиклари ёзиб олинади. Масалан, бирламчи ва иккиламчи чулғам кучланишлари U_1 ва U_{20}, салт ишлаш токи I_0, салт ишлаш қуввати P_0.

Салт ишлаш тажрибаси асосида қуйидагилар ҳисоблаб аниқланади:

1) Трансформаторнинг трансформация коэффициенти

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}},$$

2) салт ишлаш токи бирламчи чулғам номинал токига нисбатан процент ҳисобида:

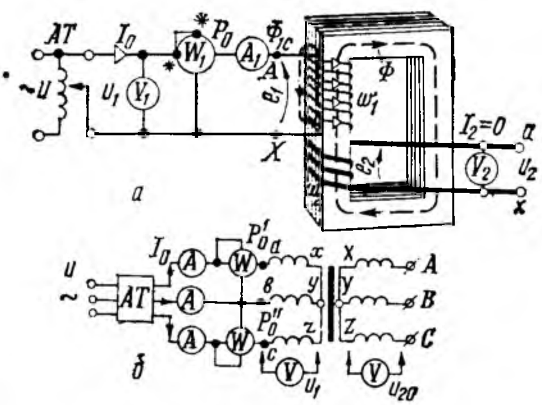
$$i\% = \frac{I_0}{I_{1н}} \cdot 100\,\%, \qquad (1\text{-}44)$$

3) салт ишлаш қуввати; бирламчи чулғам занжирига уланган ваттметр билан аниқланади. Уч фазали трансформаторда икки ваттметрли схема бўйича аниқланади (29- расм, *б*);

4) магнитловчи шохобчанинг актив қаршилиги

$$P_0 = mI_0^2R_0 \approx mI_0^2(R_1 + R_m), \qquad (1\text{-}45)$$

бу ерда: m — фазалар сони; $R_0 = R_1 + R_m$, лекин $R_m \gg R_1$ бўлади.



29- расм. Салт ишлаш тажрибаси учун схема:

а — бир фазали трансформатор, *б* — уч фазали трансформатор.

Шунинг учун

$$P_0 \approx m I_0^2 R_m.$$

Бундан

$$R_m = \frac{P_0}{I_0^2 m} \approx R_0. \qquad (1\text{-}46)$$

5) магнитловчи шохобчанинг тўла қаршилиги қуйидаги шарт асосида аниқланади: $z_0 = z_1 + z_m = \frac{U_1}{I_0}$, лекин $z_m \gg z_1$, шунинг учун

$$z_m = \frac{U_1}{I_0} \approx z_0, \qquad (1\text{-}47)$$

6) магнитловчи шохобчанинг индуктив қаршилиги

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - R_m^2} \approx x_0 \qquad (1\text{-}48)$$

бу ерда R_m, x_m, z_m — магнит занжирининг параметрлари;
R_0, x_0, z_0 — салт ишлаш параметрлари.

Агар трансформатор уч фазали бўлса, салт ишлатиш тажрибаси ўтказилаётган пайтда унинг чулғамлари юлдуз усулида уланади. Ҳар бир фазада салт ишлаш токи ва фаза кучланишлари ўлчанади ва уларнинг ўртача қийматлари қуйидагича аниқланади:

$$I_0 = \frac{I_{0a} + I_{0в} + I_{0c}}{3}, \qquad (1\text{-}49)$$

$$U_1 = \frac{U_{1a} + U_{1в} + U_{1c}}{3}. \qquad (1\text{-}50)$$

Трансформаторнинг салт ишлаш қувват коэффициенти қуйидагича аниқланади, бир фазали трансформатор учун:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 \cdot I_0}, \qquad (1\text{-}51)$$

уч фазали трансформатор учун:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0' + P_0''}{\sqrt{3}\, U_{1л} I_0} = \frac{P_0}{\sqrt{3}\, U_л I_0} \qquad (1\text{-}52)$$

бу ерда: I_0 ва U_1 — салт ишлаш токи ва фаза кучланишининг ўртача қийматлари;
P_0', P'' — икки ваттметрли схемада ваттметрларнинг кўрсатишлари.

Трансформатор салт ишлаганда унинг фойдали қуввати нолга тенг. Лекин у тармоқдан қандайдир қувват олади. Бу қувват салт ишлаш қуввати (P_0) дейилади. Салт ишлаш қуввати, асосан, трансформатор пўлат ўзагидан магнит исрофига сарфланади. Лекин бирламчи чулғамдан салт ишлаш токи I_0 ўтганда қувватнинг бир қисми чулғамнинг актив қаршилигида иссиқликка айланади. Салт ишлаш токи ва бирламчи чулғамнинг актив қаршилиги R_1

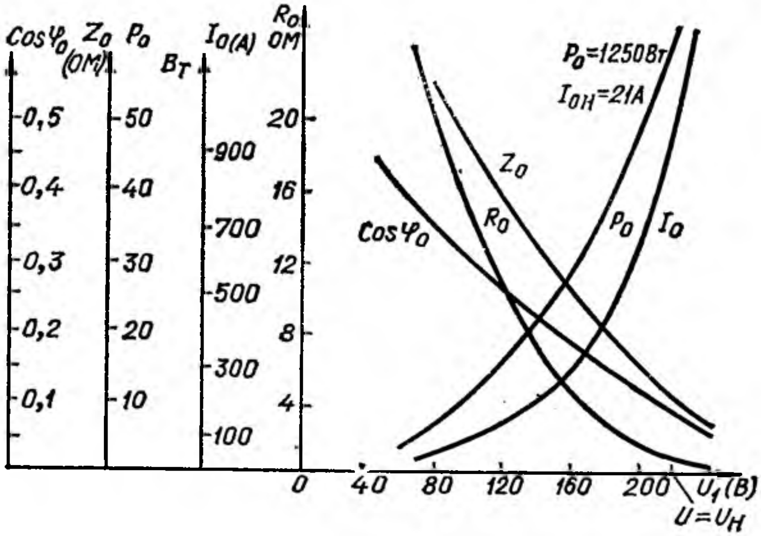
кичкина бўлгани учун қувват исрофи $I_0^2R_1$, яъни иссиқликка айланадиган қувват жуда озгина бўлади. Салт ишлаш қуввати қуйидагича аниқланади:

$$P_0 = I_0^2R_1 + \Delta p_n.$$

Баъзи ҳисоблашларда салт ишлашдаги бирламчи чулғамда электрик қувват исрофи $I_0^2R_1$ кичик бўлгани учун, у эътиборга олинмайди. Демак, салт ишлаш шароитида трансформатор тармоқдан оладиган қувват, асосан, магнитланиш процессига сарфланади. Бу қувватни трансформаторнинг пўлат ўзагида исроф бўладиган қувват (Δp_n) дейилади. Трансформаторнинг пўлат ўзагида исроф бўладиган қувват аслида, гистерезис ва уюрма токлар таъсирида исроф бўладиган қувватлардан иборат бўлади, яъни

$$\Delta p_п = \Delta p_{гис} + \Delta p_у.$$

Салт ишлаш тажрибасидан олинган маълумотлар асосида трансформаторнинг салт ишлаш характеристикалари, яъни I_0, P_0, $\cos\varphi_0$, z_0, K_0 бирламчи чулгам кучланиши U_1 га боғланишини кўрсатадиган характеристикалар қурилади. Қуввати 240 кВА, кучланиши 3150/380 В бўлган уч фазали трансформаторнинг салт ишлаш характеристикалари ($I_0 = f(U_1)$; $P_0 = f(U_1)$, $\cos\varphi_0 = f(U_1)$ ва бошқалар) 30-расмда кўрсатилган. Бу характеристикалардан турли катталикларнинг бирламчи кучланиши $U_1 = U_{1н}$ бўлгандаги қийматлари аниқланади. Бирламчи кучланиш ортиб борганда ферромагнит ўзакнинг тўйиниши ҳам ортиб боради, натижада I_0 ва P_0 берилаётган кучланиш U_1 га нисбатан тезроқ ортади; чунки



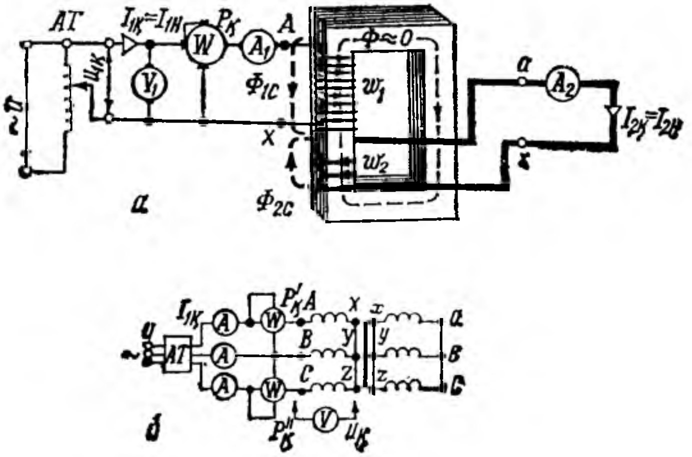
30-расм. Қуввати 240 кВА, кучланишлари 3150/380 В бўлган, чулғамлари Y/Y усулида уланган трансформаторнинг салт ишлаш характеристикалари.

U_1 ортиб боргани сари ўзакнинг тўйиниши ортади, шунинг учун ток I_0 U_1 га қараганда тезроқ орта боради. R_0, z_0 ва $\cos\varphi_0$ эса кучланиш ортиши билан камая боради. Юқоридаги формулалардан бизга маълумки, бунинг сабаби ҳам ток I_0 нинг U_1 га қараганда тезроқ орта боришидир.

16. Қисқа туташиш тажрибасини ўтказиш

Электр тармоғида қисқа туташиш шу тармоқнинг айрим элементлари изоляциясининг бузилишидан (механик таъсир ёки кучланишнинг ортиб кетиши натижасида) ёки ходимларнинг нотўғра ҳаракатларидан вужудга келади. Трансформатор учун қисқа туташиш шароити жуда хавфли бўлиб, бунда унинг бирламчи ва иккиламчи токлари ҳаддан ташқари кўпайиб кетади. Қисқа туташиш шароитида нагрузка қаршилиги $z_н = 0$ ва демак, иккиламчи кучланиш $U_2' = 0$ бўлади. Бу шароитда трансформаторнинг бирламчи чулғамига берилган U_1 кучланиш бирламчи ва иккиламчи чулғамларнинг тўла қаршилигида (яъни, $z_к = z_1 + z_2''$) кучланиш пасайишлари билан мувозанатлашади.

Ҳар бир куч трансформатори учун қисқа туташиш шароити авария шароитидир, бу шароитда трансформатор узоқ вақт ишлай олмайди. Лекин, ҳар бир трансформатор учун лаборатория шароитида ўтказиладиган қисқа туташиш тажрибаси амалий аҳамиятга эгадир. 31-расм, *а* ва *б* да бир фазали ва уч фазали трансформаторлар учун қисқа туташиш тажрибасини ўтказиш схемалари келтирилган. Қисқа туташиш тажрибаси ўтказилаётганда трансформаторнинг бирламчи чулғамига тўғридан-тўғри номинал кучланиш бериш мумкин эмас, чунки чулғамларда ток-



31-расм. Қисқа туташиш тажрибаси учун схема:

а — бир фазали трансформатор, *б* — уч фазали трансформатор.

нинг кўпайиб кетиши натижасида трансформатор ишдан чиқади. Шунинг учун трансформаторнинг бирламчи чулғамига кучланиш махсус автотрансформатор ёрдамида нолдан бошлаб секин-аста ошириб боради. Кучланиш қиймати жуда кичкина бўлса ҳам чулғамлардан ток ўта бошлайди. Кучланиш маълум қийматга етганда унинг бирламчи ва иккиламчи чулғамларидан ўтаётган қисқа туташиш токи шу чулғамларнинг номинал токи қийматига тенглашади, яъни бунда: $I_{1қ} = I_{1н}$ ва $I_{2қ} = I_{2н}$ бўлади. Бирламчи кучланишнинг шу қиймати трансформаторнинг қисқа туташиш кучланиши дейилади ва $U_қ$ билан белгиланади. Ҳар бир куч трансформатори учун қисқа туташиш кучланиши муҳим кўрсаткич ҳисобланади ва унинг қиймати трансформаторнинг паспортида келтирилади.

Одатда, қисқа туташиш кучланиши шу кучланишнинг бирламчи чулғамининг номинал кучланишига нисбати билан процент ҳисобида қуйидагича аниқланади:

$$u_қ\% = \frac{U_қ}{U_{1н}} 100\%. \qquad (1\text{-}53)$$

Кўпинча қисқа туташиш кучланиши $u_қ\%$ ўрнида қисқа туташиш ЭЮК $e_қ$ % ишлатилади. Ҳозирги пайтда ишлаб чиқарилаётган куч трансформаторларда қисқа туташиш кучланиши $u_қ$ % бирламчи чулғам номинал кучланишининг (ГОСТ 11677-75 га мувофиқ, 5,5 ÷ 10,5 % ни ташкил қилади. Трансформаторнинг кучланиши ва қуввати қанча катта бўлса, қисқа туташиш кучланиши ҳам шунча катта бўлади. Қисқа туташиш шароитида трансформаторнинг пўлат ўзагидаги магнит оқими, нормал шароитдагига қараганда ўнларча марта кичкина бўлади, пўлат ўзак эса тўйинмаган бўлади.

Қисқа туташиш шароитида трансформаторнинг фойдали қуввати нолга тенг бўлади. Лекин трансформатор ишлаб кетиши учун тармоқдан қандайдир қувват олади. Бирламчи ва иккиламчи чулғам токлари номинал қийматга тенг бўлгани учун бу қувватнинг ҳаммаси чулғамларни қиздиришга сарфланади. Магнит оқими жуда кичкина бўлгани учун трансформаторнинг пўлат ўзагида исроф бўладиган қувват ҳам жуда кичкина бўлади, кўпинча бу шароитда магнит исрофи эътиборга олинмайди. Қисқа туташиш шароитида трансформаторнинг тармоқдан оладиган қуввати унинг қ и с қ а т у т а ш и ш қ у в в а т и ($P_қ$) дейилади. Тажриба ўтказилаётган вақтда қисқа туташиш қуввати схемага уланган ваттметрлар ёрдамида аниқланади. Бирламчи ва иккиламчи чулғам номинал токларига тенг бўлган қисқа туташиш токлари ($I_{1қ} = I_{1н}$ ва $I_{2қ} = I_{2н}$) амперметрлар билан ўлчанади.

Трансформаторнинг қисқа туташиш шароити учун унинг эквивалент электр схемасини аниқлаймиз. Бу шароитда иккиламчи чулғам қисқа туташган бўлади. 20-расм, *в* да берилган эквивалент электр схемада магнитловчи шохобчанинг қаршиликлари катта бўлгани учун салт ишлаш токи I_0 кичкина бўлади. Тақ-

рибий ҳисоблашларда эквивалент схемадаги магнитловчи занжир эътиборга олинмайди, бунда схема соддалашади. Қисқа туташиш шароити учун трансформаторнинг (магнитловчи занжири эътиборга олинмаган) эквивалент электр схемаси 32-расм, *а* да келтирилган. Бу эквивалент схема чулғамларнинг фақат кетма-кет уланган актив ва индуктив қаршиликларидан иборат бўлади. Чулғамларнинг актив ва индуктив қаршиликларини алоҳида қўшиб қисқа туташиш шароитида трансформаторнинг қаршиликларини қуйидагича аниқлаш мумкин:

қисқа туташишдаги актив қаршилик:

$$R_1 + R_2^1 = R_1 + R_2\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 = R_қ,$$

қисқа туташишдаги индуктив қаршилик:

$$x_1 + x_2' = x_1 + x_2\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 = x_қ.$$

Шундай қилиб, қисқа туташиш шароити учун 32-расм, *б* да берилган схемани оламиз.

Қисқа туташиш тажрибасидан олинган маълумотлар асосида қуйидагилар аниқланади:

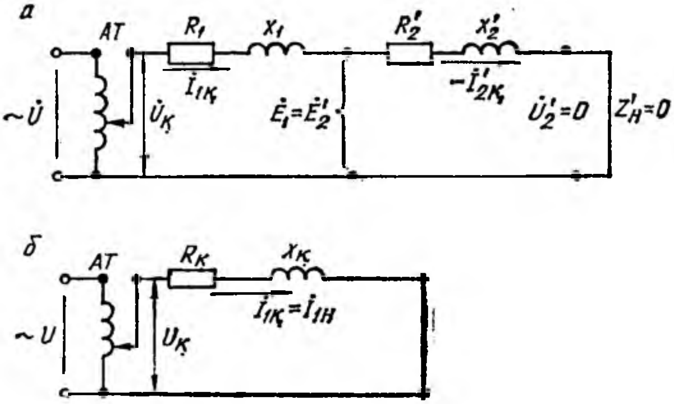
1) қисқа туташиш кучланишининг абсолют қиймати: $U_қ$, (В),

2) процентда ҳисобланган қисқа туташиш кучланиши:

$$u_қ\,\% = \frac{U_қ}{U_{1н}}\,100\,\%,$$

3) қисқа туташиш актив қаршилиги:

$$R_қ = \frac{P_қ}{mI_{1н}} \qquad (1\text{-}54)$$



32- расм.

4) бирламчи чулғамнинг ва келтирилган иккиламчи чулғамнинг актив қаршилиги; бу қаршиликлар қиймати тахминан қисқа туташиш актив қаршилигининг ярмига тенг:

$$R_1 = R_2' \approx \frac{R_қ}{2}, \qquad (1\text{-}55)$$

5) қисқа туташиш шароитида трансформаторнинг тўла қаршилиги:

$$z_қ = \frac{U_қ}{I_{1н}}, \qquad (1\text{-}56)$$

6) қисқа туташиш индуктив қаршилиги:

$$x_қ = \sqrt{z^2_қ - R^2_қ}, \qquad (1\text{-}57)$$

7) бирламчи ва иккиламчи чулғамнинг келтирилган индуктив қаршилиги: бу қаршиликлар ҳам тахминан қисқа туташиш индуктив қаршилигининг ярмига тенг:

$$x_1 = x_2' = \frac{x_қ}{2}. \qquad (1\text{-}58)$$

Уч фазали трансформаторда қисқа туташиш тажрибаси ўтказилаётганда айрим фазаларда қисқа туташиш кучланишлари ва токларининг ўртача қийматлари қуйидагича аниқланади:

$$U_қ = \frac{U_{қA} + U_{қB} + U_{қC}}{3}, \qquad (1\text{-}59)$$

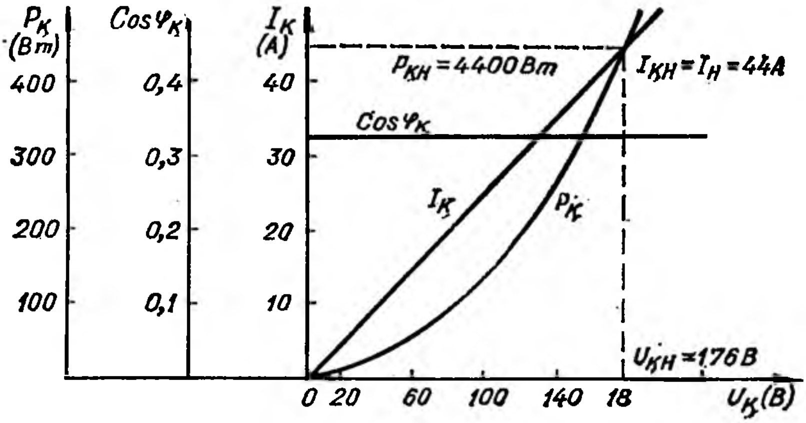
$$I_{1қ} = \frac{I_{қA} + I_{қB} + I_{қC}}{3}. \qquad (1\text{-}60)$$

Қисқа туташиш кучланиши ва токининг бу ўртача қиймати асосида қисқа туташиш шароити учун ўртача қувват коэффициенти қуйидагича аниқланади:

$$\cos\varphi_қ = \frac{P_қ' + P_қ''}{mU_қ I_{1қ}} = \frac{P_қ}{mU_қ I_{1қ}}. \qquad (1\text{-}61)$$

Тажриба ўтказилаётган пайтда трансформаторнинг бирламчи чулғамига кучланиш махсус автотрансформатор орқали 0 дан секин аста $U_қ$ гача ошириб борилади. $U_қ$ нинг бир неча қийматлари учун электр ўлчов приборларининг кўрсатишлари жадвалга ёзиб олинади. Тажрибадан олинган маълумотлар асосида номаълум катталиклар юқорида келтирилган формулалар ёрдамида аниқланади. Сўнгра, маълум масштабда қисқа туташиш характеристикалари қурилади. Қисқа туташиш характеристикалари $I_{1қ}$, $P_қ$ ва $\cos\varphi_қ$ ларнинг қисқа туташиш кучланиши $U_қ$ га боғлиқлигини ифодалайди, яъни $I_{1қ} = f(U_қ)$, $P_қ = f(U_қ)$, $\cos\varphi_қ = f(U_қ)$.

33-расмда қуввати 240 кВА, кучланишлари 3150/380 В бўлган, чулғамлари Y/Y̲ усулида уланган уч фазали трансформаторнинг қисқа туташиш характеристикалари келтирилган.



33-расм. Қуввати 240 кВА, кучланишлари 3150/380 В бўлган, чулғамлари Y/Y- усулида уланган трансформаторнинг қисқа туташиш характеристикалари.

Қисқа туташиш шароити учун (32-расм, *а*) ЭЮК тенгламасини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\dot{U}_{\text{қ}} = \dot{I}_{1\text{қ}}(R_1 + R_2') + j\dot{I}_{1\text{қ}}(x_1 + x_2') \qquad (1\text{-}62)$$

ёки

$$\dot{U}_{1\text{қ}} = \dot{I}_{1\text{қ}} R_{\text{қ}} + j\dot{I}_{1\text{қ}} x_{\text{қ}}, \qquad (1\text{-}63)$$

бу ерда

$$z_{\text{қ}} = \sqrt{R_{\text{қ}}^2 + x_{\text{қ}}^2}.$$

Қисқа туташиш шароитида ток:

$$\dot{I}_{1\text{қ}} = -\dot{I}_{2\text{қ}} = \dot{I}_{1\text{н}}. \qquad (1\text{-}64)$$

Қисқа туташиш шароити учун ЭЮК (1-63) ва токлар (1-64) тенгламасидан фойдаланиб қисқа туташиш шароити учун трансформаторнинг вектор диаграммасини қуриш мумкин. Вектор диаграмма бирор 0 нуқтадан исталган йўналишда $\dot{U}_{1\text{қ}} = \dot{I}_{1\text{қ}} z_{\text{қ}}$ векторни чизишдан бошланади. Қисқа туташиш токининг вектори $\dot{I}_{1\text{қ}} = -\dot{I}_{2\text{қ}}$ вектор $\dot{U}_{\text{қ}}$ дан бурчак $\varphi_{\text{қ}}$ га орқада қолади. (34-расм, *а*). Диаграммада $\dot{I}_{1\text{қ}}R_1$ ва $\dot{I}_{2\text{қ}}^1 R_2'$ векторлар ток вектори йўналишида; $\dot{I}_{1\text{қ}}x_1$ ва $\dot{I}_{2\text{қ}}x_2'$ векторлар ток векторидан 90° олдинда қилиб чизилади. Бирламчи ва иккиламчи чулғамларнинг актив қаршиликларидаги, шунингдек уларнинг индуктив қаршиликларидаги кучланиш пасайиши векторларини қўшиб *ОКМ* учбурчагини оламиз. *ОКМ* учбурчаги қисқа туташиш учбурчаги дейилади. Қисқа туташиш учбурчагининг томонлари:

$$OM = \dot{I}_{1\text{қ}}R_1 + \dot{I}_{2\text{қ}}R_1' = \dot{I}_{1\text{қ}}R_{\text{қ}} = \dot{U}_{\text{қа}},$$

$$MK = j\dot{I}_{1қ}x_1 + j\dot{I}_{2қ}x'_2 = \dot{I}_{1қ}x_{қ} = \dot{U}_{қр},$$

$$OK = \dot{I}_{1қ}z_{қ} = \dot{U}_{қ}$$ — қисқа туташиш тўла қаршилигида кучланиш пасайиши,

бу ерда, $\dot{U}_{қа}$ ва $\dot{U}_{қр}$ — қисқа туташиш кучланишининг актив ва реактив қисмлари (34-расм, *б*).

Вектор диаграммадан:

$$\dot{U}_{қ} = \sqrt{U_{қа}^2 + U_{қр}^2}. \qquad (1\text{-}65)$$

Қисқа туташиш кучланишининг актив ва реактив қисмлари ҳам номинал кучланишга нисбатан процентда қуйидаги ифодалар билан аниқланади:

$$u_{қа}\,\% = \frac{I_{1н}R_{қ}}{U_{1н}}\,100\%, \qquad (1\text{-}66)$$

$$u_{қр}\,\% = \frac{I_{1н}\,x_{қ}}{U_{1н}}\,100\%, \qquad (1\text{-}67)$$

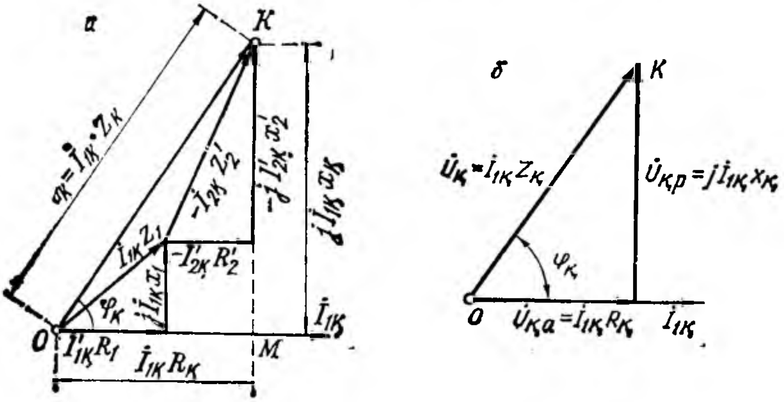
$$u_{қ}\,\% = \frac{I_{1н}\,z_{қ}}{U_{1н}}\,100\% \qquad (1\text{-}68)$$

ёки

$$u_{қ}\,\% = \sqrt{(u_{қа}\%)^2 + (u_{қр}\%)^2}. \qquad (1\text{-}69)$$

Реал эксплуатация шароитида, қисқа туташиш вақтида трансформаторда қисқа туташиш токининг турғун қийматини $u_{қ}\%$ нинг қиймати бўйича қуйидаги формуладан аниқлаш мумкин:

$$I_{1қ} = \frac{U_{1н}}{z_{қ}} = \frac{U_{1н}}{u_{қ}\% \cdot U_{1н}/(I_{1н}\cdot 100)} = \frac{100\,I_{1н}}{u_{қ}\,\%}.$$



34- расм.

Демак, қисқа туташиш кучланиши қанча катта бўлса, трансформаторда турғун қисқа туташиш токи шунча кичкина бўлади.

Қисқа туташиш шароитида қисқа туташиш токининг номинал токка нисбатан 7. . . 20 марта катта бўлиши трансформатор учун жуда хавфли. Қисқа туташиш шароитида трансформаторнинг қаршиликлари, яъни $R_к$, $x_к$ ва $z_к$ унинг қисқа туташиш параметрлари дейилади: Қисқа туташиш параметрлари қисқа туташиш тажрибасидан олинган маълумотлар асосида, юқорида келтирилган формулалар билан аниқланади. Трансформаторнинг нормал иш шароитидаги температурада бу қаршиликлар қиймати қуйидаги формулалар ёрдамида аниқланади:

$$R_{к75°} = R_к \frac{310}{235 + \Theta_1},$$

$$z_к = \sqrt{R^2_{к75°} + x^2_к}.$$

бу ерда: Θ — тажриба ўтказилаётган пайтдаги чулғам температураси, 75°C — трансформатор учун иш температураси.

Олдин айтиб ўтилганидек, қисқа туташиш шароитида магнитловчи ток, шунингдек магнит оқими ҳам жуда кичкина; магнитланишга сарфланадиган қувват $\Delta p_{оқ}$ ҳам жуда озгина. Шунинг учун магнит исрофи эътиборга олинмайди. Қисқа туташиш шароитида трансформаторнинг тармоқдан оладиган қуввати, асосан чулғамларда иссиқликка айланади. Қисқа туташиш қуввати $P_к$ тажриба вақтида ваттметр ёрдамида аниқланади. Қисқа туташиш қуввати трансформаторнинг мис симларида исроф бўладиган қувват дейилади. Қисқа туташиш қуввати қуйидаги формуладан аниқланиши ҳам мумкин:

$$P_к = \Delta p_{оқ} + m_1 I_1^2 R_1 + m_1 I'^2_2 R_2 \approx \Delta p_м.$$

Агар $I_{1к} \approx I'_{2к}$ бўлса, $P_к = m_1 I^2_{1к}(R_1 + R'_2) = m_1 I^2_{1к} R_к.$ (1-70)

Салт ишлаш қуввати P_0 ва қисқа туташиш қуввати $P_к$ нинг қиймати куч трансформаторларининг паспортида кўрсатилади.

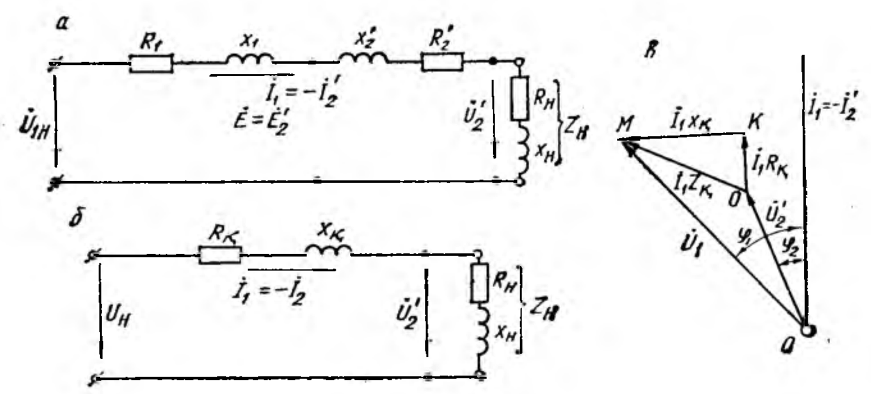
17. Нагрузка билан ишлаётган трансформаторнинг содда эквивалент схемаси ва вектор диаграммаси

Олдин айтиб ўтилганидек, трансформаторнинг эквивалент электр схемасида (20-расм, *в* га қаранг) магнитловчи шохобчанинг актив ва индуктив қаршиликлари катта бўлгани учун шу шохобчадан ўтувчи магнитловчи токнинг қиймати кичкина бўлади. Кўпинча, берилган масалани осон ҳал қилиш мақсадида эквивалент схемадаги магнитловчи занжир шохобчаси эътиборга олинмайди. Бу шароитда нагрузка билан ишлаётган трансформаторнинг эквивалент схемаси соддалашади. Трансформаторнинг соддалаштирилган эквивалент схемасидан фойдаланиб олиб борилган ҳисоблашларда хато унча катта бўлмайди.

Трансформаторнинг магнит оқими унинг бирламчи чулғамига бериладиган кучланиш қийматига боғлиқ. Қисқа туташиш таж-

рибаси шароитида эса трансформаторга кичкина қисқа туташиш кучланиши берилади. Бунда магнит оқими ҳам жуда кичкина бўлади. Бундан ташқари, трансформаторда салт ишлаш токи, яъни магнитловчи ток ҳам жуда кичкина. Номинал нагрузка билан ишлаб турган трансформаторда бу ток эътиборга олинмаса ҳам бўлади. Унда (1-24) ифода бўйича $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2'$ бўлади. Нагрузка билан ишлаётган трансформаторнинг соддалаштирилган эквивалент электр схемаси 35-расм, *а* да кўрсатилган Бу схемадаги бир хил қаршиликларни ўзаро қўшиб эквивалент схемани янада соддалаштириш мумкин (35-расм, *б*). Демак, қисқа қилиб айтганда, трансформатор актив ва индуктив қаршиликли электр узатиш линиясига эквивалент экан.

Трансформаторнинг соддалаштирилган эквивалент электр схемасидан амалда кенг фойдаланилади. Масалан, бундай схемадан эксплуатация давомида нагрузка билан ишлаётган трансформаторнинг иккиламчи кучланишининг ўзгаришини аниқлашда фойдаланилади. Соддалаштирилган эквивалент электр схемага мос вектор диаграмма қуриш мумкин. Бундай вектор диаграмма 35-расм, *в* да келтирилган. Бу диаграмма электр энергиясини узатиш линиясида кучланиш пасайишига тегишли вектор диаграммага ўхшайди. Бу диаграммадаги учбурчак *OKM* қисқа туташиш учбурчагидир. Трансформаторнинг соддалаштирилган вектор диаграммасини қуриш учун I_1, U_1, $\cos\varphi_2 = \frac{R_н'}{z_н}$ ҳамда қисқа туташиш учбурчагининг параметрлари $U_к$, $U_{ка}$ ва $U_{кр}$ берилган бўлиши лозим. Одатда, соддалаштирилган эквивалент схемадан магнитловчи ток бирламчи чулғам номинал токидан анча кичик бўлганда фойдаланилади. Амалда бу шароит трансформатор тўла нагрузка билан ёки унга яқин шароитда ишлаганда вужудга келади. Кам нагрузка билан ишлайдиган трансформатор параметрларини ҳисоблашда соддалаштирилган эквивалент схемадан фойдаланиш ярамайди. Бунда унинг тўла эквивалент электр схемасидан фойдаланиш лозим.



35- расм.

18. Иккиламчи чулғамда кучланиш қийматини ўзгартириш ва трансформаторнинг ташқи характеристикаси

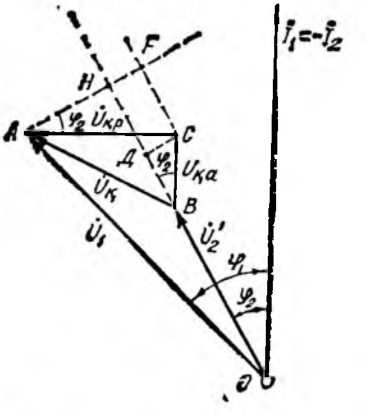
Нагрузка характери актив-индуктив бўлганда трансформаторнинг иккиламчи кучланиши U_2 унинг салт ишлашидаги иккиламчи чулғам кучланиши U_{20} дан кичикроқ бўлади. Нагрузка қиймати ортган сари иккиламчи кучланиш қиймати камая боради ва аксинча, нагрузка қиймати камая боргани сари трансформаторнинг иккиламчи кучланиши орта боради. Демак, трансформаторда иккиламчи чулғам кучланиши нагрузка қиймати ўзгаришига қараб доимо ўзгариб турар экан. Салт ишлашдан то номинал нагрузка билан ишлашгача бўлган оралиқда трансформаторда иккиламчи чулғам кучланишининг ўзгариши унинг муҳим кўрсаткичи ҳисобланади. Кучланишнинг ўзгариши $\Delta U_н$ билан белгиланади ва қуйидагича аниқланади:

$$\Delta U_н = \frac{U'_{20} - U'_2}{U'_{20}} \cdot 100\%.$$

Келтирилтан трансформаторда салт ишлаш шароитида $U_{20} = U_{1н}$ бўлади, унда:

$$\Delta U_н = \frac{U_{1н} - U'_2}{U_{1н}} \cdot 100\,\%. \qquad (1\text{-}71)$$

Трансформаторда иккиламчи чулғам кучланишининг қанчалик ўзгаришини унинг соддалаштирилган эквивалент электр схемаси учун қурилган вектор диаграммадан ҳам аниқлаш мумкин. Шу мақсадда диаграммани қайта чизамиз. Диаграммани вектор $\dot{U}'_2$ ни бирор йўналишда чизишдан бошлаймиз (36-расм). Агар нагрузка актив ва индуктив қаршиликлардан иборат бўлса, вектор $\dot{I}'_2$ вектор $\dot{U}_2$ дан бурчак φ_2 га орқада бўлади. Вектор $\dot{I}'_2R'_2$ вектор $\dot{U}'_2$ охиридан $\dot{I}'_2$ вектор $\dot{I}'_2$ йўналишида; вектор $j\dot{I}'_2x'_2$ эса (вектор $\dot{I}'_2R'_2$ охиридан) вектор $\dot{I}'_2$ дан 90° олдинда келадиган қилиб чизилади. Энди вектор $\dot{U}'_2$ га векторлар $\dot{I}'_2R'_2$ ва $j\dot{I}'_2x'_2$ ни қўшиб трансформаторнинг бирламчи чулғами кучланиши вектори $\dot{U}_1$ ни аниқлаймиз. Вектор диаграммадан трансформаторнинг иккиламчи чулғами кучланиши ўзгаришини аниқлаш учун вектор $\dot{U}_1$ учидан вектор $\dot{U}'_2$ давомига тик чизиқ туширамиз ва нуқта H ни топамиз. Унда:



36- расм.

$$U_{1н} - \dot{U}'_2 = BH = BD + DH,$$

$$BD = BC\cos\varphi_2 = \dot{I}_1 R_к \cos\varphi_2 = \dot{U}_{қа}\cos\varphi_2,$$
$$DH = CF = AC\sin\varphi_2 = j\dot{I}_1 x_к \sin\varphi_2 = \dot{U}_{кр}\sin\varphi_2.$$

Демак:

$$\dot{U}_{1н} - \dot{U}_2' = \dot{U}_{қа}\cos\varphi_2 + \dot{U}_{кр}\sin\varphi_2.$$

Бунда иккиламчи чулғам кучланишининг нисбий ўзгариши:

$$\Delta U_н\% = \frac{\dot{U}_{1н} - \dot{U}_2}{\dot{U}_{1н}}\cdot 100\% = \frac{\dot{U}_{қа}\cos\varphi_2 + \dot{U}_{кр}\sin\varphi_2}{U_{1н}}\cdot 100\%.$$

Агар иккиламчи чулғам кучланиши актив қисмининг нисбий ўзгариши $u_{қа} = \frac{U_{қа}}{\dot{U}_{1н}}100\ \%$ ва реактив қисмининг нисбий ўзгариши

$$u_{кр} = \frac{U_{кр}}{U_{1н}}\cdot 100\ \%\ \text{бўлса,}$$

унда:

$$\Delta u_н\% = u_{қа}\cos\varphi_2 + u_{кр}\sin\varphi_2\ \text{бўлади.} \qquad (1\text{-}72)$$

Бу формула ёрдамида $\Delta U_н$ нинг қиймати трансформаторнинг нагрузкаси номинал қийматга етганда тўғри аниқланади. Нагрузка қиймати номинал қийматдан кам бўлса ёки ўзгариб турса, иккиламчи чулғам кучланишининг ўзгаришини аниқлаш учун бу формулага нагрузкаланиш коэффициенти киритилади.

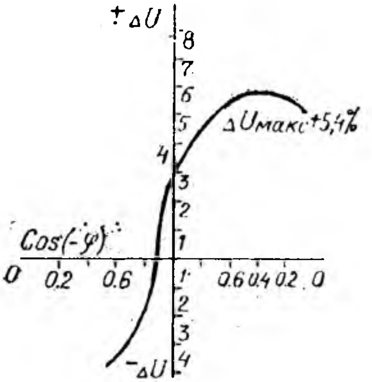
Трансформаторнинг нагрузкаси ҳар хил бўлганда, бирламчи чулғам токи I_1 нинг номинал ток $I_{1н}$ га нисбати **нагрузкаланиш коэффициенти** дейилади ва β билан белгиланади:

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1н}}\ \text{ёки}\ \beta = \frac{I_2}{I_{2н}}.$$

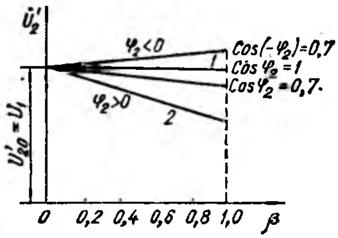
У ҳолда иккиламчи чулғам кучланишининг ўзгариши қуйидагича аниқланади:

$$\Delta U_н\% = \beta\,(u_{қа}\cos\varphi_2 + u_{кр}\sin\varphi_2). \qquad (1\text{-}73)$$

Демак, нагрузкаланиш коэффициенти ўзгармас ($\beta = \text{const}$) бўлганда иккиламчи чулғам кучланишининг нисбий ўзгариши нагрузка токи ва бурчак φ_2 га боғлиқ бўлар экан ёки бошқача айтганда, нагрузка қийматига ва унинг характерига боғлиқ бўлар экан. 37-расмда нагрузка қиймати ўзгармас, яъни $\beta = \text{const}$ бўлганда иккиламчи чулғам кучланишининг ўзгаришини қувват коэффициенти, яъни $\cos\varphi_2$ га боғлиқлик характери кўрсатилган. Трансформаторнинг нагрузкаси фақат актив қаршиликдан иборат бўлса, $\Delta U_н\%$ унча катта бўлмайди. Актив-индуктив характерли нагрузкада $\Delta U_н\%$ катталашади ва $\cos\varphi_2 = \cos\varphi_к$ бўлганда энг катта қийматга эришади. Актив-сиғим характерли нагрузкада $\Delta U_н\%$ манфий бўлади.



37-расм.



38-расм.

Трансформаторнинг ташқи характеристикаси: $U_1 = U_{1н} = \text{const}$; $f = \text{const}$ ва $\cos\varphi_2 = \text{const}$ бўлганида иккиламчи чулғам кучланишининг нагрузка токи I'_2 га боғланиши, яъни $U'_2 = f(I'_2)$ ёки нагрузкаланиш коэффициенти β га боғланиши трансформаторнинг ташқи характеристикаси дейилади. Нагрузкаланиш коэффициенти 0 дан 1 гача ўзгарганда трансформаторнинг ташқи характеристикаси деярли тўғри чизиқ кўринишида бўлади (38-расм, 1-чизиқ).

Умуман, қисқа туташиш кучланиши $u_қ$ % ва унинг актив $u_{қа}$ % ва реактив $u_{қр}$ % ташкил этувчиларининг қиймати трансформаторнинг қувватига боғлиқ. Катта ва ўртача қувватли трансформаторларда қисқа туташиш кучланишининг реактив қисми унинг актив қисмига қараганда анча катта бўлади. Шунинг учун ҳам бундай трансформаторларда реактив нагрузка иккиламчи чулғам кучланишини анчагина ўзгартиради. Актив-индуктив характерли нагрузкада $\cos\varphi_2$ қанча кичкина бўлса, ташқи характеристика пастга шунча кўп эгилади ва бунда доимо $U'_2 < U_1$ бўлади. Актив-сиғим характерли нагрузкада эса бурчак φ_2 нинг баъзи қийматларида $U'_2 > U_1$ бўлиши мумкин. Кичик қувватли трансформаторларда, одатда унинг актив қаршилигидаги кучланиш пасайиши реактив қаршилигидаги кучланиш пасайишидан каттароқ бўлади. Шунинг учун бундай трансформаторларда актив характерли нагрузка реактив характерли нагрузкага қараганда кучланишни каттароқ ўзгартиради (38-расм, 2-чизиқ).

19. Трансформаторда қувват исрофи ва унинг фойдали иш коэффициенти

Трансформатор нормал шароитда ишлаганда у электр тармоғидан энергия олади. Бу энергиянинг асосий қисми магнит майдони воситасида бирламчи чулғамдан иккиламчи чулғам клем-

маларига уланган истеъмолчиларга узатилади; энергиянинг озгина қисми трансформаторнинг ўзида исроф бўлади. Бундан кейинги мулоҳазаларда электр энергияси ўрнида қувват ҳақида гап боради. Чунки вақт бирлиги ичида сарфланган энергия ёки токнинг бажарган иши электр қувватини ифодалайди.

Трансформатор ишлаганда унинг ферромагнит ўзаги доимо қайта магнитланиб туриши, яъни гистерезис ҳодисаси ва пўлат ўзакнинг айрим пластинкаларида уюрма токлар таъсири, умуман магнит ҳодисалари натижасида қувватнинг бир қисми исроф бўлади. Бу қувват магнит исрофи ёки трансформаторнинг пўлат ўзагида исроф бўладиган қувват (Δp_n) дейилади. Трансформаторнинг пўлат ўзагида исроф бўладиган қувват қиймати салт ишлаш тажрибасидан аниқланади. Аниқроқ айтганда салт ишлаш тажрибасидан салт ишлаш қуввати P_0 (бирламчи чулғам занжирига уланган ваттметр ёрдамида) аниқланади. Бу қувват бирламчи чулғамдан салт ишлаш токи I_0 ўтганда бирламчи чулғамнинг актив қаршилиги R_1 да иссиқликка айланадиган ва магнит ҳодисалар натижасида исроф бўладиган қувватлардан иборат бўлади, яъни:

$$P_0 = I_0^2 R_1 + \Delta p_n = I_0^2 R_1 + \Delta p_{гис} + \Delta p_у.$$

Салт ишлаш шароитида бирламчи чулғамдан жуда кичкина салт ишлаш токи I_0 ўтади. Бирламчи чулғамнинг актив қаршилиги ҳам жуда кичкина бўлади. Шунинг учун бу шароитда иссиқликка айланадиган қувват жуда кичкина бўлади. Ҳисоблашларда, кўпинча, бу қувват эътиборга олинмайди. Демак, трансформатор салт ишлаганда ва номинал кучланишда салт ишлаш қуввати P_0 унинг пўлат ўзагида бўладиган магнит исрофи Δp_n га тенг бўлади дейиш мумкин, яъни $P_0 = \Delta p_n$.

Гистерезис ҳодисаси сабабли қувват исрофи пўлатнинг қайта магнитланишидан юзага келади. Циклик магнитланиш процессида исроф бўладиган қувват қиймати пўлат оғирлигининг ҳар килограммига ватт ҳисобида қуйидаги формула билан аниқланади:

$$\Delta p_{гис} = \sigma_г \left(\frac{f}{100}\right) B^2. \qquad (1\text{-}74)$$

Агар бу ифодани ферромагнит ўзак массасининг огирлиги G га кўпайтирилса, трансформаторнинг пўлат ўзагида гистерезис туфайли исроф бўладиган умумий қувват аниқланади. Бу формулада магнит индукциясининг ўлчов бирлиги тэсла эсга олинади, f — қайта магнитланиш частотаси, $\sigma_г$ — пўлатнинг маркасига боғлиқ бўлган коэффициент; турли маркали пўлатлар учун $\sigma_г = 2{,}4 \ldots 4{,}4$.

Магнит майдони ўзгарувчан майдон бўлгани учун трансформаторнинг чулғамларида унинг асосий ЭЮКлари ҳосил бўлади, шу билан бирга, пўлат ўзакнинг айрим пластинкаларида ҳам ЭЮКлар ҳосил бўлади. Айрим пластинкаларда ҳосил бўладиган бу кераксиз ЭЮКлар пластинкаларда уюрма токлар ҳосил қилади. Уюрма токлар трансформатор пўлат ўзагини қиздиради ва

бунда маълум миқдорда қувват исроф бўлади. Уюрма токлар таъсири натижасида юзага келадиган қувват исрофи қуйидаги формула билан аниқланади:

$$\Delta p_y = \sigma_y \left(\frac{f}{100}\right)^2 B, \qquad (1\text{-}75)$$

бу ерда: σ_y — пўлатнинг маркасига ва айрим пластинкаларнинг қалинлигига ҳамда сифатига боғлиқ коэффициент. Бу коэффициент кучсиз ва ўртача легирланган пўлат учун $\sigma_y = 2{,}9 \ldots 3{,}6$; юқори легирланган пўлат учун $\sigma_y = 1 \ldots 0{,}6$ га тенг. Пўлат ўзакнинг бутун массасида исроф бўладиган қувватни аниқлаш учун бу ифодани ҳам пўлатнинг массаси G га кўпайтириш керак.

Трансформаторлар пўлатидаги қувват исрофи, агар $u_1 = \text{const}$ бўлса, нагрузка қийматига деярли боғлиқ бўлмайди; турли нагрузка билан ишлаганда магнит исрофи деярли бир хилда қолади. Шунинг учун магнит исрофи **доимий исроф бўладиган қувват** дейилади.

Трансформатор нормал шароитда ишлаганда унинг бирламчи ва иккиламчи чулғамларидан ток ўтиб туриши натижасида қувватнинг бир қисми иссиқликка айланиб туради. Чулғамларда иссиқликка айланадиган қувват чулғамлар токларининг квадратига тўғри пропорционал. Чулғамларда ток қиймати ўзгариши билан иссиқликка айланадиган қувват қиймати ҳам ўзгариб туради. Чулғамларда иссиқликка айланадиган қувват трансформаторнинг **мис симларида исроф бўладиган қувват** ($\Delta p_м$) ёки **электрик исроф** ($\Delta p_э$) дейилади. Электрик исроф қувватининг қиймати қисқа туташиш тажрибасидан аниқланади. Қисқа туташиш шароитида трансформатор тармоқдан оладиган қувват $P_қ$ электр исрофдан бир оз каттароқ бўлади. Чунки қувватнинг оз қисми трансформаторнинг пўлат ўзагида исроф бўлади, яъни:

$$P_қ = \Delta P_{пк} + \Delta p_э.$$

Қисқа туташиш тажрибасида бирламчи чулғамга жуда кичкина кучланиш берилади, бу шароитда магнит оқими ҳам жуда кичкина бўлади, демак, магнит исрофи ҳам озгина бўлади. Кўпинча, бу шароитда магнит исрофи эътиборга олинмайди. Унда: $P_к = \Delta p_э$ бўлади
ёки

$$P_қ \simeq \Delta p_э = m_1 I_1^2 R_1 + m_1 I_2'^2 R_2' = m_1 I_1^2 (R_1 + R_2') = m I_1^2 R_қ. \qquad (1\text{-}76)$$

Демак, электр исрофи нагрузка қийматига боғлиқ равишда ўзгариб туради. Нагрузка қиймати турлича бўлганда электр исрофи қувватининг юқоридаги формуласига нагрузкаланиш коэффициенти киритилади. У ҳолда:

$$\Delta p_э \approx \beta^2 \cdot P_{кн} \qquad \text{бўлади,}$$

бу ерда $P_{қн}$ — номинал қисқа туташиш қуввати; $\beta = \dfrac{I_2}{I_{2н}}$ нагрузкаланиш коэффициенти.

Шундай қилиб, трансформатор ишлаганда унда исроф бўладиган жами қувват

$$\Delta p = P_0 + \beta^2 P_{кн} \tag{1-77}$$

бўлади.

Трансформаторда бирламчи ва иккиламчи чулғамларининг қувватлари қуйидагича аниқланади:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1, \tag{1-78}$$

$$P_2 = m_2 U_2 I_2 \cos \varphi_2. \tag{1-79}$$

Электр тармоғидан трансформаторнинг бирламчи чулғамига бериладиган қувват

$$P_1 = P_2 + \Delta p \tag{1-80}$$

бўлади.

Иккиламчи чулғамдан истеъмолчиларга бериладиган қувват P_2 нинг бирламчи чулғамга тармоқдан келадиган қуввати P_1 га нисбати трансформаторнинг фойдали иш коэффициенти (ФИК) дейилади ва η билан белгиланади. Демак,

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \tag{1-81}$$

Трансформаторнинг паспортида унинг номинал тўла қуввати кВА да кўрсатилади, яъни:

$$S_н = mU_{20}I_{2н}.$$

У ҳолда нагрузкаланиш коэффициентини эътиборга олиб, иккинчи чулғам қуввати:

$$P_2 = \beta S \cos \varphi_2 \tag{1-82}$$

бўлади. Трансформаторнинг ФИК $\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta p} = 1 - \frac{\Delta p}{P_2 + \Delta p}$, (1-82) га асосланиб:

$$\eta = \frac{\beta S_н \cos \varphi_2}{\beta S_н \cos \varphi_2 + P_{он} + \beta^2 \cdot P_{кн}}. \tag{1-83}$$

Бу формула трансформаторнинг ФИК ини аниқлашда Давлат Умумсоюз стандарти томонидан тавсия қилинган формуладир. Ҳар бир куч трансформатори учун $P_{он}$ ва $P_{кн}$ ларнинг қийматлари каталогда ёки справочникларда берилади.

Юқоридаги формуладан трансформаторнинг ФИК нагрузкаланиш коэффициенти β га ва нагрузканинг қувват коэффициенти $\cos\varphi_2$ га боғлиқлиги кўриниб турибди. $\beta = 0$ бўлганда трансформаторнинг ФИК нолга тенг. Трансформатордан олинадиган қувват орта бориши билан ФИК орта боради, чунки энергетика балансида, қиймати доимо бир хилда қоладиган магнит исрофининг улуши камаяди. Нагрузкаланиш коэффициентининг маълум бир оптимал қийматида трансформаторнинг ФИК ўзининг энг катта

қийматига эришади. Сўнгра нагрузка қиймати ортиши билан унинг ФИК камая бошлайди. Ток катталашганда чулғамларда электр исрофи қиймати орта бошлайди, чунки электр исрофи токнинг квадратига пропорционал равишда ортади.

Трансформаторнинг ФИК ини аниқлаш формуласида фақат нагрузкаланиш коэффициентигина ўзгарувчан катталикдир. $\eta=f(\beta)$ функциянинг энг катта қийматини аниқлаш учун ФИК ни нагрузкаланиш коэффициенти бўйича олинган биринчи ҳосиласини, яъни $\frac{d\eta}{d\beta}$ ни нолга тенглаштирамиз, яъни $\frac{d\eta}{d\beta}=0$. Салт иш ашда исроф бўладиган қувват қисқа туташиш шароитида исроф бўладиган қувватга тенг бўладиган нагрузкада трансформаторнинг ФИК ўзининг энг катта қийматига эришишини аниқлаймиз, яъни:

$$P_{\text{он}}=\beta^2 P_{\text{қн}}. \tag{1-84}$$

Бундан β ни аниқлаймиз:

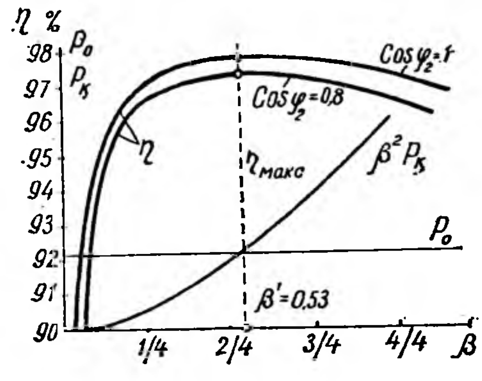
$$\beta=\sqrt{\frac{P_{\text{он}}}{P_{\text{кн}}}}.$$

Совет Иттифоқида тайёрланадиган трансформаторларда нисбат $P_{\text{он}}/P_{\text{қн}}$ ўртача 0,5 . . .0,25 га тенг. Бу ҳолда нагрузкаланиш коэффициенти $\beta=0,5\ldots0,7$ бўлади.

Демак, нагрузка билан ишлаётган трансформаторнинг қуввати унинг номинал қувватининг 50 . . .70% ини ташкил қилганда трансформаторнинг ФИК ўзининг энг катта қийматига эришар экан. Бундай нагрузка трансформатор учун ўртача нагрузка ҳисобланади. Эксплуатация давомида трансформатор нагрузкасининг қиймати унинг номинал нагрузкасининг 50 . . .70% ини ташкил қилади.

Трансформаторнинг ФИК энг катта бўлгандаги нагрузка қиймати **энг тежамли нагрузка** дейилади. Энг тежамли нагрузка қиймати қуйидагича аниқланади:

$$S_{\text{теж}}=S_{\text{н}}\beta=S_{\text{н}}\sqrt{\frac{P_{\text{он}}}{P_{\text{қн}}}}.$$



39- расм.

Юқорида трансформаторнинг ФИК қувват коэффициенти $\cos\varphi_2$ га боғлиқ дедик. Нагрузка қиймати ўзгариши билан ҳамда қувват коэффициенти турлича бўлганда трансформатор ФИК ининг ўзгариши ва қувватлар исрофининг ($\beta^2 P_{\text{кн}}$ ва $P_{\text{он}}$) нагрузкаланиш коэффициентига боғлиқлиги 39-расмда кўрсатилган.

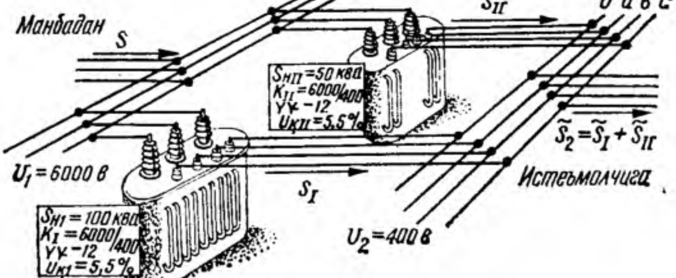
Ҳозирги замон куч трансформаторлари жуда тежамли аппарат ҳисобланади. Кичик қувватли трансформаторларнинг ФИК 0,8 . . .0,95; катта қувватли, шу жумладан, ўта катта қувватли трансформаторларнинг ФИК 0,98 . . .0,99 га етади. Амалда нагрузкаланиш коэффициенти 0,4 дан 1,4 гача ўзгарганда трансформаторнинг ФИК анча юқорилигича қолади. Қувват коэффициенти $\cos\varphi_2$ камайса, ФИК ҳам камаяди. Чунки, бунда трансформаторда токлар I_1 ва I_2 катталашади.

IV БОБ. ТРАНСФОРМАТОРЛАРНИНГ ПАРАЛЛЕЛ ИШЛАШИ

20. Умумий тушунчалар

Ўртача ва катта қувватли корхоналарнинг ҳар бирида электр энергияси билан таъминлайдиган трансформатор подстанцияси бўлади. Бу подстанцияда кучланишни пасайтирувчи трансформаторлар ўрнатилади. Электр энергияси корхона подстанциясига ҳаво ёки кабель линияси орқали, электр станциясидан ёки марказий подстанциядан кўпинча 6 ёки 10 кВ, баъзан 35 кВ ли кучланиш билан узатилади. Подстанцияда бир ёки бир нечта куч трансформаторлари ўрнатилиши мумкин. Бу трансформаторлар юқори кучланишни истеъмолчиларнинг номинал кучланишигача, яъни 660 В, кўпинча 400/230 В гача пасайтириб беради. Корхонада бир нечта трансформатор ўрнатилган бўлиши мумкин, уларнинг ҳар бири ё ўзининг истеъмолчиси учун ишлаши ёки ўзаро параллел ишлаши мумкин. Трансформаторлар параллел ишлаганда уларнинг бирламчи чулғами умумий ток манбаидан ёки электр тармоғидан энергия олади ва иккиламчи чулғамлари умумий истеъмолчини энергия билан таъминлайди (40-расм).

Трансформаторлар параллел ишлаганда истеъмолчиларга бериладиган қувватнинг энг катта қиймати айрим трансформаторларнинг номинал қувватлари йиғиндиси билан аниқланади, бошқача айтганда, уларнинг номинал қувватлари ўзаро қўшилади. Агар бирор корхона подстанциясида олдин битта трансформатор



40- расм.

ўрнатилган бўлса, вақт ўтиши билан корхона кенгайтирилиб янги цехлар қурилади. Бунда корхонанинг умумий истеъмолчиларини электр энергияси билан таъминлаш учун битта трансформаторнинг қуввати етмай қолади. Бундай шароитда ишлаб турган трансформаторга параллел қилиб иккинчи трансформатор уланади ва истеъмолчилар етарли энергия билан таъминланади.

Қуввати ўзгариб турадиган корхона подстанциясида бир нечта трансформаторларнинг параллел ишлаши электр энергиясининг истеъмолчилар орасида тежамли тақсимланишини ва турли ҳолларда энергия билан узлуксиз таъминлашни яхшилайди. Параллел ишлаб турган трансформаторлардан бирортаси ишдан чиқиб қолса, истеъмолчилар электр энергиясисиз қолмайди, ишлаб турган трансформаторлар истеъмолчиларни етарли энергия билан таъминлайди. Энергия истеъмол қилиш камайган вақтларда баъзи трансформаторлар электр тармоғидан узиб қўйилади. Одатда, корхона подстанциясида ўрнатилган трансформаторларнинг ишлаш шароити номинал шароитга яқин бўлади. Истеъмолчилар қувватига қараб параллел ишлайдиган трансформаторлар қувватини аниқлаш ва уларни рационал ишлатиш электр энергияси билан таъминлашнинг фойдали иш коэффициентини оширади.

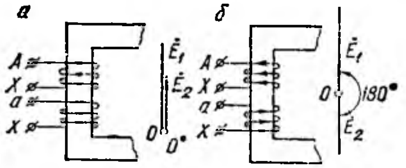
21. Трансформатор чулғамларининг уланиш группалари

13-параграфда уч фазали трансформатор чулғамларнинг уланиш усуллари (схемалари) билан танишган эдик. Энди уларнинг уланиш группалари билан танишиб чиқамиз. Бир фазали трансформаторнинг турли иш шароитлари (масалан, салт ишлаши ва нагрузка билан ишлаши) учун қурилган вектор диаграммаларда трансформаторнинг бирламчи ва иккиламчи чулғамларида ҳосил бўладиган E_1 ва E_2 ЭЮК лар векторларининг йўналиши бир хил деб олинган эди. Ҳақиқатда эса улар ё бир томонга ёки қарама-қарши томонга йўналган бўлади. Уларнинг қандай йўналганлиги трансформатор чулғамларининг уланиш группалари билан аниқланади.

Бир ва уч фазали трансформатор чулғамларининг уланиш группаси ёки $\dot{E}_1$ ва $\dot{E}_2$ векторларнинг бир-бирига нисбатан қандай йўналганлиги биринчидан, бирламчи ва иккиламчи чулғамларни ўраш йўналишига; иккинчидан, чулғамларнинг бош ва охирги учларини (қисмларини) қандай белгиланишига боғлиқдир.

Олдин бир фазали трансформатор чулғамларининг уланиш группасини аниқлаймиз. Агар бир трансформаторнинг бирламчи ва иккиламчи чулғамлари стерженларга бир хил йўналишда ўралса ва уларнинг бош ва охирги учлари бир хилда ифодаланса (41-расм, *а*), ЭЮК лар E_1 ва E_2 нинг векторлари бир томонга йўналган бўлади, яъни улар орасида силжиш бурчаги нолга тенг. Агар трансформаторнинг иккиламчи чулғами унинг бирламчи чулғамига нисбатан тескари томонга ўралса ёки иккиламчи чулғам учлари тескари ифодаланса (масалан, бош учи „x" билан; охирги учи „a" билан), E_1 ва E_2 векторлар қарама-қарши йўна-

лади, яъни векторлар орасида силжиш бурчаги 180° бўлади (41-расм, *б*).



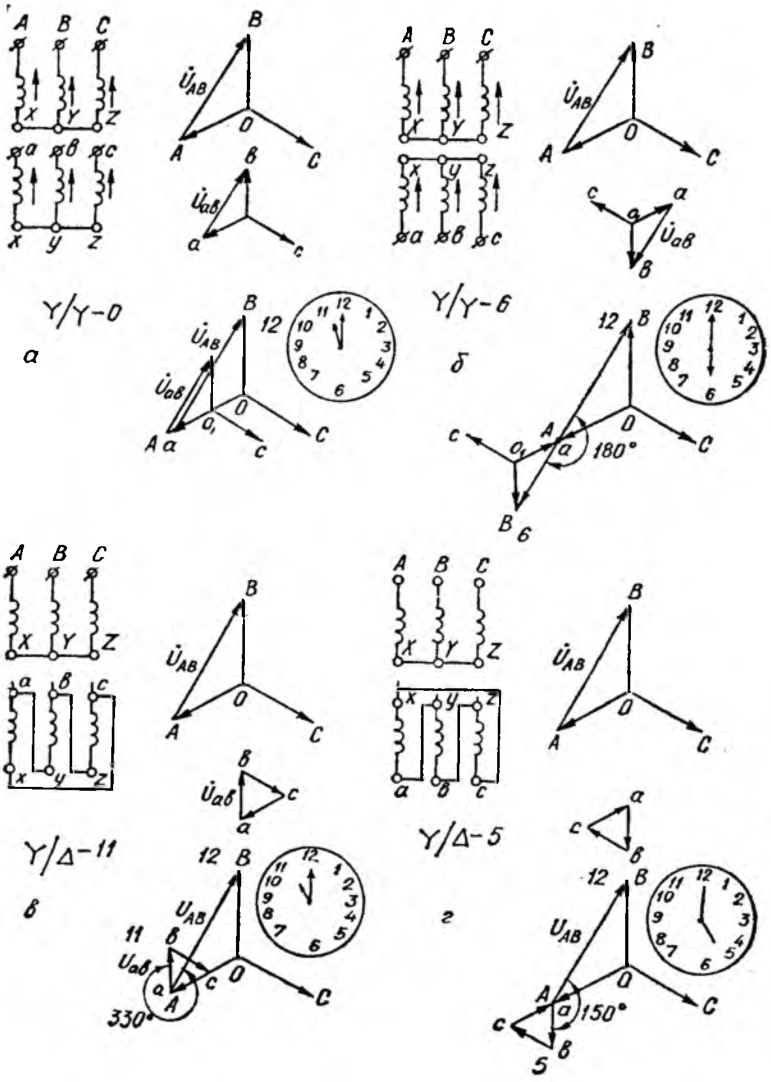
41-расм.

Чулғамларнинг уланиш группаси бирламчи ва иккиламчи чулғам ЭЮК ларининг векторлари орасидаги силжиш бурчагига қараб аниқланади. Одатда, чулғамларнинг уланиш группасини аниқлашда соат циферблатидаги рақамлардан фойдаланилади. Соат циферблатидаги рақамлар орасидаги бурчак 30° га тенг. Уланиш группалари ҳам 30° га бўлинадиган градусларда (масалан, 60°, 150°, 210°, 270° ва ҳоказо) аниқланади. Уланиш группасини аниқлашда бирламчи чулғам ЭЮК ининг вектори соатнинг катта, яъни минут стрелкаси билан белгиланади. Соатда минут стрелкаси доим 12 рақамида туради деб қабул қилинади. Иккиламчи чулғам ЭЮК ининг вектори соатнинг кичик, яъни соат стрелкаси билан белгиланади ва чулғамларнинг уланиш группаларига қараб бу стрелка 1 дан 12 гача бўлган турли рақамларни кўрсатиши мумкин. Шундай қилиб соат кичик стрелкасининг унинг минут стрелкасига нисбатан ҳолати иккиламчи чулғам ЭЮК векторининг бирламчи чулғам ЭЮК векторига нисбатан ҳолатини аниқлайди.

Бир фазали трансформаторда чулғамларнинг уланиш группаси икки хил бўлади. Масалан, 41-расм, *а* да бирламчи чулғам ЭЮК нинг вектори 12 рақамини кўрсатса, иккинчи чулғам ЭЮК нинг вектори ҳам 12 ни кўрсатади. Бу ҳолда трансформаторнинг уланиш группаси 12 ёки 0 группа бўлади. Бу шартли равишда 1/1-12 ёки 1/1-0 билан белгиланади.

41-расм, *б* да иккиламчи чулғам бирламчи чулғамга нисбатан тескари ўралган, бунда ЭЮК лар орасидаги силжиш бурчаги 180° бўлади. Бу ҳолда E_1 вектори 12 рақамини кўрсатса, E_2 вектори 6 ни кўрсатади. Бунда трансформатор чулғамларининг уланиш группаси 6 бўлади ва шартли белги 1/1—6 билан кўрсатилади. Шундай қилиб, бир фазали трансформаторда иккита уланиш группаси 12 ёки 0 ва 6-группалар бўлар экан. Агар шу расмдаги трансформатор иккиламчи чулғамининг бош ва охирги учлари тескари ифодаланса, чулғамларнинг уланиш группаси яна 12-группа бўлади.

Уч фазали трансформаторларда чулғамларнинг уланиш группаси, юқорида келтирилган икки шартдан ташқари, чулғамларнинг уланиш схемаларига ҳам боғлиқ бўлади. Уч фазали трансформаторларда уланиш группалари 12 хил, яъни 1 дан 12 гача (ёки 30° дан 360° гача) бўлиши мумкин. Уч фазали трансформаторларда чулғамларнинг **уланиш группалари бирламчи ва иккиламчи чулғамларга тегишли бир хил линиявий кучланишлари векторларининг ўзаро силжиш бурчагини ифодалайди.**



42-расм. Уч фазали трансформаторнинг уланиш группалари.

Уч фазали трансформаторнинг чулғамлари „юлдуз-юлдуз“ усулида уланганда чулғамларнинг уланиш группасини аниқлаймиз. Бунинг учун бирламчи ва иккиламчи чулғамлар фаза кучланишларининг векторлар диаграммасини чизамиз (42-расм, *а*). Бу диаграммалардан бирламчи ва иккиламчи линия кучланишларини, масалан, $\dot{U}_{AB}$ ва $\dot{U}_{ав}$ векторларни аниқлаймиз. Бирламчи ва иккиламчи чулғамларнинг уланиш схемалари бир хил бўлса, фаза ва линия кучланишларининг вектор диаграммалари бир-бирига ўхшаш бўлади, улар фақат кучланишларнинг қийматлари билан фарқ қилади. 42-расм, *а* да, масалан, $\dot{U}_{AB}$ ва $\dot{U}_{ав}$ линия кучланишлари ва бир хил йўналишга эга. Худди шунингдек $\dot{U}_{BC}$ ва $\dot{U}_{вс}$ ҳамда $\dot{U}_{CA}$ ва $\dot{U}_{са}$ линия кучланишлари ҳам бир хил йўналган бўлади. Бу ҳолда трансформатор чулғамларининг уланиш группаси 12 ёки 0 бўлади Бу Y/Y — 12 ёки Y/Y — 0 шартли белги билан кўрсатилади. Демак, шартли белгида трансформатор чулғамларининг уланиш схемалари ва группалари кўрсатилар экан.

Агар трансформаторнинг иккиламчи чулғамига тегишли қисмларни бошқача ифодаласак, яъни *а*, *в*, *с* клеммаларни чулғамнинг охирги учлари ва *х*, *у*, *z* клеммаларни чулғамнинг бош учлари деб олсак ҳамда чулғамларни юлдуз усулида уласак, иккиламчи чулғам фаза ва линия кучланишларининг векторлари дастлабки вазиятига нисбатан 180° га силжийди (42-расм, *б*). Бунда бирламчи ва иккиламчи чулғам линия кучланишларининг векторлари қарама-қарши томонга йўналади. Бу ҳолда трансформатор чулғамларининг уланиш группаси 6 бўлади ва Y/Y — 6 шартли белги билан кўрсатилади.

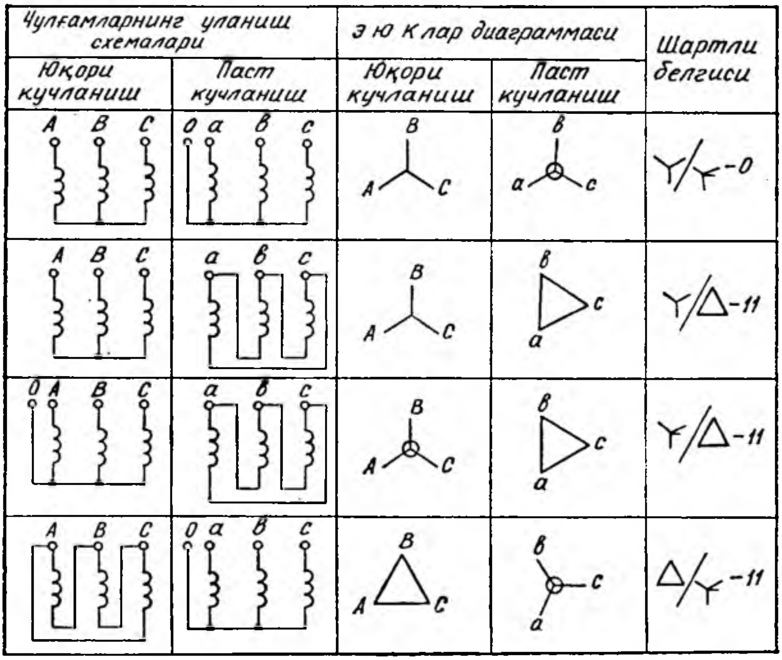
Трансформаторнинг бирламчи ва иккиламчи чулғамларининг учларини тўғри аниқлаш, уларни тўғри улаш ҳамда уланиш группасини тўғри аниқлаш муҳим амалий аҳамиятга эгадир.

Энди уч фазали трансформаторнинг бирламчи чулғами юлдуз усулида ва иккиламчи чулғами учбурчак усулида уланганда чулғамларнинг уланиш группасини аниқлаймиз. Бунинг учун бирламчи ва иккиламчи чулғамлар фаза ва линия кучланишларининг вектор диаграммасини қурамиз (42-расм, *в*). Чулғамлар юлдуз усулида уланганда линия ва фаза кучланишлари орасидаги муносабат $U_л = \sqrt{3}\,U_ф$ ва учбурчак усулида уланганда $U_л = U_ф$ бўлишини эсга оламиз. 42-расм, *в* да чизилган вектор диаграммада $\dot{U}_{AB}$ ва $\dot{U}_{ав}$ кучланишлар бир-биридан 330° силжиганлигини кўрамиз. Агар кучланиш $\dot{U}_{AB}$ нинг вектори (соатнинг минут стрелкаси) 12 ни кўрсатса, иккиламчи чулғамнинг $\dot{U}_{ав}$ кучланиш вектори (соатнинг соат стрелкаси) 11 ни кўрсатади. Демак, трансформаторнинг уланиш группаси 11 бўлади ва бу Y/Δ — 11 шартли белгиси билан кўрсатилади. Энди шу трансформаторнинг иккиламчи чулғами клеммаларини тескари белгиласак, яъни *х*, *у*, *z* қисмаларни чулғамларнинг бош учи; *а*, *в*, *с* қисмаларни эса чул-

ғамларнинг охирги учлари деб, уларни учбурчак усулида уласак, иккиламчи чулғам кучланишининг вектори бундан олдин келтирилган диаграммадагига қараганда 180° га силжиган бўлади (42-расм, г). Бу ҳолда кучланиш $\dot{U}_{AB}$ вектори 12 рақамни кўрсатса, кучланиш $\dot{U}_{ав}$ вектори 5 рақамни кўрсатади ва унинг шартли белгиси Y/Δ — 5 билан кўрсатилади.

Трансформаторнинг иккиламчи чулғамига тегишли клеммаларни, яъни чулғамларнинг бош ва охирги учларини турли тартибда белгилаб, (масалан, *а*, *в*, *с* ўрнида *с*, *а*, *в* ёки *в*, *с*, *а* билан белгилаб) чулғамларнинг турли уланиш группаларини олиш мумкин. Трансформаторнинг чулғамлари Y/Y ва Δ/Δ усулларида уланганда жуфт, яъни 2; 4; 6; 8; 10 ва 0 уланиш группаларини олиш мумкин. Чулғамлар Y/Δ ва Δ/Y усулларида уланганда тоқ группаларни, яъни 1, 3, 5, 7, 9 ва 11 уланиш группаларини олиш мумкин.

Мамлакатимизда Умумиттифоқ стандарти асосида уч фазали трансформатор чулғамлари, асосан, Y/Y — 0 ва Y/Δ — 11 уланиш схемаларида ва 0 (ёки 12) ва 11 уланиш группаларида ишлаб чиқарилади (43-расм, IV-1 жадвалга қаранг). Бу трансформаторларни параллел улаш шартларини осон бажарилишига имкон беради.



43- расм.

22. Трансформаторларни параллел улаш шартлари

Корхоналарнинг кучланишни пасайтирувчи подстанцияларида кўпинча қувватлари унча катта бўлмаган (масалан, 400, 630, 750 ва 1000 кВА) трансформаторлар ўрнатиш мақсадга мувофиқ бўлади. Баъзи ҳолларда айрим трансформаторлар ўзининг алоҳида истеъмолчиларини энергия билан таъминлайди. Подстанцияларда трансформаторлар кўпинча параллел уланади ва умумий истеъмолчиларни энергия билан таъминлайди. Трансформаторлар параллел уланганда истеъмолчиларни электр энергияси билан узлуксиз таъминлаш осонлашади; истеъмолчилар қуввати камайган вақтларда баъзи трансформаторлар узиб қўйилиши ҳам мумкин бўлади; трансформаторларнинг профилактика ремонтини ташкил қилишни осонлаштиради. Параллел уланган трансформаторлар салт ишлаганда уларнинг чулғамларидан тенглаштирувчи токлар ўтмаслиги лозим; нагрузка билан ишлаётган трансформаторларда эса истеъмолчиларнинг қуввати трансформаторларнинг номинал қувватларига пропорционал тақсимланиши лозим. Буларга эришиш учун трансформаторлар параллел уланаётганда қуйидаги асосий шартлар бажарилиши талаб қилинади:

1. Параллел уланадиган трансформаторнинг бирламчи чулғамининг номинал кучланиши ишлаб турган трансформаторларнинг бирламчи номинал кучланишига тенг бўлиши керак; трансформация коэффициентлари ҳам тенг бўлиши лозим:

$$U_{11} = U_{12} = U_{13} = \dots \qquad (1\text{-}85)$$
$$K_1 = K_2 = K_3 = \dots$$

Бунда трансформаторларнинг иккиламчи кучланишлари ҳам ўзаро тенг бўлади. Агар бу шарт бажарилмаса, ҳатто улар салт ишлаганда ҳам, трансформаторларнинг чулғамларидан тенглаштирувчи ток ўта бошлайди. Бу токнинг қиймати қуйидагича аниқланади:

$$I_т = \frac{U_{21} - U_{22}}{Z_{к1} + Z_{к2}} = \frac{\Delta U}{Z_{к1} + Z_{к2}}, \qquad (1\text{-}86)$$

бу ерда ΔU—кучланишлар фарқи; $z_{к1}$ ва $z_{к2}$—трансформаторларнинг қисқа туташув қаршиликлари.

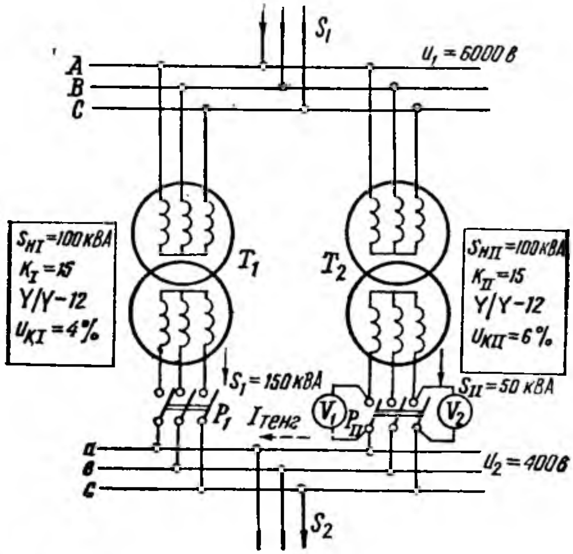
2. Параллел уланадиган ва ишлаб турган трансформаторлар чулғамларининг уланиш группалари бир хил бўлиши лозим. Бу шарт бажарилганда трансформаторларнинг иккиламчи чулғам фаза кучланишлари (ёки ЭЮК лари) нинг векторлари бир фазада бўлади. Агар бу шарт бажарилмаса, уларнинг иккиламчи кучланишлари ўзаро маълум бурчакка силжиганлиги натижасида кучланишлар фарқи ΔU вужудга келади ва трансформаторлар занжирида тенглаштирувчи ток ўта бошлайди. Бу ток уларнинг номинал токидан бир неча марта катта бўлиши мумкин.

3. Параллел уланаётган ва ишлаб турган трансформаторларнинг қисқа туташиш кучланишлари ўзаро тенг бўлиши лозим, яъни:

$$u_{к1}\% = u_{к2}\% = u_{к3}\% = \ldots \qquad (1\text{-}87)$$

Параллел ишлаб турган трансформаторлар орасида нагрузка токлари уларнинг қисқа туташиш кучланишларига тескари пропорционал равишда тақсимланади. Агар бу шарт бажарилмаса, яъни параллел ишлайдиган трансформаторларнинг қисқа туташиш кучланишлари тенг бўлмаса,уларда нагрузка қуввати қисқа туташиш кучланишларига тескари пропорционал бўлади. Натижада параллел уланган трансформаторларнинг номинал қувватлари тенг бўлганда ҳам, уларда нагрузка қуввати баробар тақсимланмайди Бунда қисқа туташиш кучланишининг қиймати кичик трансформатор нагрузкаси номинал қийматидан катта бўлади. Агар бу трансформатор номинал нагрузка билан ишласа, бошқа трансформаторларнинг нагрузкаланиши номинал қийматдан кичик бўлади. Бунда баъзи трансформаторларнинг номинал қувватидан тўла фойдаланиш мумкин бўлмай қолади.

Параллел ишлаб турган трансформаторлардан бирортаси бузилиб қолса, унинг ўрнига бошқа трансформатор ўрнатилиши лозим бўлади. Амалда қисқа туташиш кучланишларининг қиймати бир хил бўлган трансформаторларни топиш қийин. Шунинг учун параллел улаб ишлатиладиган трансформаторлар номинал қувватларининг нисбати 3 дан катта бўлмаслиги тавсия қилинади. Шунда қисқа туташиш кучланишларининг фарқи ± 10% дан ошмай-



44- расм.

ди ва истеъмолчиларнинг қуввати трансформаторларнинг номинал қувватларига пропорционал тақсимланади.

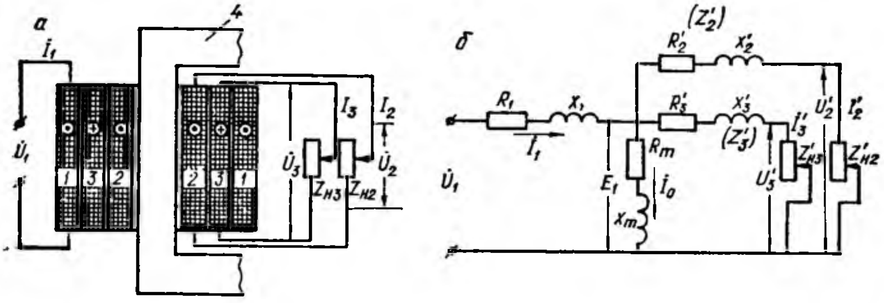
Трансформаторлар параллел уланаётганда, юқорида келтирилган асосий шартлардан ташқари, уларда фаза кучланишлари векторларининг кетма-кет келиши, яъни фаза алмашиниши бир хил бўлиши лозим. Фазалар алмашиниши бир хил бўлганда уланаётган трансформатор иккиламчи чулғамининг „а" фазаси ва ишлаб турган трансформатор иккиламчи чулғамининг „а" фазасига уланган вольтметр нолни кўрсатади.

V БОБ. ТРАНСФОРМАТОРЛАРНИНГ МАХСУС ХИЛЛАРИ

Амалда турли соҳаларда жуда кўп хил трансформаторлар ишлатилади. Автотрансформаторлар, бир ёки уч фазали уч чулғамли трансформаторлар, ўлчов трансформаторлари, пайвандлаш трансформаторлари, ўзгарувчан ток частотасини ўзгартирувчи трансформаторлар, фазалар сонини ўзгартирувчи трансформаторлар, синов трансформаторлари; радио, телевидение, алоқа ва автоматика қурилмаларида ишлатиладиган трансформаторлар махсус трансформаторлар ҳисобланади.

23. Уч чулғамли трансформаторлар

Электр станцияларда электр энергияси ишлаб чиқарадиган генераторларнинг кучланиши 6 . . . 20 кВ гача бўлади. Агар бу энергияни 35 кВ ва 110 кВ кучланишли алоҳида энергетика системаларига узатиш лозим бўлса, шу станция подстанциясида кучланишни 35 кВ ва 110 кВ гача ошириб берадиган иккита икки чулғамли уч фазали куч трансформатори ўрнатиш лозим. Агар иккита икки чулғамли куч трансформатори ўрнида битта уч чулғамли уч фазали трансформатор ишлатилса, трансформатор подстанцияси соддалашади, трансформатор ўрнатиш учун кам жой талаб қилинади, исроф бўладиган энергия камаяди ва подстанция таннархи арзонлашади. Уч чулғамли трансформаторнинг ўлчамлари икки чулғамли трансформаторларникидан фарқ қилмайди. Уч чулғамли трансформаторлар бир фазали ва уч фазали бўлиши мумкин. Энергетика системаларида, катта қувватли марказий подстанцияларда уч фазали уч чулғамли куч трансформаторлари ўрнатилади. Уч чулғамли трансформаторда чулғамларидан бири унинг бирламчи чулғами, қолган иккитаси эса иккиламчи чулғам ҳисобланади (45-расм, *а*). Кўпинча энг юқори кучланиш чулғами бирламчи чулғам бўлади. Уч чулғамли трансформаторнинг ишлаш принципи икки чулғамли оддий трансформаторнинг ишлаш принципидан фарқ қилмайди. Трансформаторнинг бирламчи чулғами манба кучланишига уланганда шу чулғамдан магнитловчи ток ўта бошлайди. Бу ток унинг асосий магнит оқимини ҳосил қилади. Катта қувватли трансформаторларда магнитловчи токнинг қиймати жуда кичкина бўлади, кўпинча ҳисоблашларда эътиборга олинмайди. Асосий магнит оқими чулғамларда E_1, E_2 ва E_3 ЭЮК ларни ҳосил қилади. Магнит-



45- расм. *а* — бир фазали уч чулғамли трансформатор:

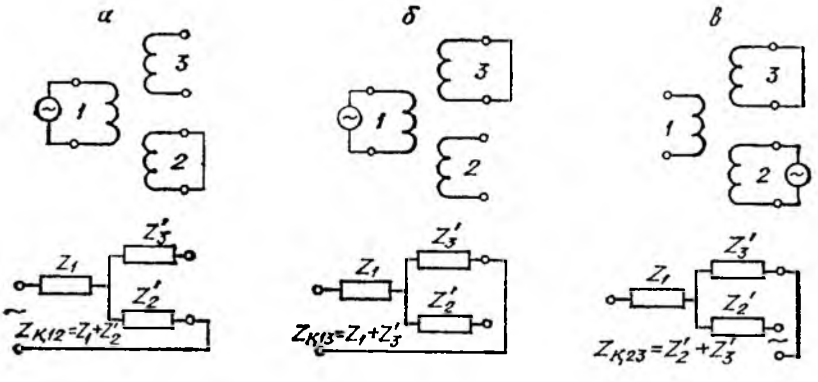
1 — юқори кучланиш чулғами, *2* — ўртача кучланиш чулғами, *3* — паст кучланиш чулғами
4 — пўлат ўзак;

б — уч чулғамли трансформаторнинг эквивалент электр схемаси.

ловчи токнинг қиймати салт ишлаш шароитида аниқланади. Салт ишлаш шароитида иккала иккиламчи чулғамга нагрузка уланмаслиги лозим. Трансформаторнинг трансформация коэффициенти ҳам салт ишлаш шароитида аниқланади:

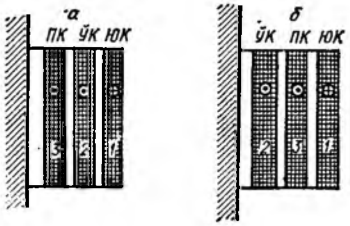
$$K_{12} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2}, \quad K_{13} = \frac{w_1}{w_3} = \frac{E_1}{E_3} \approx \frac{U_1}{U_3}. \qquad (1\text{-}88)$$

Уч чулғамли трансформаторда қисқа туташиш тажрибаси уч марта ўтказилади (46-расм). Тажриба ўтказиш вақтида чулғамлардан бири манбага уланади; иккинчиси қисқа туташтирилади; учинчиси очиқ қолдирилади (46-расм, *а*, *б*, *в*). Эквивалент электр схеманинг параметрларини ҳисоблаш йўли билан ёки қисқа туташиш тажрибасидан олинган маълумотлар асосида аниқлаш



46- расм. Уч чулғамли трансформаторда қисқа туташиш тажрибасини ўтказиш учун схемалар.

мумкин. Тажрибадан олинган маълумотлар асосида ҳар бир жуфт чулғамларнинг қисқа туташиш параметрлари аниқланади. Стандарт асосида уч чулғамли трансформаторларда чулғамларнинг ўрнатилиш тартиби 47-расмда кўрсатилган. Шу расмда кўрсатилган ўрнатиш тартибига мос бўлган қисқа туташиш кучланишларининг қийматлари (ГОСТ бўйича) I-1-жадвалда келтирилган.



47- расм.

I-1-жадвал

Чулғамларнинг ўрнатилиш тартиби	Чулғамлар		
	ЮК – ЎК	ЮК – ПК	ЎК – ПК
47-расм, *а*	10,5%	17%	6%
47-расм, *б*	17%	10,5%	6%

Бу ерда: ЮК — юқори кучланиш; ЎК — ўртача кучланиш; ПК — паст кучланиш.

Уч чулғамли трансформатор чулғамларининг қувватлари:

$$S_1 = mU_1I_{1н}, \quad S_2 = mU_2I_{2н}, \quad S_3 = mU_3I_{3н}.$$

Агар ЮК чулғами, яъни I чулғам бирламчи чулғам бўлса, трансформаторда: $S_1 \leqslant S_2 + S_3$ бўлади. Одатда, қувват коэффициентлари $\cos\varphi_2$ ва $\cos\varphi_3$ нинг қийматлари турлича бўлади. Токлар I_2 ва I_3 ўзаро маълум бурчакка силжиган бўлади. Шунинг учун уч чулғамли трансформаторда $I_1 < I_2 + I_3$ бўлади.

Уч чулғамли трансформаторнинг номинал қуввати деганда бирламчи чулғам ЮК чулғам қуввати тушунилади. Амалда ЮК, ЎК ва ПК чулғамларининг қувватлари, уларнинг номинал қувватларига нисбатан процент ҳисобида қуйидаги вариантларда тайёрланади:

1. 100%, 100%, 100%;
2. 100%, 100%, 67%;
3. 100%, 67%, 100%;
4. 100%, 67%, 67%.

Уч чулғамли трансформаторларнинг қуввати 5600 кВА дан 40000 кВА гача ва ундан катта бўлиши мумкин. Уларда ЮК чулғами 110 — 121 кВ; ЎК чулғами 34—38,5 кВ ва ПК чулғами 6—11 кВ кучланишга мўлжалланган бўлади. Ҳозирги вақтда уч чулғамли трансформаторлар 220 ва 400 кВ кучланишга мўлжаллаб ҳам тайёрланмоқда. Амалда турли соҳаларда — радио, телевидение, алоқа ва автоматика қурилмаларида кичик қувватли уч чулғамли ва кўп чулғамли трансформаторлар жуда кенг ишлатилади.

Автотрансформаторлар. Автотрансформаторлар кучланишни бир оз ўзгартириш ёки 0 дан бошлаб ошириш учун ишлатилади. Асосан ферромагнит ўзак ва битта ($A-X$ қисмалар 48-расм) чулғамдан тузилади. Шу чулғамнинг бир қисми қисмалари ($a-x$) унинг иккиламчи чулғами ҳисобланади. Автотрансформаторлар бир ва уч фазали бўлади. Амалда кучланишни пасайтирувчи (48-расм, *а*) ёки кучланишни оширувчи (*б*) автотрансформаторлар кўп ишлатилади. Автотрансформатор ишлаши учун унинг бирламчи чулғами манбага уланиши лозим. Бунда бирламчи чулғамда I_1 ток ўта бошлайди ва бу ток ферромагнит ўзакда магнит оқимини ҳосил қилади. Иккиламчи чулғамдан олинадиган U_2 кучланиш иккиламчи чулғам ўрамлари сонига пропорционал бўлади. Автотрансформаторнинг трансформация коэффициенти қуйидагича аниқланади:

$$K_a = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \quad \text{ёки} \quad K_a = \frac{U_1}{U_{20}},$$

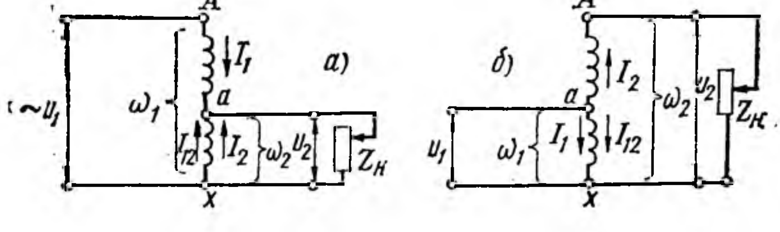
бу ерда: U_{20}—салт ишлаганда иккиламчи чулғам кучланишининг қиймати.

Бирламчи ва иккиламчи чулгам ЭЮК ининг формуласи қуйидагича ёзилади:

$$E_1 = 4{,}44\, w_1 f \Phi_m \approx U_1; \quad E_2 = 4{,}44 w_2 f \Phi_m \approx \dot{U}_2.$$

Чулғам қаршиликларида кучланиш пасайиши эътиборга олинмаса, ЭЮК мос кучланишга тенг бўлади, яъни $E_1 \simeq U_1$; $E_2 \simeq U_2$. Иккиламчи чулғамга нагрузка уланганда шу чулғамдан I_2 ток, бирламчи чулғамдан эса I_1 ток ўта бошлайди. Чулғамда I_1 ва I_2 ток қарама-қарши йўналган. Чулғамнинг I_1 ва I_2 ток ўтадиган қисмидан шу токларнинг айирмаси ўтади. Кучланишни пасайтирувчи автотрансформаторда $\dot{I}_{12} = \dot{I}_2 - \dot{I}_1$, кучланишни кучайтирувчи автотрансформаторда эса $I_{12} = I_1 - I_2$ бўлади. Шунинг учун чулғамнинг $a-x$ қисми кўндаланг қирқими кичикроқ симдан ўралиши мумкин.

Автотрансформаторларда манбадан олинадиган энергиянинг бир қисми унинг бирламчи чулғамидан иккиламчи чулғамига, уларнинг электрик уланиши воситасида узатилади. Қолган қис-



48-расм Кучланишни пасайтирувчи (*а*) ва кучланишни оширувчи (*б*) автотрансформатор схемаси.

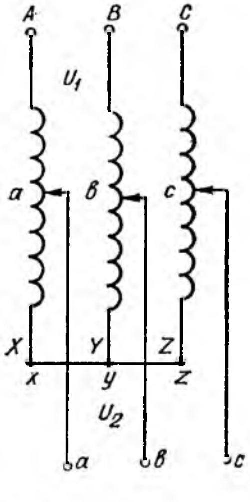
ми магнит оқими воситасида узатилади. Лекин бирламчи чулғамдан иккиламчи чулғамга энергия узатилишида магнит оқимининг бир қисми қатнашмайди. Шунинг учун ҳам автотрансформаторнинг электромагнит қуввати оддий трансформаторнинг электромагнит қувватидан кичик бўлади. Автотрансформаторнинг ўзида қувват исрофи эътиборга олинмаса, бирламчи ва иккиламчи чулғам қувватлари ўзаро тенг бўлади, яъни: $U_1I_1 \simeq U_2I_2$. Актив характерли нагрузкада иккиламчи чулғам қуввати: $P_2 = U_2I_2$. Агар $I_2 = I_1 + I_{12}$ бўлса, унда

$$P_2 = U_2I_1 + U_2I_{12} = P_{эл} + P_{эм},$$

бу ерда: $P_{эл}$ — электрик алоқа воситасида иккиламчи чулғамга узатиладиган қувват; $P_{эм}$ — автотрансформаторнинг электромагнит қуввати. Электромагнит қувват қиймати керак бўлган магнит оқимини, пўлат ўзакнинг кўндаланг қирқими юзасини ва унинг массасини аниқлайди.

Демак, автотрансформаторда бирламчи чулғамдан иккиламчи чулғамга магнит оқими ёрдамида қувватнинг фақат бир қисми узатилар экан. Бу эса уларда диаметри кичикроқ ўзак ишлатишга имкон беради. Бунда магнитланишда исроф бўладиган қувват камаяди, чулғам ўрамларининг ўртача узунлиги қисқаради, рангли металл тежалади. Кўпинча автотрансформаторнинг трансформация коэффициенти $K_а = 1 \ldots 2$ орасида бўлади. Агар $K_а > 2$ бўлса, автотрансформатор оддий трансформаторга яқинлашади.

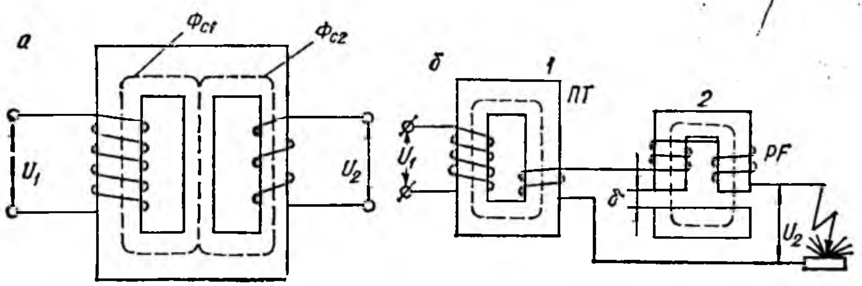
Қисқа туташиш қаршилигининг кичкина бўлиши ва, демак, қисқа туташиш токининг катта бўлиши ҳамда юқори кучланишнинг паст кучланиш занжирига ўтиб кетиш хавфи автотрансформаторнинг камчилиги ҳисобланади. Чулғам изоляцияси анча пишиқ қилинганда ҳам юқоридаги хавфли ҳолатлардан қутилиш қийин. Электр тармоқларида уч фазали автотрансформаторлар ҳам ишлатилади. Уч фазали автотрансформаторнинг чулғамлари юлдуз усулида уланади (49-расм). Уч фазали автотрансформаторлар электр тармоқларида юқори ва паст кучланишлар қийматини бир хилда ушлаб туриш учун ёки бир оз ошириш ёхуд камайтириш ҳамда катта қувватли асинхрон двигателларни юргизишда қўлланади.

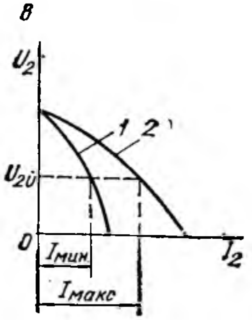


49- расм. Уч фазали автотрансформатор схемаси.

24. Пайвандлаш трансформаторлари

Пайвандлаш трансформаторлари пайвандлашнинг турига қараб турли конструкцияда тайёрланади. Улар электр ёйи ёрдамида ёки контакт усулида пайвандлаш қурилмаларида ишлатилади. Пайвандлаш трансформатори тармоқ кучланишини па-





50-расм. *а* — магнит шунтли пайвандлаш трансформатори, *б* — реактив ғалтакли пайвандлаш трансформатори, *в* — пайвандлаш трансформаторининг ташқи характеристикаси.

сайтирувчи оддий бир фазали икки чулғамли трансформатордир. Бундай трансформатор учун иккиламчи чулғамнинг қисқа туташиш шароитида ишлаши нормал шароит ҳисобланади. Қисқа туташиш токининг қийматини камайтириш мақсадида чулғамларнинг индуктив қаршилиги катта қилиб тайёрланади. Шунинг учун пайвандлаш трансформаторларининг қувват коэффициенти кичкина бўлади. Индуктив қаршиликни катталаштириш учун бундай трансформаторларда махсус конструкциядаги чулғам ёки иккиламчи чулғам занжирига қўшимча индуктив қаршилик уланади. Чулғамнинг индуктив қаршилигини катталаштириш учун сочилма оқим қийматини катталаштириш лозим. Бунинг учун чулғам ўзакнинг иккита ёки битта стерженида турли баландликда ўрнатилади. Магнит ўтказгичда магнит шунтларни қўллаш ҳам сочилма оқимни ва чулғамнинг индуктив қаршилигини анча оширади (50-расм, *а*).

Пайвандлаш трансформаторининг иккиламчи чулғамининг кучланиши 60 . . .70 В ва номинал нагрузка билан ишлаганда 30 В бўлади. Электр ёйнинг узлуксиз ва турғун ёниб туриши учун занжирда ток деярли ўзгармаслиги, индуктивлик эса анча ўзгариши лозим. Пайвандлаш занжирида токни ростлаш учун трансформаторнинг иккиламчи чулғамига магнит ўтказгичли индуктив ғалтак кетма-кет уланади (50-расм, *б*). Пайвандлаш токи индуктив ғалтакнинг реактив қаршилигини ўзгартириб ростланади. Ток қиймати электрод диаметрига қараб танланади. Индуктив ғалтакнинг ўзаги қўзғалмас ва қўзғалувчан қисмлардан ибо-

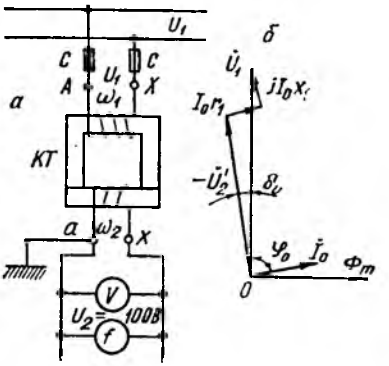
рат. Ғалтакнинг реактив қаршилиги унинг қўзғалмас ва қўзғалувчан ўзаклари орасидаги масофага боғлиқ бўлади. Ҳаво оралиги (δ) катта бўлса, ғалтакнинг реактив қаршилиги камаяди, занжирда ток қиймати ошади ва аксинча. Ҳаво оралиғини ўзгартириб занжирда пайвандлаш токини 70 А дан 300 А гача ўзгартириш мумкин. Пайвандлаш вақтида иккиламчи чулғам кучланиши 30 В гача камайиши мумкин.

Битта трансформатор бир нечта пайвандлаш аппаратини таъминлаши мумкин, лекин ҳар бир аппарат ўзининг алоҳида реактив ғалтагига эга бўлиши керак. Реактив галтак пайвандлаш қурилмасининг ташқи характеристикасини кескин тушувчи қилиб унинг эгрилигини оширади (50-расм, *в*). Амалда индуктив ғалтак трансформатор билан бир бутун қурилма сифатида тайёрланиши ҳам мумкин. Турли соҳаларда СТЭ-22, СТЭ-34, СТН-500 ва бошқа маркали пайвандлаш трансформаторлари кенг ишлатилади. СТЭ-34 маркали пайвандлаш трансформаторининг техник таърифи қуйидагича: $P_н$=30 кВА; U_1/U_2=220/60 В; I_1/I_2=147/500 А; салт ишлаш токи 3,4%; ўзак маркаси Э41 = 0,5; ФИК 93%; ток зичлиги 3,2 А/мм^2. Индуктив ғалтакники: кучланиши 50 В, пўлат маркаси 341—0,5; ток зичлиги 3,48 А/мм^2.

25. Ўлчов трансформаторлари

Оддий электр ўлчов приборларини тўғридан-тўғри юқори кучланишли (масалан: 10, 35, 110 кВ) ва катта токли (масалан: 200, 400, 600 А ва ҳоказо) занжирларга улаш мумкин эмас. Юқори кучланиш ва катта токни тўғридан-тўғри ўлчайдиган электр ўлчов приборлари амалда ишлатилмайди. Шунинг учун электр ўлчов приборлари юқори кучланишли ва катта токли занжирларга махсус ўлчов трансформаторлари орқали уланади. Ўлчов трансформаторлари электр ўлчов приборларининг ўлчаш чегараларини кенгайтириш ҳамда ўлчаш занжирларини юқори кучланишлардан ажратиш учун ишлатилади. Ўлчов трансформаторлари икки хил бўлади: а) к у ч л а н и ш т р а н с ф о р м а т о р л а р и; б) т о к т р а н с ф о р м а т о р л а р и. Кучланиш трансформаторлари ўлчаниши лозим бўлган юқори кучланишни ўлчаниши қулай бўлган паст кучланишга, яъни 100 В гача; ток трансформатори ўлчаниши лозим бўлган катта токни ўлчаш қулай бўлган кичкина токка, яъни 5 А гача камайтириб беради.

а) К у ч л а н и ш т р а н с ф о р м а т о р л а р и. Кучланиш трансформатори пўлат ўзак ва иккита чулғамдан иборат кичик кувватли оддий трансформатордир. Унинг ўрамлар сони кўп бўлган бирламчи чулғами (қисмалари *А—Х*) га ўлчаниши лозим бўлган юқори кучланиш U_1 берилади. Ўрамлар сони озгина бўлган иккиламчи чулғамига ички қаршилиги катта бўлган ўлчов приборлари (масалан, вольтметр, ваттметр ёки счётчикларнинг кучланиш ғалтаклари) параллел уланади (51-расм, *а*). Кучланиш трансформаторининг иккиламчи чулғам занжирига уланадиган ўлчов приборларининг қаршиликлари катта (масалан, 1000 Ом



51 расм. Кучланиш трансформаторининг уланиш схемаси (*а*) ва вектор диаграммаси (*б*).

ва ундан ортиқ) бўлгани учун бу занжирда ток жуда кичкина бўлади. Демак, кучланиш трансформатори оддий куч трансформаторининг салт ишлаш шароитига яқин шароитда ишлайди. Кучланиш трансформаторининг бирламчи чулғамига турли қийматли катта кучланиш берилганда унинг иккиламчи чулғамининг кучланиши $\dot{U}_2 = 100$ В бўлади. Демак, кучланиш трансформатори ўлчаниши лозим бўлган юқори кучланишни 100 В гача камайтириб берар экан.

Кучланиш трансформаторида ток қиймати жуда кичкина бўлгани учун унинг чулғамлари қаршилигида кучланиш пасайишини эътиборга олмаса ҳам бўлади. Бунда: $\dot{U}_1 \simeq -\dot{E}_1$ ва $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$ бўлади. Кучланиш трансформаторининг трансформация коэффициенти қуйидагича аниқланади:

$$K_к = \frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} \simeq \frac{U_1}{U_2}.$$

Трансформация коэффициенти трансформаторнинг паспортида кўрсатилади. Иккиламчи чулғамига 100 В ли вольтметр уланади. У ҳолда бирламчи (юқори) кучланиш қуйидагича аниқланиши мумкин:

$$\dot{U}_1 = K_к \cdot \dot{U}_2.$$

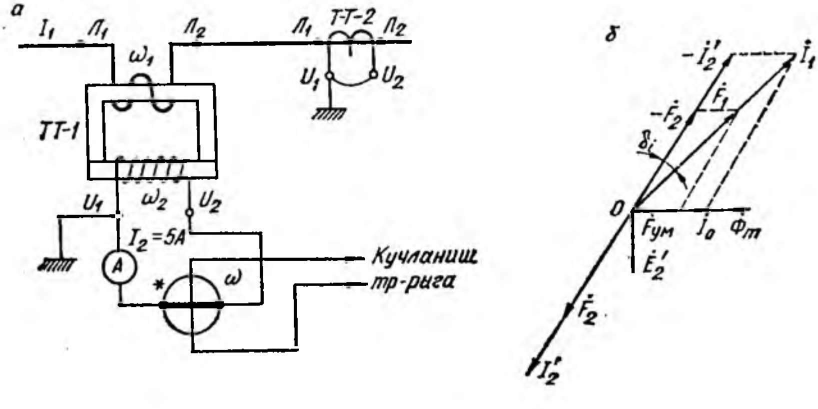
Кучланиш трансформатори ишлаганда унинг чулғамларидан кичкина ток ўтиб туради. Бу шароитда $\dot{U}_1 \neq \dot{E}_1$ ва $U_2 \neq E_2$ бўлади. Бундай ўлчашда хатоликка йўл қўйилади Ўлчашдаги нисбий хатолик қуйидагича аниқланади:

$$f_и = \frac{U_2 \cdot K_к - U_1}{U_1} \cdot 100\%.$$

0,5; 1 ва 3 аниқлик классидаги кучланиш трансформаторлари учун йўл қўйиладиган хатолик, мос ҳолда 0,5%; 1%; 3% дан ошмаслиги лозим. Бундан ташқари, кучланиш трансформаторида бурчак хатолиги $\delta_и$ ҳам бўлади. Трансформатор чулғамлари қаршилигида кучланиш пасайиши мавжуд бўлгани учун $\dot{U}$, ва $-\dot{U}_2^1$ векторлар бир фазада бўлмайди (51-расм, *б*), улар орасида $\delta_и$ бурчак бўлади. Шу бурчак, бурчак хатоликни аниқлайди, 0,5 ва 1 аниқлик классидаги трансформаторлар учун бурчак хатолик $\pm 20 \ldots \pm 40$ мин дан ортиқ бўлмаслиги керак. Кучланиш трансформаторлари иккиламчи чулғамининг номинал қуввати 20 ... 100 ВА гача боради.

Кучланиш трансформаторининг юқори ва паст кучланиш чулғамлари умумий ўзакда жойлашади. Чулғамлар изоляцияси бузилса иккиламчи чулғамда юқори кучланиш ҳосил бўлиши мумкин, бу ходимлар учун жуда хавфлидир. Шунинг учун иккиламчи чулғам қисмаларидан бири ва трансформаторнинг магнит ўтказгичи ерга улаб қўйилиши керак. Одатда, 6 кВ гача кучланишли трансформаторлар қуруқ трансформаторлар ҳисобланади, яъни улар ҳаво билан совитилади. Ундан ортиқ кучланишда мой билан совитиладиган кучланиш трансформаторлари қўлланилади. Кучланиш трансформаторлари ҳам бир ва уч фазали бўлади. Уч фазали трансформаторнинг чулғамлари юлдуз усулида уланади. НОМ-6, НОМ-10, НТМ-10 ва ҳоказо маркали кучланиш трансформаторлари кўп ишлатилади. Кучланиш трансформаторларининг бирламчи чулғамининг кучланиши 380 В дан 400 кВ гача бўлиши мумкин.

Ток трансформаторлари. Ток кучини ўлчашда катта токларни камайтириш ёки кичкина токларни кўпайтириб бериш учун ишлатилади. Бу трансформаторлар магнит ўзак ва иккита чулғамдан иборат. Бирламчи чулғами ўлчаниши лозим бўлган катта ток занжирига кетма-кет уланади. Унинг ўрамлари сони кичкина, кўпинча, $w_1 = 1$ бўлади, қисмалари $Л_1$ ва $Л_2$ ҳарфи билан белгиланади. Бу чулғам кўпинча тўртбурчак қирқимли йўғон мис симдан ўралади. Ток трансформатори иккиламчи чулғамининг ўрамлар сони кўп бўлади. қисмалари U_1 ва U_2 ҳарфи билан белгиланади (52-расм, *а*). Ток трансформаторларининг иккиламчи чулгам занжирига ички қаршилиги кичкина (0,05 ОМ ва ундан кичик) бўлган ўлчов приборлари (масалан, амперметр, ваттметр ва счётчикларнинг ток ғалтаклари) кетма-кет уланади. Ток трансформаторларида бирламчи чулғам токи 0,1 А дан 10000 А гача бўлиши мумкин. Иккиламчи чулғамнинг номинал токи сифатида 5 А ток қабул қилинган.



52-расм. Ток трансформаторининг уланиш схемаси (*а*) ва вектор диаграммаси (*б*).

Иккиламчи чулғам занжирига уланган приборларнинг қаршиликлари жуда кичкина бўлгани учун ток трансформаторлари нормал шароитда қисқа туташиш шароитига яқин шароитда ишлайди. Иккиламчи чулғам занжирига исталганча кўп ўлчов приборлари улаб бўлмайди, бунда нагрузка кўпайиб кетиши натижасида ток трансформаторининг аниқлиги бузилади. Ток трансформаторларида нагрузка қаршилиги 0,2 ... 2 Ом дан ортиқ бўлмаслиги керак. Ҳар бир ток трансформаторининг паспортида нагрузканинг номинал қаршилиги кўрсатилади. Ток трансформаторида иккиламчи чулғамнинг номинал қуввати 5 Вт дан 100 Вт гача бўлади.

Ток трансформатори ишлаганда унинг пўлат ўзагида жуда кичкина магнит оқими ҳосил бўлади, бу оқимни ҳосил қиладиган магнитловчи куч ҳам кичкина бўлади. Нагрузка уланган ток трансформаторининг магнитловчи кучлар тенгламаси қуйидагича ёзилади:

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

$I_0 w_1$ жуда кичкина бўлгани учун, у эътиборга олинмайди. Унда $I_1 w_1$ ва $I_2 w_2$ магнитловчи кучлар ўзаро мувозанатлашади, яъни:

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_2 w_2.$$

Бундан:

$$I_1 = \frac{w_2}{w_1} \cdot I_2 = K_т \cdot I_2.$$

Ток трансформаторининг трансформация коэффициенти:

$$K_т = \frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}.$$

Ҳар бир ток трансформатори паспортида унинг трансформация коэффициенти $K_т$ кўрсатилади. Унда бирламчи чулғам токи:

$$I_1 = K_т \cdot I_2.$$

Демак, амперметр кўрсатаётган токни трансформация коэффициентига кўпайтириб бирламчи чулғамдан ўтаётган катта ток қийматини аниқлаш мумкин экан. Кўпинча электр ўлчов приборлари уланган занжир юқори кучланишли занжирдан ток трансформатори воситасида ажратилади. Бирламчи чулғам изоляцияси бузилса, юқори кучланишнинг иккиламчи чулгам занжирига ўтиши жуда хавфли. Шунинг учун иккиламчи чулгам қисмаларидан бири ва пўлат ўзак ерга уланган бўлиши керак. Ток трансформатори ишлаб турганда иккиламчи чулғам занжири узилиб қолса, бирламчи чулғамдаги катта ток магнитловчи ток бўлиб қолади, оқибатда магнит оқими кўпайиб кетади. Нормал шароитда жуда кичкина бўлган иккиламчи чулғам кучланиши жуда кўпайиб кетади, бу эса ходимлар учун жуда хавфлидир. Пўлат ўзакда қувват исрофи кўпайиб кетиши натижасида трансформатор қизиб

кетади ва бузилади. Иккиламчи чулғам занжири узилиб қолмаслиги учун бу мақсадда кўндаланг қирқими 2,5 ... 4 мм бўлган йўғон мис симлар ишлатилиши керак. Агар бирламчи чулғамдан ток ўтиб турганда иккиламчи чулғамга ўлчов приборлари уланмайдиган бўлса, бу чулғам қисқа туташтириб қўйилиши лозим. Агар ток трансформаторининг нагрузкаси кўпайиб кетса, ўлчашдаги хатолик кўпайиб кетади. Токни ўлчашдаги хатолик қуйидагича аниқланади:

$$f_1 = \frac{I_2 \cdot w_2/w_1 - I_1}{I_1} \cdot 100\%.$$

Класси 0,2; 0,5; 1; 3; 10 бўлган ток трансформаторлари учун бирламчи ток номинал қийматга эга бўлганда, ўлчашдаги хатолик мос ҳолда 0,2; 0,5; 1; 3 ва 10% дан ортмаслиги керак.

Бундан ташқари, ток трансформаторларида бурчак хатолиги δ_1 ҳам бўлади. Бурчак хатолиги I_1w_1 ва I_2w_2 магнитловчи кучлари векторлари орасидаги бурчак билан минутларда аниқланади (52-расм, *б*). Бурчак хатолиги 0,2; 0,5 ва 1 класс ток трансформаторлари учун, мос ҳолда, 10, 40 ва 80 мин дан ортиқ бўлмаслиги керак. Магнитловчи ток ортса, трансформаторнинг иккала хатолиги ҳам ортади.

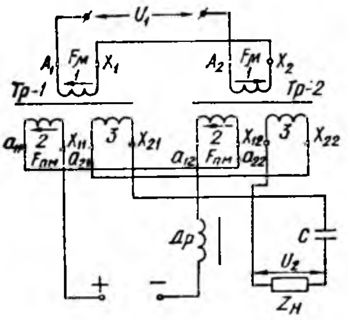
Ўлчов трансформаторлари ёрдамида қувват ва сарфланадиган энергия ҳам ўлчанади. Юқори кучланишли ва катта токли занжирларга ваттметр ва счётчиклар кучланиш ҳамда ток трансформаторлари орқали уланади. Бунда уларнинг ток ғалтаклари ток трансформаторига, кучланиш ғалтаклари эса кучланиш трансформаторига уланади. Бирламчи занжир қувватини аниқлаш учун ваттметр кўрсатаётган қийматни (W) ток ва кучланиш трансформаторларининг трансформация коэффициентига кўпайтириш лозим, яъни:

$$P_1 = W \cdot K_к \cdot K_т.$$

26. Частотани ўзгартирувчи трансформатор схемалари

Частотани 2 ва 3 марта оширадиган трансформаторлар схемалари амалда кўп ишлатилади.

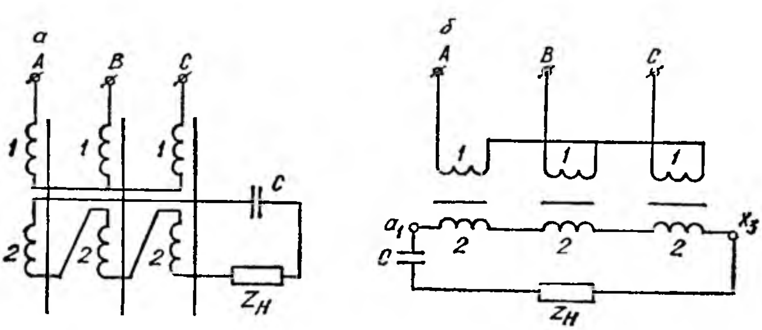
Ч а с т о т а н и и к к и м а р т а о ш и р и ш. Бу қурилма $Тр=1$ ва $Тр-2$ лардан иборат бўлиб, ҳар бир трансформатор учтадан чулғамга эга: бирламчи чулғам *1*, қўшимча магнитловчи чулғам *2* ва иккиламчи чулғам *3*. Трансформаторларнинг бирламчи чулғамлари тескари тартибда кетма-кет уланади, қўшимча магнитловчи ва иккиламчи чулғамлар тўғри кетма-кет уланади (53-расм). Шунинг учун таъминловчи кучланиш U_1 ўзгаришининг биринчи ярим даври давомида трансформаторларнинг бирига $F_{ум}+F_{\mu}$, бошқасига уларнинг айирмаси ($F_{ум}-F_{\mu}$) га тенг бўлган магнитловчи куч таъсир этади. Бу ерда: $F_{ум}$ ва F_{μ} қўшимча магнитлайдиган ва бирламчи чулғамнинг магнитловчи кучлари. Натижада биринчи трансформаторнинг ўзаги тўйинган ҳолда бўлади, магнит оқимининг Φ_1 ўзгариш эгри чизиғи япалоқлашади;



53- расм. Частотани икки марта оширишнинг трансформатор схемаси.

иккинчи ўзакдаги Φ_2 нинг эгри чизиғида оқим камайиб кетади. Кейинги ярим даврда F_μ нинг йўналиши ўзгаради, $F_{ум}$ илгаригидагича қолади. Оқимлар Φ_1 ва Φ_2 нинг ўзгариши ҳам алмашинади. Улар бирбиридан 180° га силжийди ва носимметрик бўлади. Демак, уларда тоқ ва жуфт гармоникалар бўлмайди. Бирламчи чулғамда ЭЮК E_1 оқимлар Φ_1 ва Φ_2 нинг айирмаси билан ҳосил қилинади. Бу айирма оқим частота f_1 билан ўзгаради. Кетма-кет уланган иккиламчи чулғамларда йиғинди ЭЮК йиғинди оқим $\Phi_1 + \Phi_2$ таъсирида ҳосил қилинади ҳамда бу ЭЮК биринчи ва тоқ гармоникаларга эга бўлмайди. Шунинг учун иккиламчи чулғам U_2 кучланиш Φ_1 ва Φ_2 оқимларнинг иккинчи гармоникаси билан аниқланади, яъни икки марта ортиқ частота билан ўзгаради (частотаси $2f_1$ бўлади). Қўшимча магнитлайдиган чулғамдаги токни ростлаб, қурилманинг чиқиш кучланиши U_2 ни ўзгартириш мумкин бўлади. Қўшимча магнитлайдиган чулғамдан ўзгарувчан ток ўтмаслиги учун, бу занжирга дроссель *Др* уланади. Иккиламчи чулғамда кучланиш пасайишини компенсациялаш учун нагрузка қаршилиги $Z_н$ билан кетма-кет сиғим *С* уланади. Сиғим қурилманинг қувват коэффициентини оширади.

Частотани уч марта ошириш. Частотани уч марта ошириш уч фазали тармоққа уланган трансформаторнинг пўлат ўзаги тўйинганда ҳосил бўладиган учинчи гармоникалардан фойдаланишга асосланган. Олдин айтилганидек (14-§), трансформаторнинг иккиламчи чулғами учбурчак усулида уланганда айрим фазаларда ЭЮК учинчи гармоникасининг ўзгариши бир хил бў-



54- расм. Частотани уч марта оширишнинг трансформатор схемаси:

а — уч фазали трансформатор ёрдамида, *б* — учта бир фазали трансформатор ёрдамида.

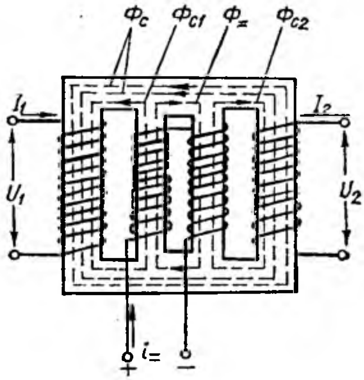
лади ва шу чулғамлардан частотаси уч марта ортиқ ток оқа бошлайди. Демак, трансформатор ишлаганда унинг пўлат ўзагини тўйинган ҳолда бўладиган қилиб тайёрланади (бунда учинчи гармоника ЭЮК катта бўлади) ва иккиламчи чулғамларни очиқ учбурчак усулида уланади (54- расм, *а*), бунда иккиламчи чулғамга уланган нагрузка ($Z_н$) га частотаси $3f_1$ бўлган кучланиш берилиши мумкин. Уч фазали трансформатор ўрнида учта бир фазали трансформатор ишлатилиши ҳам мумкин (54- расм, *б*).

Частота уч марта ортганда трансформаторда кучланиш пасайиши анча кўпаяди. Кучланиш пасайишини компенсациялаш учун $Z_н$ га кетма-кет қилиб сиғим C уланади. Частотани 4,6 ва 8 марта оширувчи аппаратлар ҳам амалда қўлланилади.

27. Кучланиши текис ростланадиган трансформатор

Трансформаторларнинг кучланиши кўпинча поғонали ростланади. Кўп ҳолларда трансформатор кучланишини катта диапазонда жуда текис ростлаш талаб қилинади. Кўпинча бу мақсадда чулғамнинг изоляцияланмаган ташқи юзасида сирпанадиган контакт чўткалар ишлатилади ва шу асосда уланадиган чулғам ўрамларини текис ўзгартирилади. Бу усул кичик қувватли автотрансформатор (ЛАТР) ларда қўлланилади. Катта қувватли трансформатор ва автотрансформаторларда кучланишни ўзгартириш учун ўрам қисми қисқа туташганда қисқа туташиш токини чегараловчи қаршиликли иккита чўтка ишлатилади. Амалда қўзғалувчан чулғамли ёки қўзғалувчан ўзакли трансформаторлар ҳам қўлланилади. Бунда трансформаторнинг параллел уланган иккита бирламчи чулғами стерженнинг пастида ва юқорисида ўрнатилади. Иккиламчи чулғами эса қўзғалувчан ўзакда ўрнатилади. Ўзак сурилганда иккиламчи чулғам билан қуршаладиган магнит оқими ўзгаради ва кучланиш қиймати $+U_2$ дан (иккиламчи чулғам юқорида) $-U_2$ гача (пастда) жуда текис ўзгаради.

Сўнгги вақтларда ўзгармас ток билан қўшимча магнитланадиган элементли (кучланиши текис ростланадиган) трансформаторлар ишлатилмоқда. Бундай бир фазали трансформаторнинг бирламчи ва иккиламчи чулғамлари иккита чекка стерженларга ўрнатилади (55- расм). Стерженлар орасида магнит шунти бўлади. Магнит шунти ҳам махсус пўлатдан йиғилади. Магнит шунти чулғамларнинг электромагнит алоқасини пасайтиради, сочилма оқимлар эса кўпаяди. Фойдали оқим чекка стерженлар билан



55- расм. Қўшимча магнитловчи чулғамли бир фазали трансформатор.

қуршалади. Агар кичкина магнитловчи ток эътиборга олинмаса, I_1 ва I_2 токлар магнит шунти орқали қуршаладиган сочилма оқимлар Φ_{c1} ва Φ_{c2} ни ҳосил қилади. Сочилма оқим катта бўлгани учун чулғамларнинг индуктив қаршилигида кучланиш пасайишлари (jI_1x_1 ва jI_2x_2) катта бўлади ва иккиламчи кучланиш анча камаяди. Магнит шунтининг иккита стерженида ўзгармас ток манбаига уланадиган қўшимча магнитловчи чулғам ўралади. Ўзгармас ток ҳосил қиладиган магнит оқими фақат шунт орқали беркилади. Ток қанча катта бўлса, магнит оқими ҳам шунча катта бўлади, бунда ўзак кучлироқ тўйинади. Натижада Φ_{c1} ва Φ_{c2} оқимлар камаяди, бу эса иккиламчи чулғам кучланишининг кўпайишига олиб келади. Ўзгармас ток қийматини ўзгартириб, иккиламчи чулғам кучланиши қийматини жуда текис ўзгартириш мумкин бўлади. Иккиламчи чулғамнинг бир қисми бирламчи чулғам стерженида ўрнатилиши ҳам мумкин. Бунда чулғамларнинг электромагнит алоқаси кучаяди, сочилма оқим камаяди, ростлаш диапазони ҳам камаяди.

28. Тўғрилагич схемаларида ишлатиладиган трансформаторлар

Вентиль ўзгартиргич қурилмаларида трансформаторлар кўп ишлатилади. Уларнинг иккиламчи чулғамига токни фақат бир йўналишда ўтказадиган вентиллар уланади. Бундай трансформаторларнинг ўзига хос хусусиятларидан бири айрим фазаларда нагрузка қийматининг бир хил бўлмаслигидир. Чунки, турли фазаларга уланган вентиллар навбатма-навбат ишлайди. Нагрузканинг нотекислиги бирламчи (I_1) ва иккиламчи (I_2) чулғам токлари эгри чизиғида анчагина юқори гармоникаларнинг бўлишига ва айрим тўғрилагич схемаларида магнит ўтказгичнинг қўшимча магнитланишига сабаб бўлади. Демак, вентиль ўзгартиргичларда қўлланиладиган трансформаторларнинг чулғамларидан носинусоидал токлар ўтади. Бу токлар таркибида юқори гармоникалар қуйидаги сабабларга кўра ҳосил бўлади: а) айрим фаза иккиламчи чулғамларига уланган вентиллар токни ўзидан даврнинг фақат бир қисмидагина ўтказади; б) ўзгартиргичнинг ўзгармас ток томонга индуктивлиги катта бўлган текисловчи дроссель уланади, бунда трансформатор чулғамларидаги токнинг шакли тўғри бурчакка яқин бўлиб қолади.

Умумий ҳолда I_1 ва I_2 токларнинг таъсир этувчи қийматлари ҳар хил бўлиши натижасида бирламчи ва иккиламчи чулғамларнинг ҳисоблаш қувватлари $S_{1н}$ ва $S_{2н}$ бир хил бўлмайди. Шунинг учун вентиль ўзгартиргич трансформаторининг типавий қуввати тушунчаси киритилади:

$$S_т = \frac{1}{2}(S_{1н} + S_{2н}).$$

Типавий қувват коэффициенти:

$$k_т = \frac{S_т}{P_{dн}},$$

бу ерда: $P_{dн} = U_{dн} I_{dн}$ — ўзгартиргичнинг ўзгармас ток томонида талаб қилинадиган қуввати, яъни чиқиш қуввати; $U_{dн}$ ва $I_{dн}$ — ўзгармас ток томонида кучланиш ва токнинг номинал қийматлари.

Нагрузка номинал бўлганда трансформаторнинг типавий қуввати $S_т$ унинг чиқиш қуввати $P_{dн}$ дан катта бўлади. Шунинг учун бундай трансформаторларнинг ўлчамлари ва оғирлиги, синусоидал токда ишлайдиган худди шундай трансформаторнинг номинал қуввати ($S_н = mU_{2н} I_{2н}$) дан катта бўлади.

Вентилларнинг турли хил уланиш схемаларига ва тўғриланган ток шаклини аниқлайдиган нагрузка характерига (актив ёки актив индуктив) хос типавий қувватнинг қиймати бўлади. Энг кўп тарқалган ўзгартиргич схемалари учун ўзгартиргич идеал шароитда ишлаганда (яъни тўғриланган ток I_d тўла текисланганда, бир вентилдан иккинчи вентилга оний вақтда ўтилганда, трансформаторнинг индуктивликлари бўлмаганда ва унда энергия исроф бўлмаганда) типавий қувватлар қийматини аниқлаймиз.

Трансформатордан ноль сим чиқариладиган бир фазали тўғрилагич схемасида (56-расм) иккиламчи ва бирламчи тўла кувватлар:

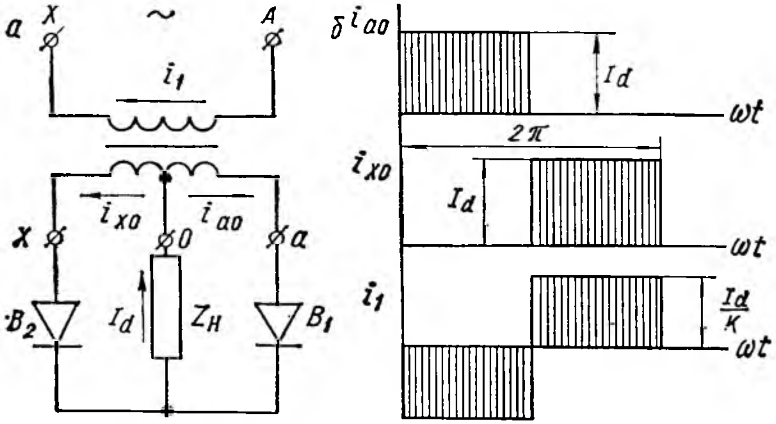
$$S_{2н} = 2U_{2н} \cdot I_{2н} = 2\frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{dн} \cdot \frac{I_{dн}}{\sqrt{2}} = 1{,}57 U_{dн} \cdot I_{dн} = 1{,}57 P_{dн},$$

$$S_{1н} = U_{1н} I_{1н} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{dн} \cdot k \cdot \frac{I_{dн}}{k} = 1{,}11 U_{dн} I_{dн} = 1{,}11 P_{dн},$$

бу ерда:

$U_{2н} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{dн}$ — трансформаторнинг иккиламчи номинал кучланиши (таъсир этувчи қиймати),

$U_{1н} = U_{2н} \cdot k$ — бирламчи номинал кучланиши,



56-расм. Иккита ярим даврли тўғрилагичнинг трансформатордан ноль сим чиқарилган схемаси (*а*) ва бирламчи ҳамда иккиламчи чулғамларда токнинг ўзгариш графиги (*б*).

$I_{2н} = \frac{I_{dн}}{\sqrt{2}}$ — иккиламчи чулғамда токнинг номинал (таъсир этувчи) қиймати,

$I_{1н} = I_{dн}/k$ — бирламчи чулғам номинал токи,

$k = w_1/w_2$ — трансформация коэффициенти,

2 — иккиламчи чулғам фазалари сони.

Трансформаторнинг типавий қуввати:

$$S_т = \frac{S_{1н} + S_{2н}}{2} = \frac{1{,}11+1{,}57}{2} P_{dн} = 1{,}34\ P_{dн}.$$

Типавий қувват коэффициенти:

$$k_т = 1{,}34.$$

Тўғрилашнинг бир фазали кўприк схемасида (57-расм):

$$S_{2н} = U_{2н} I_{2н} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{dн} \cdot I_{dн} = 1{,}11\ U_{dн}\, I_{dн} = 1{,}11\ P_{dн},$$

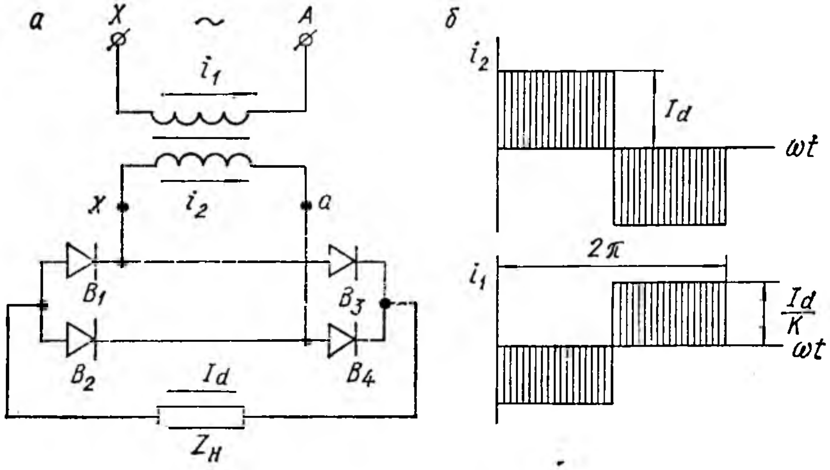
$$S_{1н} = U_{1н} I_{1н} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{dн} \cdot k \frac{I_{dн}}{k} = 1{,}11\ U_{dн} \cdot I_{dн} = 1{,}11\ P_{dн}.$$

бу ерда: $\dot{U}_{2н} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{dн}$, $U_{1н} = \dot{U}_{2н} \cdot k$,

$$I_{2н} = I_{dн}, \quad I_{1н} = \frac{I_{dн}}{k},$$

трансформаторнинг типавий қуввати:

$$S_т = \frac{S_{1н} + S_{2н}}{2} = \frac{1{,}11+1{,}11}{2} \dot{U}_{dн}\, I_{dн} = 1{,}11P; \quad K_т = 1{,}11.$$



57-расм. Тўғрилашнинг иккита ярим даврли кўприк схемаси (*а*) ва бирламчи ҳамда иккиламчи чулғамларда токнинг ўзгариш графиги (*б*).

Демак, тўғрилашнинг кўприк схемасида трансформатордан ноль сим чиқариладиган схемага қараганда трансформатордан яхшироқ фойдаланилар экан.

Ўзгартиргич актив характерли нагрузкада ишлаганда бирламчи ва иккиламчи чулғам токлари ярим синусоидал шаклга эга бўлади, бунда уларнинг таъсир этувчи қийматлари:
ноль сим чиқарилган схемада:

$$I_{2н} = \frac{\pi}{4} I_{dн}; \quad I_{1н} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{dн}}{K},$$

кўприк схемада:

$$I_{2н} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_{dн}; \quad I_{1н} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{dн}}{K}.$$

Бунда трансформаторнинг типавий қуввати қуйидаги формулалар бўйича аниқланади:
ноль сим чиқарилган схемада:

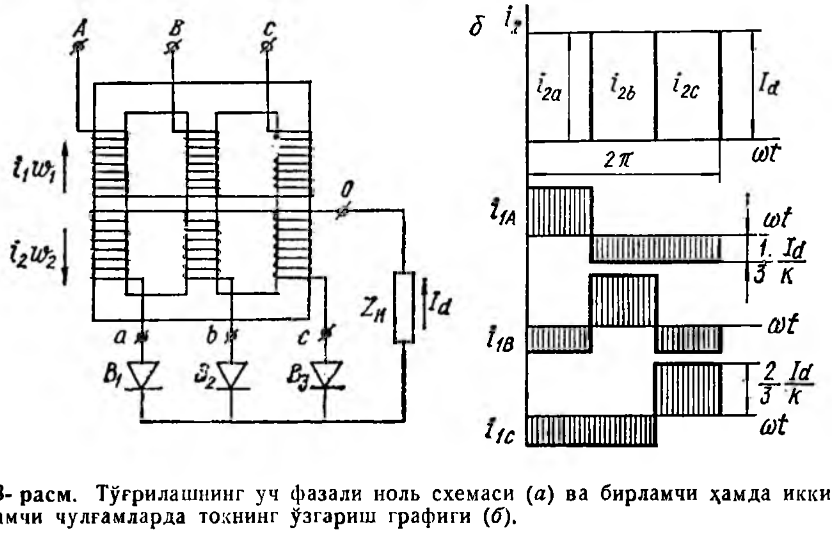
$$S_{2н} = 2\frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{dн} \cdot \frac{\pi}{4} I_{dн} = \frac{\pi^2}{4\sqrt{2}} P_{dн} = 1{,}74 P_{dн},$$

$$S_{1н} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{dн} \cdot K \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{dн}}{K} = \frac{\pi^2}{8} P_{dн} = 1{,}23 P_{dн},$$

$$S_{т} = \frac{1{,}23 + 1{,}74}{2} = 1{,}48\, P_{dн};$$

кўприк схемасида:

$$S_{2н} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{dн} \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot I_{dн} = \frac{\pi^2}{8} P_{dн} = 1{,}23 P_{dн},$$



58- расм. Тўғрилашнинг уч фазали ноль схемаси (*а*) ва бирламчи ҳамда иккиламчи чулғамларда токнинг ўзгариш графиги (*б*).

$$S_{1н} = S_{2н} = 1{,}23P_{dн}; \quad S_т = 1{,}23P_{dн}; \quad к_т = 1{,}23;$$

ноль симли уч фазали схемада (58- расм):

$$S_{2н} = 3U_{2н}I_{2н} = 3\frac{2\pi}{3\sqrt{6}}\dot{U}_{dн}\cdot\frac{1}{\sqrt{3}}I_{dн} = 1{,}48P_{dн};$$

$$S_{1н} = 3U_{1н}I_{1н} = 3\frac{2\pi}{3\sqrt{6}}U_{dн}\cdot к\frac{\sqrt{2}I_{dн}}{3\cdot к} = 1{,}2P_{dн};$$

трансформаторнинг типавий қуввати:

$$S_т = \frac{1{,}2 + 1{,}48}{2} = 1{,}34P_{dн}; \quad K_т = 1{,}34.$$

Тўғрилашнинг уч фазали ва олти фазали бошқа схемалари учун трансформаторниңг типавий қувватининг коэффициенти шунга ўхшаш аниқланади. Масалан, уч фазали кўприк схемасида $K_т = 1{,}05$ бўлади.

II БЎЛИМ. ЭЛЕКТР МАШИНАЛАРИ

VI БОБ. ЎЗГАРУВЧАН ТОК ЭЛЕКТР МАШИНАЛАРИГА ТЕГИШЛИ УМУМИЙ МАСАЛАЛАР

29. Ўзгарувчан ток электр машиналарининг асосий турлари

Ўзгарувчан ток электр машиналари синусоидал ўзгарувчан токда ишлашга мўлжаллаб тайёрланади. Ўзгарувчан ток электр машиналарининг (синхрон ва асинхрон машиналарнинг) ишлаш принципи учта чулғамдан уч фазали ток ўтганда айланма магнит майдонининг ҳосил бўлишига асосланади. Шунинг учун ҳам уларнинг назариясида умумийлик кўп. Ҳозирги вақтда уч фазали ўзгарувчан ток машиналари жуда кенг ишлатилмоқда. Ўзгарувчан ток электр машиналари уч группага бўлинади: а) коллекторсиз асинхрон машиналар; б) коллекторли асинхрон машиналар; в) синхрон машиналар.

Ўзгарувчан ток электр машиналари асосан икки қисмдан иборат бўлади: қўзғалмас қисм — статор; айланадиган қисм — ротор. Статор ва ротор орасида ҳаво оралиғи бўлади. Бу оралиқ синхрон машиналарда нисбатан каттароқ, асинхрон машиналарда кичкина (масалан, 0,2 ... 3 мм) бўлади. Асинхрон ва синхрон машиналарда статорнинг тузилиши деярли бир хил; лекин уларнинг роторлари тузилиши жиҳатидан ҳар хил бўлади. Амалда бир ва уч фазали асинхрон ва синхрон машиналар жуда кенг ишлатилади. Уч фазали машиналар статорида учта чулғам; бир фазали машиналарда эса битта чулғам бўлади. Синхрон ва асинхрон машиналарнинг статорида жойлашган уч фазали чулғамдан уч фазали ток ўтганда статорда айланувчан (айланма) магнит майдони ҳосил бўлади. Синхрон машиналарда роторнинг айланиш тезлиги (айланиш частотаси) айланма магнит майдонининг айланиш частотасига тенг, яъни ротор ва айланма магнит майдони синхрон айланади. Бундай машиналар синхрон машиналар дейилади. Синхрон машиналар асосан ўзгарувчан ток генераторлари сифатида ишлатилади ва улар турли хил электр станцияларида ўрнатилади. Лекин синхрон машиналар синхрон двигателлар сифатида ҳам кенг қўлланади.

Асинхрон машиналарда роторининг айланиш частотаси айланма магнит майдонининг айланиш частотасига тенг бўлмайди, яъни улар синхрон айланмайди. Бундай машиналар асинхрон машиналар дейилади. Асинхрон машиналар асосан двигателлар сифатида ишлатилади. Халқ хўжалигининг турли соҳаларида миллионлаб асинхрон двигателлар турли механизмларни ҳаракатга келтирмоқда. Умуман, синхрон ва асинхрон машиналар гене-

ратор сифатида ҳам, двигатель сифатида ҳам ишлай олади. Бундан ташқари, синхрон машиналар синхрон компенсаторлар сифатида; асинхрон машиналар эса электромагнит тормоз ва частота ўзгартирувчи машина сифатида ишлатилади.

Ўзгарувчан токнинг коллекторли машиналарида ҳам ротор айланма магнит майдони билан бир хил тезликда айланмайди ва бу жиҳатдан улар асинхрон машиналар ҳисобланади. Лекин бундай машиналарда коллектор бўлганлиги сабабли улар алоҳида группани ташкил қилади. Коллекторли машиналар кўпроқ двигатель сифатида ишлатилади. Уларнинг ишлаш принципи ўзгармас ток машиналарининг иш принципига яқин. Ўзгарувчан ток коллекторли машиналари амалда кам ишлатилади. Асинхрон ва синхрон машиналар ҳақида кейинроқ муфассал тўхталамиз, аввал ўзгарувчан ток машиналарига оид умумий масалалар ҳақида гапириб ўтамиз.

30. Ўзгарувчан ток электр машиналари чулғамларининг тузилиши

Электр машиналарнинг ферромагнит ўзаги (магнит ўтказгичи) ва чулғамлари унинг асосий актив қисмларидир. Қолганлари машинанинг пишиқлигини, мустаҳкамлигини, унинг айланишини ва совитилишини таъминловчи конструктив қисмлардир.

Асинхрон ва синхрон машиналарда статорнинг тузилиши бир хил бўлади. Бундай машиналарнинг статори унинг корпуси (станинаси), асоси, корпусни икки томонидан беркитиб турадиган подшипник шчитлари ҳамда статорнинг корпуси ичида махсус юпқа электротехника пўлат пластинкаларидан йиғилган пўлат ўзакдан иборат. Пўлат ўзак пазларига, фазода бир-бирига нисбатан 120° силжиган, учта чулғам ўрнатилган. Бир фазали машиналар статорида битта чулғам бўлади. Асинхрон ва синхрон машиналарда статор чулғамини, одатда, *якорь чулғами* дейилади.

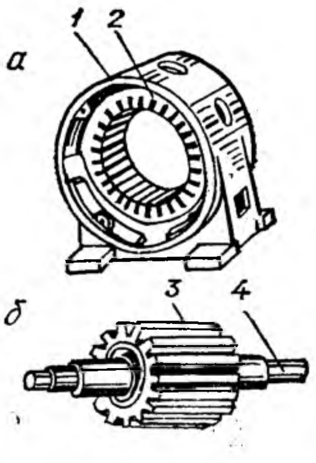
Олдин айтиб ўтганимиздек, синхрон ва асинхрон машиналар статорига ўрнатилган уч фазали чулғамдан уч фазали ток ўтганда статор ичида айланма магнит майдони (оқими) ҳосил бўлади. Бу оқим статор ва ротор чулғамлари билан кесишади ва уларда ЭЮК ҳосил қилади. Бу умумийлик асинхрон ва синхрон машиналарда кўп фазали чулғамлар конструкциясининг бир хил бўлишига сабаб бўлади. Ўзгарувчан ток машиналарининг чулғамлари статорнинг ички юзасидаги пазларга, роторнинг эса ташқи юзасидаги пазларга жойлаштирилади. Асинхрон машинанинг статори ва роторидаги ферромагнит ўзаклар 69- расм, *а* ва *б* да кўрсатилган.

Электр машиналарида магнит оқими беркиладиган пўлат ўзак махсус юпқа электротехника пўлат листидан йиғиб тайёрланади. Статор ва роторнинг пўлат ўзакларининг таркибида 1 ... 3% кремний бўлади. Пўлат листларининг қалинлиги 0,3 ... 0,5 мм. Пўлат ўзак йиғилгандан сўнг станинага пресслаб ўрнатилади. Статор станинаси эса алюминий ёки чўяндан тайёрланиши мум-

кин. Асинхрон машиналарда ҳам роторнинг пўлат ўзаги махсус пўлат листлардан йиғилади ва валга ёки ротор втулкасига прессслаб маҳкамланади. Микромашиналарда пўлат ўзаклар темир-никель қотишмаси, яъни пермаллой пластинкалардан йиғилади.

Электр машиналарида статор ва ротор пўлат ўзаги пазларининг шакли машина турига ва унинг қувватига боғлиқ. Катта қувватли машиналарда чулғамлар тўртбурчак қирқимли симлардан тайёрланади.

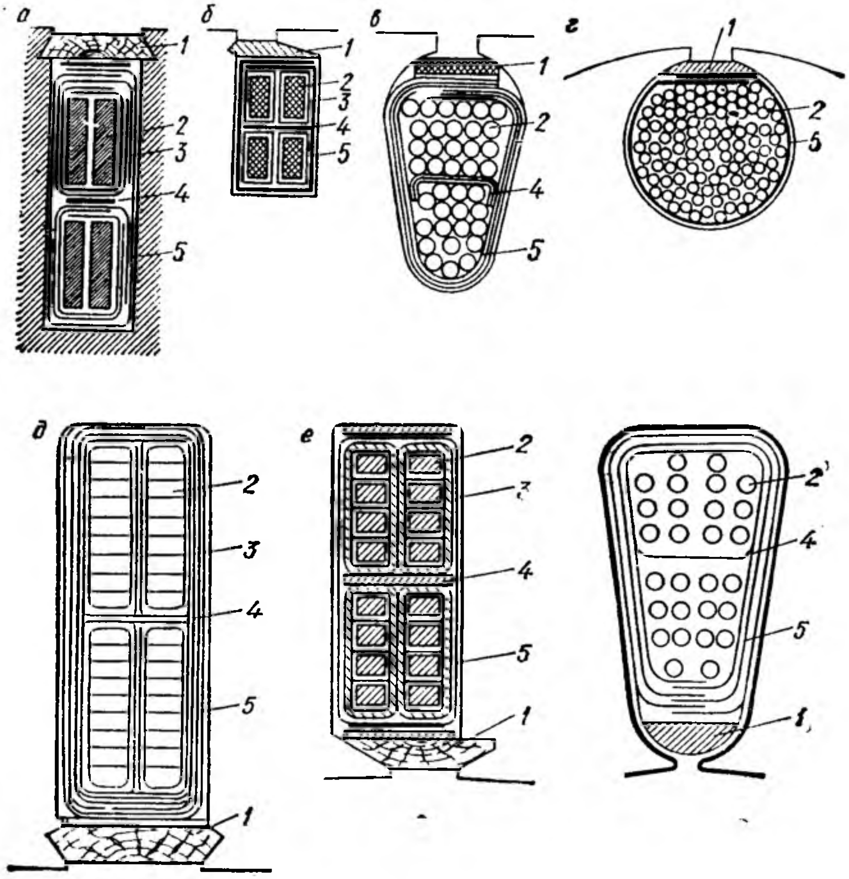
Бундай машиналарда очиқ пазлар (60-расм, *а* ва *д*) қўлланилади. Улар тўғри тўртбурчак шаклида бўлади. Катта қувватли машиналарда баъзан ярим очиқ пазлар ҳам қўлланилади (60-расм, *б*). Ўртача ва катта қувватли машиналарда доим ярим ёпиқ пазлар (60-расм, *в*, *г*,) қўлланилади. Микромашиналарда доира шаклидаги ярим ёпиқ пазлар қўлланилади. Статор ва ротор пўлат ўзаги пазларига чулғамлар ўрнатилади.



59-расм. Статор (*а*) ва ротор (*б*) пўлат ўзаги пазларининг кўриниши:

1 — станина—корпус ва асос, *2* — статор ўзаги, *3* — ротор пўлат ўзаги, *4* — вал.

Синхрон ва асинхрон машиналарда статор (якорь) чулғамлари мис ёки алюминий симлардан ўралади. Ўртача ва кичик қувватли машиналар чулғам симларининг кўндаланг қирқими юзаси доира шаклида бўлади. Катта қувватли машиналарда эса тўртбурчак қирқимли мис симлар ишлатилади. Чулғамлар сифатида икки қават ип билан ёки махсус лок билан изоляцияланган симлар ишлатилади. Изоляциясининг пишиқлигини ошириш учун чулғам симлари 120°С температурали вакуумда қуритилади ва юқори босимда махсус изоляцияловчи лок шимдирилади. Статор чулғамлари бир нечта бўлаклардан (секциялардан) тузилади. Бўлаклар (ёки чулғам ғалтаклари) бир ўрамдан ёки бир нечта ўрамдан иборат бўлиши мумкин. Чулғам бўлаклари маълум тартибда уланади ва пазларга тартиб билан жойлаштирилади. Ўрамнинг пазларда ётган қисми ёки томони унинг **актив томони** дейилади. Ўрамнинг иккита актив томонини бирлаштирувчи ва пазнинг ташқарисида ётадиган қисми унинг **ён ёки ташқи томони** дейилади. Ўрамнинг ён томони унинг актив томонларини ўзаро кетма-кет улайди. ЭЮК ўрамнинг актив томонида ҳосил бўлади. Бир бўлакнинг актив томони орасидаги масофа, яъни бўлак эни **чулғам қадами** дейилади ва y билан белгиланади. Статор чулғамларидан уч фазали ток ўтганда статорда айланма магнит майдони ҳосил бўлиши бизга маълум. Бу майдон 2, 4, 6 ва ундан ортиқ қутбли майдон бўлиши мумкин. Якорь айланаси узунлигининг қутблар сонига нисбати, яъни



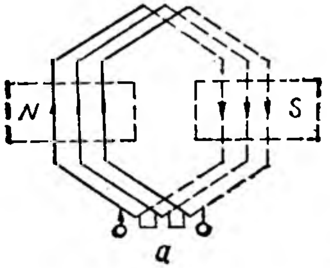
60-расм. Ротор (*а*, *б*, *в*, *г*) ва статор (*д*, *з*) пўлат ўзакларининг пазлари: очиқ (*а*, *д*), ярим очиқ (*б*, *е*), ёпиқ (*в*, *г*), ярим ёпиқ (*з*):

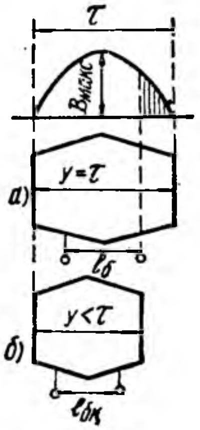
1 — пона, *2* — симлар, *3* — қатлам изоляцияси, *4* — қаватлараро изоляция, *5* — паз изоляцияси.

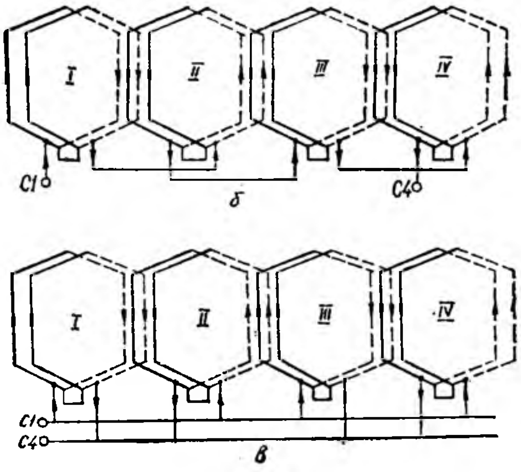
қутблар маркази орасидаги масофа қутблар оралиғи (τ) дейилади ва қуйидагича аниқланади:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad \text{ёки} \quad \tau = \frac{z}{2p}, \qquad (2\text{-}1)$$

бу ерда: p — жуфт қутблар сони; z — статор ёки ротор пазларининг сони. Чулғам одими қутблар оралиғи (τ) га тенг ёки унга яқин қилиб олинади. Агар чулғам одими қутблар оралиғига тенг ($y = \tau$) бўлса, бундай чулғам тўла одимли чулғам дейилади (61-расм, *а*). Агар чулғам одими қутблар оралиғидан кичик ($y < \tau$) бўлса, чулғам қисқарган одимли чулғам дейилади (61-расм, *б*). Амалда чулғам одими статор пўлат ўзагидаги пазлар сони билан ифодаланади. Чулғам одими бир ўрамнинг







61- расм. **62- расм.**

биринчи актив томони бир пазда ётса, унинг иккинчи актив томони қайси пазда ётишини кўрсатади. Масалан, агар $y=6$ бўлса, ўрамнинг биринчи актив томони 1- пазда; унинг иккинчи актив томони 7- пазда ётади. Бу шартли белги (1-7) билан ифодаланади.

Бир қутб тагида қўшни пазларда ётган ва чулғамнинг бир фазасига тегишли кетма-кет уланган бўлаклар ғалтак (ёки бўлаклар) группаси дейилади. Уч фазали машиналарнинг бир фаза чулғами ғалтак группаси бўлади (62- расм, *а*). Айрим фаза чулғамининг ғалтак группалари ўзаро кетма-кет ёки параллел уланади. Кўпинча ғалтак группалари кетма-кет уланади. Масалан, 62- расм, *б* да чулгамнинг 4 та ғалтак группаси кетма-кет уланган ва бир фаза чулғамининг (магнит қутблари сонидан қатъи назар) фақат битта параллел қисмини ташкил қилади. Агар чулғам токи кўзда тутилгандан катта бўлса, чулғам ғалтаклари ёки бўлаклари ўзаро параллел уланади (62- расм, *в*). Бунда бир нечта параллел шохобчалар ҳосил бўлади. Чулғамнинг эффектив сими битта ёки иккита, ёки бир нечта (параллел уланган) элементар симлардан тайёрланиши мумкин.

Ўзгарувчан ток электр машиналарининг якорь чулғамлари бир фазали ёки уч фазали бўлади. Чулғам бўлакларининг пазларда жойлашишига қараб бир қаватли ва икки қаватли чулғам бўлади. Чулғам бўлаклари чулғам ғалтаклари деб ҳам юритилади. Битта пазда чулғам бўлагининг бир актив томони ётса, бир қаватли чулғам; агар битта пазда иккита бўлакнинг бир томони (яъни иккита сим) ётса, икки қаватли чулғам дейилади. Бўлак ўлчамларига қараб чулғам тўла одимли ёки қисқарган одимли чулғам бўлади. Ўзгарувчан ток машиналари (асинхрон ва синхрон) статорларида асосан уч фазали, икки қаватли, қисқарган одимли чулғам кенг қўлланади. Уч фазали чулғам фазода бир-бирига нисбатан 120° электр градусга силжиган учта чулғамдан иборат бўлади. Статор айланаси 360° фазовий градусга тенг, демак, бунда $p=1$ бўлади. Агар чулғам тўрт қутбли (яъни, $p=2$) бўлса, статор айланаси $360° \times 2 = 720°$ бўлади.

Ўзгарувчан ток машиналарининг статор чулғамини ҳисоблашда қуйидагилар берилиши лозим: а) қутблар сони $2p$ ёки жуфт қутблар сони—p; б) фазалар сони m; в) пўлат ўзак пазларининг сони z.

Битта қутбга ва бир фазага тўғри келадиган пазлар сони чулғамнинг муҳим параметри ҳисобланади ва q билан белгиланади. У қуйидагича аниқланади:

$$q = \frac{z}{2pm}. \tag{2-2}$$

Уч фазали чулғам учун $m=3$, у ҳолда: $q = \frac{z}{6p}$.

Агар двигателда пазлар сони z бўлса, қўшни пазлар орасидаги геометрик бурчак $\alpha_z = \frac{360°}{z}$ билан аниқланади. Агар двигателда жуфт қутблар сони $p=1$ бўлса, қўшни пазларда ётган симларда ЭЮКнинг векторлари орасидаги бурчак, яъни электр бурчаги ҳам $\alpha_э = \frac{360°}{z}$ билан аниқланади. Лекин кўп қутбли машиналарда симлардаги ЭЮК векторлари орасидаги электр бурчаги:

$$\alpha_э = \alpha_z \cdot p$$

билан аниқланади. Демак, якорь айланасининг ҳар бир градусига вектор диаграммада p электр градус тўғри келар экан. Унда қўшни пазлар орасидаги электр бурчак:

$$\alpha_э = \frac{360° \cdot p}{z} \tag{2-3}$$

билан аниқланади.

Масалан: 4 қутбли асинхрон двигателнинг статорида пазлар сони 48 та. Унда қўшни пазлар орасидаги фазовий (геометрик) бурчак: $\alpha_z = \frac{360°}{48} = 7{,}5°$ бўлади. Қўшни пазларда ётган симларда

ҳосил бўладиган ЭЮК векторлари орасидаги силжиш бурчаги яъни электр бурчак: $\alpha_э = \alpha_z \cdot p = 7{,}5 \cdot 2 = 15$ эл. град. га тенг бўлади.

Уч фазали чулғамнинг айрим фазалари орасидаги силжиш бурчаги ҳам кўпинча градусларда эмас, пазлар сони билан ифодаланади. Бу бурчак λ билан белгиланади. Чулғамнинг айрим фазалари орасидаги силжиш бурчаги, яъни фаза қадами ($y_ф$) пазлар сонига қуйидагича боғланган:

$$\lambda = y_ф = \frac{120°}{\alpha}. \qquad (2\text{-}4)$$

Уч фазали чулғамда битта қутб энида $3q$ паз жойлашади. Агар $q=1$ бўлса, ҳар бир қутб тагида ҳар бир фазанинг фақат битта ғалтаги жойлашади. Бундай чулғам йиғилган (тўпланган) чулғам дейилади. Одатда $q>1$ бўлади. Бундай чулғам эса тарқалган чулғам дейилади.

Статор чулғамлари қўлда ёки машинада (махсус мослама ёрдамида) ўралиши мумкин. Чулғамлар қандай усулда ўралган бўлмасин, улар етарли даражада механик ва электрик жиҳатдан мустаҳкам бўлиши, уни ўраш учун мумкин қадар камроқ материал сарфланиши лозим; статор чулғамида қувват исрофи оз бўлиши, машина ишлаганда у яхши совитиладиган бўлиши ва бошқа технологик талабларга жавоб берадиган қилиб тайёрланиши лозим.

31. Ўзгарувчан ток электр машиналари чулғамларининг схемалари

Ўзгарувчан ток машиналарида бир қаватли ва икки қаватли чулғамлар қўлланилади. Одатда, бир қаватли чулғамлар диаметрал қадамли ($y = \tau$) қилиб тайёрланади. Бундай чулғамларни тайёрлаш осон ва арзон. Бир қаватли чулғамлар қуввати 600 Вт дан 10 кВт гача бўлган асинхрон машиналарда қўлланилади. Ҳозирги замон ўзгарувчан ток машиналарида асосан икки қаватли чулғамлар қўлланилади. Бундан чулғамда чулғам қадамини қисқартириш осон бажарилади. Чулғам қадами қисқарганда шу чулғам ҳосил қиладиган магнит майдонининг тарқалиш шакли синусоидага анча яқин бўлади ва ЭЮК эгри чизиғида юқори гармоникалар таъсири камаяди. Бундан ташқари икки қаватли чулғамда ўрамнинг ён томонларини эгиб текис жойлаш осон бажарилади. Бу эса чулғамнинг тайёрланишини осонлаштиради.

а. Уч фазали бир қаватли чулғам. Статор пазларига чулғам ғалтаклари шундай ўрнатилиши лозимки, ўрамларнинг ён томонлари роторнинг статор ичига киритилишига халақит қилмасин. Чулғам ўрамларининг ён томонларини текис жойлаштирилишига қараб бир қаватли чулғам икки хил бўлади:

а) концентрик чулғам — бунда чулғам бўлаги группасида айрим бўлак ўлчамлари, яъни эни ва бўйи ҳар хил бўлади; б) тенг

бўлакли чулғам — бунда ҳамма бўлаклар бир хил ўлчамда ва шаклда, шаблонда тайёрланади.

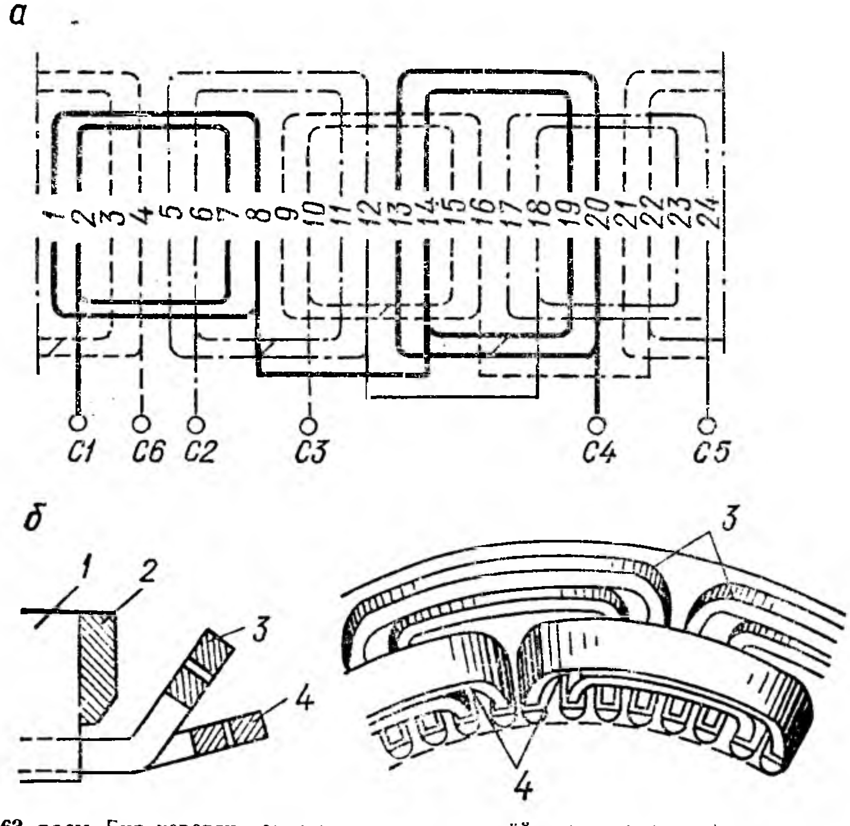
Одатда, концентрик чулғам бўлакларининг ён томонлари икки текисликда ётади. 63-расм, *а* да бир қаватли концентрик чулғамнинг ёйилмаси берилган. Бу чулғамни ҳисоблаш учун қуйидагилар берилади:

$$z = 24; \quad m = 3; \quad p = 2.$$

Битта қутб ва бир фазага тўғри келадиган статор пазларининг сони қуйидагича аниқланади:

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{24}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 2.$$

Чулғам тўла одимининг қиймати: $y = \frac{z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$, яъни $(1 - 7)$ бўлади.



63-расм. Бир қаватли концентрик чулғамнинг ёйилган схемаси (*а*): бунда $z = 24$, $2p = 4$, $q = 2$;

чулғам ён томонларининг жойлаштирилиши (*б*):

1 — статор ўзаги, *2* — қисқич шайба, *3*, *4* — ғалтаклар.

Бўлак группасини ташкил қилувчи айрим бўлаклар одими, чулғамнинг ўртача одими тўла қадамга тенг бўлиш шартидан топилади. Бунда каттароқ бўлаклар ва кичикроқ бўлаклар бўлади. Чулғамда катта бўлак одими $y_1 = 7$, яъни (1 — 8); кичик бўлак одими эса $y_2 = 5$, яъни (2 — 7) га тенг олинади. Бу ҳолда чулғамнинг ўртача одими:

$$y_{ўр} = \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{7+5}{2} = 6 \text{ бўлади.}$$

Бир қаватли чулғамда бўлаклар сони доимо статор пазлари сонининг ярмига тенг бўлади. Бу чулғамда қўшни пазлар орасидаги электрик бурчак:

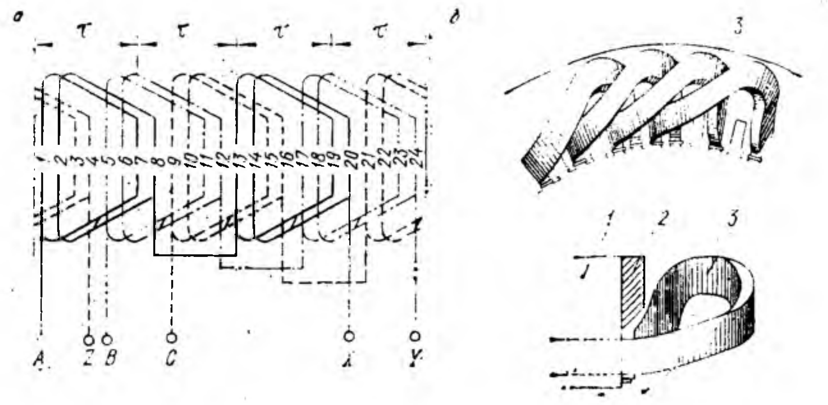
$$\alpha = \frac{360°p}{z} = \frac{360°\cdot 2}{24} = 30 \text{ эл. градус.}$$

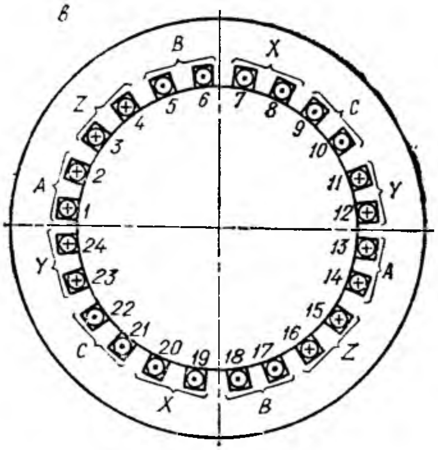
Фаза қадами, яъни айрим фазаларнинг бош учлари (ёки охирги учлари) орасидаги силжиш бурчаги:

$$y_ф = \frac{120°}{\alpha} = \frac{120°}{30°} = 4.$$

Демак, биринчи фаза чулгамининг бош учи 2-пазда бўлса, иккинчи фаза чулғамининг бош учи 6-пазда (яъни, 120°), учинчи фаза чулғамининг бош учи 10-пазда бўлади. Айрим фаза чулғамига тегишли бўлак группаларининг бош учлари *Б* билан, охирги учлари эса *О* ҳарфи билан белгиланади. Бу ҳарфларда бўлаклар номери ҳам кўрсатилади, яъни $Б_1$, $О_1$, $Б_2$, $О_2$ ва ҳоказо. 63-расм, *б* да чулғам ён томонларининг жойлаштирилиши кўрсатилган.

64-расм, *а* да шаблонда тайёрланган тенг бўлакли уч фазали бир қаватли чулғамнинг ёйилган схемаси келтирилган. Чулғамни ҳисоблаш учун қуйидагилар берилган: $2p = 4$ (тўрт қутбли); битта қутб ва бир фазага тўғри келадиган пазлар сони $q = 2$; бунда бир фазага тегишли симлар иккита қутб тагида 4 та пазда жойлашади. Бир фаза чулғами 8 та пазни эгаллайди. яъни $2pq = 4\cdot 2 = 8$; машинада пазлар сони: $z = 2pqm = 8\cdot 3 = 24$. Бунда чулғам ғалтаклари шаблонда бир хил, яъни тенг бўлакли қилиб тайёрланади. Ғалтаклар трапецеидал шаклда тайёрланади. Турли пазларда жойлашган ўрамларнинг актив томонлари ва чулғам ғалтаклари уларда ҳосил бўладиган ЭЮК лар қўшиладиган қилиб уланади. Масалан, 64-расм, *а* да келтирилган чулғамда *А* — *Х* фаза 4 та ғалтакдан иборат. Ғалтаклар *1—7*, *2—8*, *13—19* ва *14 — 20* пазларда жойлашган симлардан иборат. Мос ҳолда *В* — *Y* фаза ҳам 4 та ғалтакдан иборат. Ғалтак симлари *5 — 11*, *6 — 12*, *17 — 23* ва *18 — 24* пазларда жойлашади. *С* — *Z* фаза ҳам шундай *9 — 15*. *10 — 16*, *21 — 3* ва *22 — 4* пазларда жойлашади. Шаблонли ғалтакларнинг ён томонлари 64-расм, *б* да кўрсатилгандек эгиб текисланади. 64-расм, *в* да турли фазаларга тегишли симларнинг пазларда ўрнатилиши кўрсатилган. Бу расмда симларда ҳосил бўладиган ЭЮК ларнинг йўналиши чулғамнинг





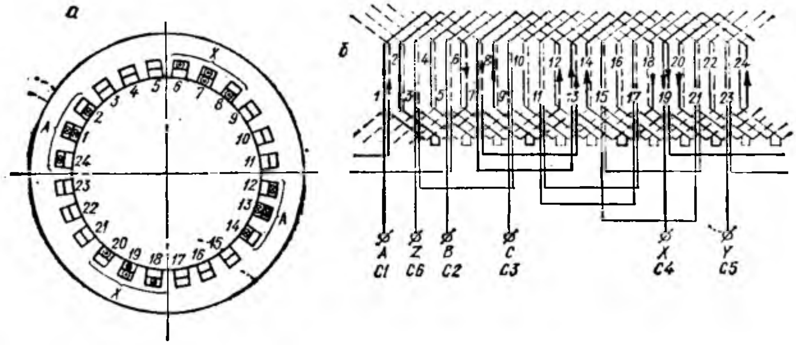
64-расм. Тенг бўлакли, яъни шаблонли тайёрланган бир қаватли чулғамнинг ёйилган схемаси (*а*): бу ерда $2p = 4$, $q = 2$, $z = 24$; *б* — чулғам ён томонларининг жойлаштирилиши:

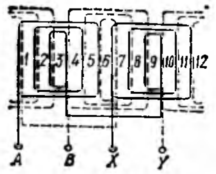
1 — статор ўзаги, *2* — кисқич шайба, *3* — ғалтаклар,

в — уч фазали машина статорида бир қаватли чулғам ғалтакларининг жойлашиши.

$A - X$ фазада ток I_A максимал қийматга эришган моменти учун кўрсатилган.

б. Икки қаватли қисқарган одимли уч фазали чулғам. Икки қаватли чулғамда статор темир узагининг ҳар бир пазида иккита алоҳида бўлакнинг актив томонлари устма-уст ётади. Бўлакларнинг биринчи актив томони бир пазнинг тагида ётса, унинг иккинчи томони бошқа пазнинг уст томонида ётади. Икки қаватли чулғам бўлакларининг умумий сони статор пўлат ўзаги пазлари сонига тенг, яъни бир қаватли чулғамга қараганда бўлаклар сони икки марта ортиқ бўлади. Бу эса чулғамни ўрашни қийинлаштиради, кўп меҳнат талаб қилинади. Икки қаватли чулғамнинг ёйилган схемасини чизишда пазнинг уст томонида жойлашган бўлак томони туташ чизиқ билан, тагидагиси эса пунктир чизиқ билан тасвирланади. Айрим фазага тегишли бўлак группалари, кўпинча кетма-кет уланади. Бунда токларнинг йўналиши тўғри бўлишига эришиш мақсадида бўлак группасининг





65- расм. *а* — ғалтакларнинг пазларда жойлашиши, *б* — икки қаватли, қисқартирилган одимли уч фазали чулғамнинг ёйилган схемаси, *в* — бир фазали чулғамнинг ёйилган схемаси.

бош учи бошқа бўлак группасининг бош учи билан, унинг охирги учи кейинги бўлакнинг охирги учи билан уланади (65-расм, *а*). Бунда фаза чулғамининг ЭЮК айрим бўлак группаларининг ЭЮК лари йиғиндисига тенг бўлади. Катта қувватли машиналарда бўлак группалари ўзаро параллел уланади. Икки қаватли чулғам тўла одимли ёки қисқарган одимли қилиб тайёрланиши мумкин. Ҳозирда ишлаб чиқарилаётган машиналарда одими $y = (0,8 \ldots 0,85)\tau$ бўлган икки қаватли чулғам қўлланилмоқда. Бунда 5 ва 7- гармоникалар таъсири анча камаяди. Икки қаватли қисқарган одимли чулғамга бошқа хил чулғамларга қараганда камроқ материал сарфланади ва уни бир хил қолипда тайёрлаш мумкин бўлади. 65- расм, *б* да икки қаватли, қисқарган одимли чулғамнинг ёйилган схемаси кўрсатилган: унда қуйидагилар берилган: $2p = 4$; $m = 3$; $z = 24$. Агар одим 1/5 га қисқарса, чулғам одими:

$$y = \frac{4}{5} \cdot \frac{z}{2p} = \frac{4}{5} \cdot \frac{24}{4} = 5;$$

демак, (1 — 6) бўлади.
Бунда:

$$q = 2; \quad \alpha = 30°; \quad y_ф = 2 \text{ пазга тенг.}$$

Қисқарган одимли чулғамда баъзи пазларда турли фазага тегишли бўлак томонлари бўлиши мумкин. Бу қаватлар орасидаги изоляция қатламини яхшилашни талаб қилади. 65- расм, *а* да уч фазали машина статорида икки қаватли ва қисқарган одимли чулғам ғалтакларининг жойлашиши кўрсатилган. *А — X* фаза *1—6*, *2—7*, *7—12*, *8—13*, *13—18*, *14—19*, *19—24*, *20—1* пазларда

ётган симлардан тузилган 8 та ғалтакка эга бўлади. Ўрамнинг ён томонлари текис ўрнатилиши лозим.

в. **Бир фазали чулғам.** Бир фазали чулғам уч фазали чулғамнинг бир фаза чулғамига ўхшаш бўлиб, чулғам бўлаклари статор пўлат ўзагининг 2/3 пазларига жойлаштирилади. Бунда чулғам конструкцияси анча тежамли бўлади. Чунки, қолган 1/3 пазларни чулғам билан тўлатилганда мис сим сарфи 1,5 марта ортади, лекин бунда чулғамнинг ЭЮК фақат 1,15 марта ортади, холос. 65-расм, *в* да бир фазали концентрик чулғамнинг ёйилмаси берилган. Бир фазали чулғам икки қаватли бўлиши ҳам мумкин.

32. Ўзгарувчан ток машиналари чулғамларининг ЭЮК

Ўзгарувчан ток машиналари чулғамларида ҳосил бўладиган ЭЮК синусоидал шаклда бўлиши керак. Кўпинча ўзгарувчан ток машиналарида ЭЮК нинг шакли синусоидага яқин бўлади, аммо синусоидал бўлмайди. Бунга сабаб, машинанинг магнит оқими таркибида унинг асосий гармоникаси билан бирга юқори тартибли гармоникаларнинг (масалан, 3, 5, 7) мавжудлигидир. Машиналарда ҳосил бўладиган магнитловчи кучлар ва ЭЮКларни синусоидал бўлиши учун бир қатор конструктив ва бошқа чоралар кўрилади. Қуйида шу чоралар билан танишиб чиқамиз.

Электромагнит индукцияси қонунига биноан статор чулғамининг битта симида ҳосил бўладиган ЭЮК қуйидагича аниқланади:

$$e_c = B_x l v.$$

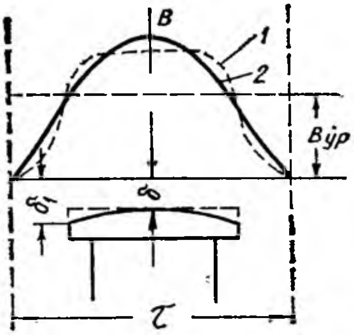
Агар сим актив қисмининг узунлиги (l) ва магнит майдонининг айланиш тезлиги (v) ўзгармас бўлса, симда ҳосил бўладиган ЭЮК нинг ўзгариши фақат ҳаво оралиғида магнит индукциясининг шаклига боғлиқ бўлади

$$e_c = B_x l v = B_x \cdot c,$$

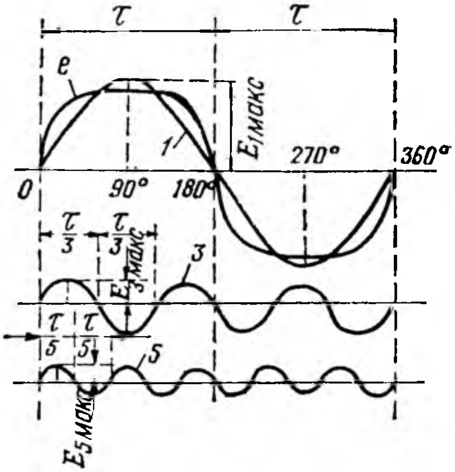
бунда:

$$c = l \cdot v = \text{const}.$$

Ҳосил бўладиган ЭЮК нинг шакли синусоидага яқин бўлиши учун ҳаво оралиғида магнит индукцияси синусоидал тарқалиши лозим. Магнит индукциясини синусоидага яқинлаштириш учун, масалан, аён қутбли синхрон машиналар роторига ўрнатилган магнит қутблари бошмоқларига маълум шакл берилади, яъни қутб бошмоғи четларида ҳаво оралиғи унинг марказига нисбатан 1,5...2 марта катталаштирилади (66-расм). Бу расмдан 2-эгри чизиқ 1-эгри чизиққа нисбатан синусоидага анча яқин. Аёнмас қутбли машиналарнинг ҳаво оралиғида магнит индукцияси синусоидал тарқалиши учун қўзғатиш чулғами ротор айланасининг 2/3 қисмига жойлаштирилади. Бу тадбирлар натижасида ЭЮК нинг шакли синусоидага яқинлашади. Умуман, синусоидал ЭЮК таркибида унинг биринчи гармоникаси билан бирга тоқ тартибли юқори гармоникалар (масалан, 3, 5, 7 ва ҳоказо) ҳам бўлади (67-расм).



66- расм.



67- расм.

Чунки ҳаво оралиғида магнит майдони абсцисса ўқига нисбатан симметрик тарқалади. Шунинг учун жуфт гармоникалар бўлмайди. Вақтнинг исталган моментида ЭЮК шаклининг ординатаси, синусоида ординатасидан 5% га фарқ қилса, у амалда синусоидал ҳисобланади.

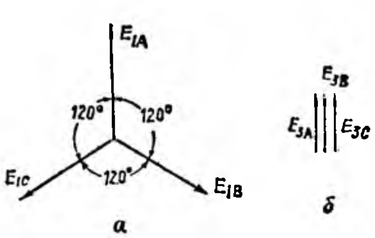
Маълумки, уч фазали чулғамда ҳосил бўладиган ЭЮК ларнинг биринчи (асосий) гармоникалари $E_{1А}$, $E_{1Б}$ ва $E_{1С}$ фаза бўйича 120° га силжиган бўлади (68- расм, *а*):

$$\left.\begin{aligned} \dot{E}_{1A} &= \dot{E}_m \sin \omega t, \\ \dot{E}_{1B} &= \dot{E}_m \sin(\omega t - 120°), \\ \dot{E}_{1C} &= \dot{E}_m \sin(\omega t + 120°). \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}5)$$

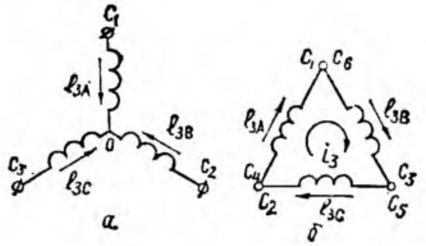
3- гармоника ЭЮК нинг частотаси 3ω га тенг:

$$\left.\begin{aligned} \dot{E}_{3A} &= \dot{E}_{3m} \cdot \sin 3\omega t, \\ \dot{E}_{3B} &= \dot{E}_{3m} \sin 3(\omega t - 120°) = \dot{E}_{3m} \sin 3\omega t, \\ \dot{E}_{3C} &= \dot{E}_{3m} \sin 3(\omega t + 120°) = \dot{E}_{3m} \sin 3\omega t. \end{aligned}\right\} \qquad (2\text{-}6)$$

Демак, статорнинг айрим фаза чулғамларида 3- гармоника ЭЮК лари ҳар вақт ўзаро тенг ва бир томонга йўналар экан (68- расм, *б*) Статор чулғами юлдуз усулида уланганда айрим фазаларда 3- гармоника ЭЮК чулғамнинг бош учидан охирига ёки аксинча йўналади (69- расм, *а*). Улар бир-бирига тенг ва бир томонга йўналганлиги учун 3- гармоника ЭЮК ларининг айирмаси нолга тенг бўлади. Умуман, линия кучланишлари тар-



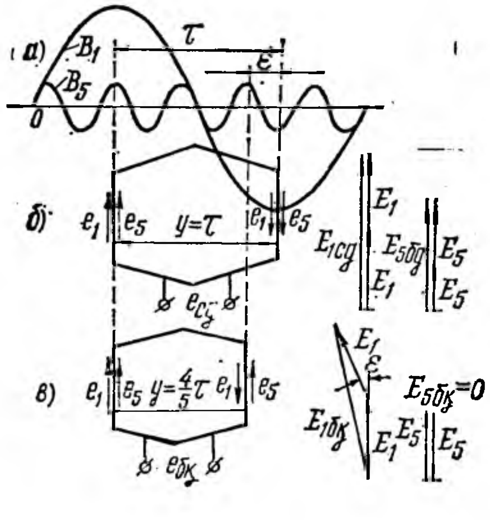
68- расм.



69- расм.

кибида 3- гармоника бўлмайди. Агар статор чулғами учбурчак усулида уланган бўлса, 3 гармоника ЭЮК лари бир томонга йўналади (69- расм, *б*) ва чўлғамларнинг ёпиқ контурида 3- гармоника токи (i_3) ни ҳосил қилади. Умуман, 3- гармоника ЭЮК лари ҳақидаги мулоҳазалар учга бўлинадиган юқори гармоникалар (9, 15 ва бошқалар) нинг ҳаммасига ҳам тааллуқлидир. Якорнинг линия ЭЮК таркибида ва унга каррали гармоникаларни йўқотиш учун ҳам синхрон машиналарда якорь чулғами юлдуз усулида уланади. Демак, чулғамлари қандай уланган бўлмасин, линия кучланишлари 3 ва учга бўлинадиган юқори гармоникаларга эга бўлмайди. Қолган гармоникалар ичида 5 ва 7- гармоникалар таъсири амалий аҳамиятга эгадир. Уларнинг таъсирини статор чулғами одимини қисқартириш йўли билан анча камайтириш мумкин.

Агар ҳаво оралиғида магнит индукцияси носинусоидал тарқалган бўлса, унинг таркибида индукциянинг биринчи гармоникаси B_1 билан бирга унинг 5- гармоникаси ҳам бўлади (70- расм, *а*).



70- расм.

Агар статор чулғами диаметрал одимли бўлса ($y = \tau$), чулғам бўлакларининг иккала томонида ЭЮК нинг 1- гармоникаси ҳам, 5- гармоникаси ҳам ўзаро қўшилади (70- расм, *б*). Бунда ЭЮК таркибида 1- гармоника билан бирга 5- гармоника ҳам бўлади ва у яна носинусоидал бўлади. Агар бўлак одимини 1/5 га қисқартирилса (бу ҳолда $y = 4/5\tau$ бўлади) ёки катталаштирилса, бўлакнинг актив томонларидаги ЭЮКнинг 5- гармоника қисмлари қарама-қарши йўналади ва унинг таъсири йўқолади (70- расм, *в*).

Натижада ЭЮК нинг асосий гармоникасигина қолади ва ЭЮК нинг шакли синусоидага яқинлашади. Худди шунга ўхшаш, агар ўлак одими 1/7 га қисқартирилса (унда $y = 6/7\tau$ бўлади), ЭЮК нинг 7-гармоникаси йўқолади. Одатда, бўлак одими $(0{,}8 \ldots 0{,}86)\tau$ га тенг қилиб олинади. Бунда ЭЮК нинг 5-гармоникаси қисмлари ҳам, 7-гармоника қисмлари ҳам сусаяди.

Агар чулғам одими қисқарса, ЭЮК нинг юқори гармоника қисмлари билан бирга асосий гармоника қисми ҳам камаяди. Бўлак одими қисқарганда бўлак томонларида ҳосил бўлган ЭЮК лар фаза бўйича маълум бурчакка сурилади. Бу ҳолда ЭЮК нинг биринчи гармоникаси бўлакнинг икки томонида ҳосил бўлган ЭЮК ларнинг геометрик йиғиндисига тенг бўлади. Лекин 5-гармоника ЭЮК лари бўлакнинг икки томонида бир-бирига қарама-қарши йўналади ва уларнинг таъсири йўқолади (70-расм, *в*).

Шундай қилиб, одими қисқармаган бўлакда ҳосил бўлган ЭЮК ($e_{бд}$) одими қисқарган бўлакда ҳосил бўлган ЭЮК ($e_{бк}$) дан катта бўлади. Мана шу ЭЮК ларнинг нисбати **о д и м қ и с қ а р т и р и ш к о э ф ф и ц и е н т и** дейилади, яъни:

$$\kappa_{қ} = \frac{e_{бқ}}{e_{бд}}. \qquad (2\text{-}7)$$

Бу коэффициент биринчи гармоника учун:

$$\kappa_{қ} = \sin \frac{y}{\tau} 90°.$$

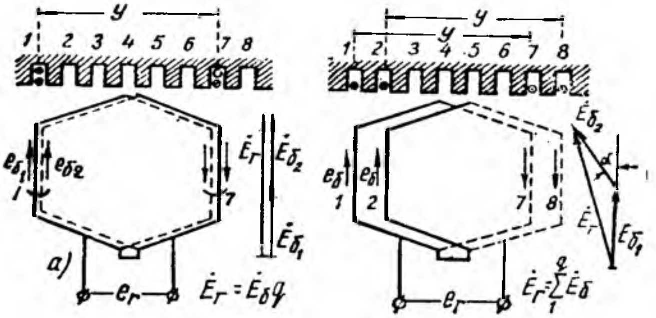
Умуман, исталган гармоника учун:

$$\kappa_{қ\nu} = \sin \nu \frac{y}{\tau} 90°, \qquad (2\text{-}8)$$

бу ерда: ν — гармоника тартиби.

33. Статор фаза чулғамининг ЭЮК

Олдин айтиб ўтилганидек, синхрон ва асинхрон машиналар статор чулғамларининг тузилиши ва уларни ҳисоблаш йўли бир хил. Статорда битта фаза чулғамининг ЭЮК (E_1) шу чулғамнинг битта параллел шохобчасини ташкил қилувчи бўлакларнинг ЭЮК лари йиғиндисига тенг. Одатда, чулғам бўлак (ғалтак) группаларидан, бўлак группалари эса бир қутб тагида жойлашган q бўлакдан ташкил топади. Агар q бутун сон бўлса, бўлак группаларида бўлаклар сони бир хил бўлади; касрли бўлса—ҳар хил бўлади. Айрим машиналарда ЭЮК шаклини яхшилаш мақсадида q касрли қилиб олинади. Агар бўлак группаларининг ҳамма бўлаклари икки томонда иккита пазда ўрнатилса (71-расм, *а*), уларнинг ЭЮК лари бир хил йўналади, яъни фазалари бир хил бўлади. Бу ҳолда ҳар бир бўлакда ҳосил бўлган ЭЮК лар бир-бирига қўшилади. Бўлак группасининг ЭЮК ($E_г$)



71- расм.

шу группани ташкил қилган бўлакларда ҳосил бўлган ЭЮК ларнинг арифметик йиғиндисига тенг:

$$E_г = E_б \cdot q. \qquad (2-9)$$

Одатда, фаза чулғамининг бўлак группалари бир қутб остида бўлади. Бўлак группалари кетма-кет уланган бўлса, бир фаза чулғамининг ЭЮК қуйидагича аниқланади:

$$E_1 = E_2 \cdot 2p,$$

бундан

$$E_1 = E_б \cdot 2pq.$$

Ҳақиқатда машина чулғамининг q бўлаги бир пазда жойлаштирилмайди, балки бўлаклар ҳар бир қутб остида q пазда жойлаштирилади. Бу ҳолда қўшни бўлакларда ҳосил бўлган ЭЮК лар бир-бирига нисбатан фазода қўшни пазлар орасидаги бурчакка, яъни α_1 бурчакка сурилади. Масалан, бўлак группаси 4-пазда жойлашган иккита бўлакдан иборат бўлсин (71- расм, *б*). Бу ҳолда бўлак группасининг ЭЮК ($E_г$) бўлак ЭЮК лари $E_{б1}$ ва $E_{б2}$ нинг геометрик йиғиндисига тенг. Умуман, бўлак группаси q бўлакдан иборат бўлганда, бўлак группасининг ЭЮК айрим бўлакларда ҳосил бўлган ЭЮК ларнинг геометрик йиғиндиси билан аниқланади:

$$\dot{E}_г = \sum_1^q \dot{E}_б.$$

71- расм, *б* даги векторлар диаграммасига асосан бир пазда йиғилган бўлаклар группасининг ЭЮК ($E_б \cdot q$) тарқалган бўлаклар группасининг ЭЮК ($E_т$) дан катта бўлади. Уларнинг нисбати:

$$k_т = \frac{\sum_1^q \dot{E}_б}{E_б \cdot q} < 1 \qquad (2-10)$$

чулғам тарқалиш коэффициенти дейилади. Бу ҳолда тарқалган бўлаклар группасининг ЭЮК $E_г = E_б \cdot q k_т$ билан аниқланади. Биринчи гармоника учун чулғам тарқалиш коэффициенти:

$$k_{т1} = \frac{\sin \frac{180°}{2m}}{q \sin \frac{180°}{2mq}}, \qquad (2\text{-}11)$$

бу ерда: m — фазалар сони.

Агар $q = 1$ бўлса, $k_т = 1$ бўлади; $q > 1$ бўлса, $k_т < 1$ бўлади; агар $q = \infty$ бўлса, текис тарқалган чулғам олинади.

Агар ν гармоника учун қўшни пазлар орасидаги силжиш бурчаги α дан ν марта катталиги эътиборга олинса, турли юқори гармоника учун чулғам тарқалиш коэффициенти:

$$k_{т\nu} = \frac{\sin \frac{180° \nu}{2m}}{q \sin \frac{180° \nu}{2mq}} \qquad (2\text{-}12)$$

билан аниқланади.

Турли гармоникалар учун (уч фазали чулғам) чулғам тарқалиш коэффициентининг қийматлари 2—1-жадвалда келтирилган.

2—1-жадвал

q	Чулғам тарқалиш коэффициенти ($k_т$)		
	1- гармоника учун	5- гармоника учун	7- гармоника учун
1	1,00	1,00	1,00
2	0,966	0,259	0,259
3	0,960	0,217	0,178
4	0,959	0,204	0,157
5	0,958	0,200	0,149
6	0,957	0,197	0,145
7	0,956	0,191	0,136

Жадвалдан q ортгани сари асосий гармоника учун чулғам тарқалиш коэффициентининг бир оз камайиши ва юқори гармоникалар учун бу коэффициентнинг жуда камайиб кетиши кўриниб турибди.

Машина ишлаганда айланма магнит майдони статор чулғамининг ҳар бир актив симига нисбатан қуйидаги тезликда ҳаракатланади.

$$v = \frac{\pi D n_1}{60} = \frac{\tau 2 P n_1}{60} = 2\tau f_1,$$

бу ерда: D — статор пўлат ўзагининг ички диаметри; қутб оралиғи:

$$\tau = \frac{\pi D}{2P}.$$

Бунда статор чулғами симида ҳосил бўладиган ЭЮК ($E_с$) нинг максимал қиймати:

$$E_{ст} = B_m \cdot lv = B_m l 2\tau f_1.$$

Агар статор билан ротор орасида магнит индукция синусоидал тарқалган бўлса, магнит индукциясининг ўртача қиймати:

$$B_{ўр} = \frac{2}{\pi} B_m.$$

Магнит индукциясининг максимал қиймати унинг ўртача қиймати билан ифодаланади:

$$E_{ст} = \frac{B_{ўр}}{2/\pi} l \cdot 2\tau f_1 = \pi \Phi f_1,$$

бунда: $\Phi = B_{ўр} l\tau$ — машинанинг магнит оқими. Симда ҳосил бўладиган ЭЮК нинг эффектив қиймати:

$$E_с = \frac{E_{ст}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \Phi f_1.$$

Ўрамлар сони w_s бўлган диаметрал одимли $|y = \tau|$ чулғам бўлаги учун ЭЮК нинг эффектив қиймати:

$$E_б = 2E_с \cdot w_s = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \Phi f_1 w_s. \qquad (2\text{-}13)$$

Агар бўлак қисқарган одимли бўлса, (2-13) ифодага одим қисқартириш коэффициенти $k_{қ1}$ киритилиши лозим. Бу коэффициент қисқарган одимли бўлакда биринчи гармоника ЭЮК ининг камайишини ифодалайди:

$$E_{бқ} = 4{,}44 f_1 w_s k_{қ1} \Phi.$$

Бутун чулғамда ҳосил бўлган ЭЮК ни аниқлаш учун бир бўлакда ҳосил бўлган ЭЮК ни кетма-кет уланган бўлаклар сонига кўпайтириш лозим. Бўлак группалари кетма-кет уланганда фаза чулғамида кетма-кет уланган бўлаклар сони $2pq$ бўлади. Шундай экан, фаза чулғамининг ЭЮК

$$E_1 = E_{бқ} \cdot 2pqk_{т1}$$

ёки

$$E_1 = 4{,}44 f_1 w_s 2pq \Phi k_{қ1} k_{т1}, \qquad (2\text{-}14)$$

бу ерда: $w_s 2pq = w_1$ — фаза чулғамида кетма-кет уланган ўрамлар сони ва $k_{қ1} \cdot k_{т1} = k_1$ — биринчи гармоника учун чулғам ко-

эффициенти десак, статорнинг фаза чулғамида ҳосил бўлган ЭЮК нинг эффектив қиймати:

$$E_1 = 4{,}44 w_1 k_1 f \Phi \qquad (2\text{-}15)$$

билан аниқланади. Демак, статор чулғамида ҳосил бўладиган ЭЮК айланма магнит майдонининг айланиш тезлиги ва магнит оқимига тўғри пропорционал экан.

34. Ўзгарувчан ток машиналари чулғамларининг магнит юритувчи кучи

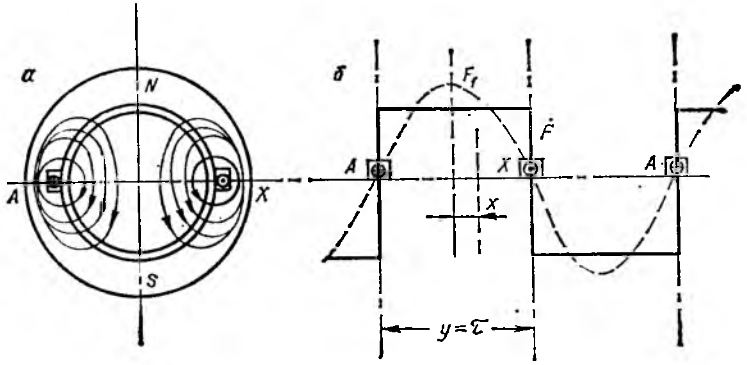
Ўзгарувчан ток машинасининг статор ёки роторига ўрнатилган битта чулғамнинг магнит юритувчи кучи (МЮК) ҳаво оралиғида пульсланувчи магнит майдонини ҳосил қилади. Синусоидал кучланиш билан таъминланадиган ҳар бир чулғам ҳаво оралиғида синусоидага яқин шаклда ўзгарадиган МЮК ҳосил қилиши лозим. Агар кучланиш синусоидал бўлмаса, яъни ҳаво оралиғида МЮК носинусоидал тарқалган бўлса, шу МЮК ҳосил қиладиган магнит оқимининг таркибида юқори гармоникалар бўлади, бу машинанинг энергетика кўрсаткичларини ёмонлаштиради. Амалда чулғамлар синусоидал кучланишга уланади. Бу шароитда чулгамнинг МЮК синусоидал бўлиши учун, шу чулғам қандай тайёрланиши лозимлигини кўриб чиқамиз

а) Йиғилган чулғамнинг МЮК. Олдин оддий йиғилган чулғамли икки қутбли машинада ҳосил бўладиган МЮК нинг қиймати ва тарқалиш характери ҳақида тўхталамиз. Бунда $A-X$ фазага тегишли чулғамнинг ҳамма ўрамлари диаметрал юзада жойлашган иккита пазга ўрнатилади (72-расм, *а*). Агар ток фаза чулғамининг бош учи A дан охирги учи X га йўналса, икки қутбли магнит оқими ҳосил бўлади. Бу магнит оқими куч чизиқларининг йўналиши расмда кўрсатилган. Магнит оқимининг ҳар бир куч чизиғи фаза чулғамининг ҳамма w ўрамлари билан куршалади. Бунда ғалтакнинг магнитловчи кучи $F_г = iw$. Ток максимал бўлганда МЮК ҳам максимал қийматга эришади:

$$F_{гm} = I_m w = \sqrt{2} I w. \qquad (2\text{-}16)$$

Агар магнит занжирида ферромагнит қисмларнинг магнит қаршилиги нолга тенг деб фараз қилсак, чулғамнинг магнитловчи кучи, асосан, ҳаво оралиғининг магнит қаршилигини енгишга сарфланади. Бунда МЮК нинг тарқалиши статор айланаси бўйлаб тўғри бурчакли тўртбурчак шаклида бўлади (72-расм, *б*). Ҳаво оралиғининг ҳар бир нуқтасида бир хил қийматли МЮК ҳосил бўлади, яъни $F = 0{,}5F_г$. Тўғри бурчак шаклида тарқалган МЮК ни Фурье қаторига ажратиб, унга синусоидалар йиғиндиси сифатида қараш мумкин. Ток максимал бўлганда, йиғилган чулғам учун биринчи гармоника МЮК нинг амплитудасини қуйидагича ёзиш мумкин:

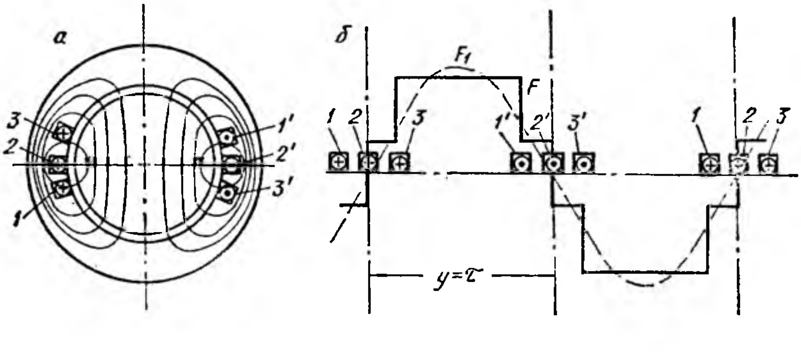
$$F_1 = \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi}\right) I w = 0{,}9 I w. \qquad (2\text{-}17)$$



72- расм. Йиғилган чулғамли икки қутбли машина статорининг кўндаланг қирқими (*а*), чулғамда ҳосил бўладиган МЮК нинг статор айланаси бўйлаб тарқалиш диаграммаси (*б*).

Йиғилган чулғамда МЮК нинг синусоида шаклида бўлмаслиги анча сезиларлидир. Шунинг учун бундай чулғам амалда кам қўлланилади.

б) Тарқалган чулғамнинг МЮК. Ўзгарувчан ток машиналарида магнит оқимининг тарқалиш шаклини яхшилаш мақсадида айрим фаза чулғами ўзакнинг бир нечта пазларига ўрнатилади. Бунда чулғамнинг совитилиш шароити ҳам яхшиланади. 73-расм, *а* да 6-пазга ($q = 3$) жойлаштирилган икки қутбли машина чулғами кўрсатилган. Бундай тарқалган чулғамнинг МЮК ини ўрамлар сони $w' = w/3$ бўлган ва фазода $\alpha = \pi b/\tau$ бурчакка силжиган, учта йиғилган чулғам МЮК ларининг йиғиндиси сифатида аниқлаш мумкин. Юқоридаги формулада: b — қўшни пазлар ўқлари орасидаги масофа. Йиғинди МЮК нинг тарқалиш шакли тўғри бурчакли зинасимон бўлади (73-расм, *б*).



73- расм Тарқалган чулғамли икки қутбли машина статорининг кўндаланг қирқими (*а*), шу чулғам ҳосил қиладиган МЮК нинг статор айланаси бўйлаб тарқалиш диаграммаси (*б*).

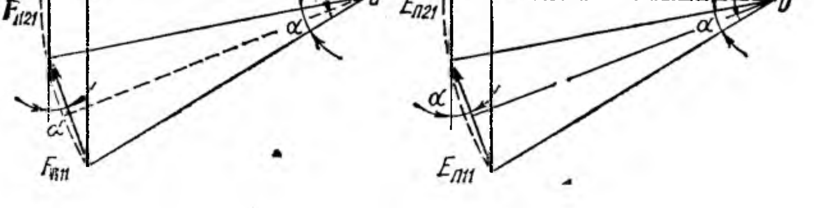
Йиғинди МЮК нинг 1,3 ва бошқа гармоникалари амплитудасини 2—2′, 3—3′, 1—1′ пазларда ётган айрим ғалтаклар МЮК лари мос гармоникаларининг амплитудалари $\dot{F}_{п1x}$, $\dot{F}_{п2x}$, $\dot{F}_{п3x}$ векторларининг йиғиндиси билан аниқлаш мумкин. Бунда $\dot{F}_{п1x}$, $\dot{F}_{п2x}$ ва $\dot{F}_{п3x}$ МЮК ларининг биринчи гармоникалари ўзаро α бурчакка, учинчи гармоникалари 3α бурчакка силжиган бўлади. 74-расм, *а* даги вектор диаграммада шу МЮК ларнинг биринчи гармоникалари амплитуда қийматларининг векторлари $\dot{F}_{п11}$, $\dot{F}_{п21}$ ва $\dot{F}_{п31}$ ни қўшиш кўрсатилган. Уларнинг модуллари тенг ва ўзаро α бурчакка силжиган. Бунда **йиғинди МЮК** биринчи гармоникасининг амплитуда қиймати:

$$F_1 = 2R\sin(q\alpha/2),$$

бу ерда: R — $F_{п11}$ ва $F_{п21}$ векторлари учларидан чизилган доиранинг радиуси. Бу радиус $2R\sin(\alpha/2) = F_{п11} = \dot{F}_{п21} = \dot{F}_{п31} = 0{,}9\frac{Iw}{3}$ шартидан аниқланади. Шундай қилиб: $F_1 = \frac{0{,}9Iw}{3} \cdot \frac{\sin(q\alpha/2)}{\sin(\alpha/2)}$ ёки умумий ҳолда (махраждаги 3 ўрнига q ни қўйиб): $F = 0{,}9 \times \times \frac{Iw\sin(q\alpha/2)}{q\cdot\sin(\alpha/2)}$.

Демак, тарқалган чулғамда йиғинди МЮК биринчи гармоникасининг амплитудаси йиғилган чулғамникига қараганда қуйидаги коэффициентга фарқ қилар экан:

$$F_1 = 0{,}9IwK_{т1},$$



74-расм. Тарқалган чулғам ғалтаклари ҳосил қиладиган МЮК лар ва уларда ҳосил бўладиган ЭЮК лар векторларини қўшиш:

а — МЮК ларнинг биринчи гармоникалари, *б* — МЮК нинг учинчи гармоникалари, *в* — ЭЮК нинг биринчи гармоникалари.

бу ерда:

$$k_{т1} = \frac{\sin(q\alpha/2)}{q \cdot \sin(\alpha/2)}. \quad (2\text{-}18)$$

Бу коэффициент биринчи гармоника учун **чулғам тарқалиш коэффициенти** дейилади. Чулғам тарқалиш коэффициенти бир фазага тегишли пазларда ўрнатилган ғалтаклар МЮК ларининг геометрик йиғиндисини уларнинг арифметик йиғиндисига бўлган нисбатига тенг.

Ғалтаклар МЮК ларининг учинчи гармоникалари амплитуда қийматларининг векторлари $\dot{F}_{п13}$, $\dot{F}_{п23}$ ва $\dot{F}_{п33}$ ўзаро қўшилганда (74-расм, *б*) йиғинди МЮК нинг амплитудаси унча катта бўлмайди, яъни учинчи гармоника учун йиғинди МЮК амплитудасининг битта ғалтак МЮК ига нисбати биринчи гармониканикига қараганда анча кичкина бўлади.

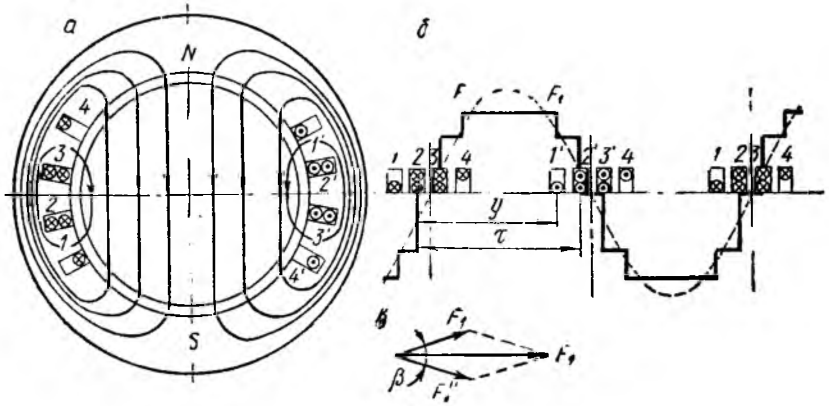
Шундай қилиб, чулғамни бир нечта пазларга тақсимлаш йиғинди МЮК эгри чизиғида юқори гармоникаларни камайтиради ва ҳаво оралиғида майдон шаклини яхшилайди, яъни уни синусоидага яқинлаштиради. Умумий ҳолда ν гармоника учун чулғам тарқалиш коэффициенти:

$$k_{т\nu} = \frac{\sin(q\nu\alpha/2)}{q \cdot \sin(\nu\alpha/2)},$$

бу ерда: $\nu\alpha$ — айрим ғалтакларнинг МЮК ларининг ν гармоникалари орасидаги силжиш бурчаги.

в) **Қадами қисқартирилган чулғамнинг МЮК.** Чулғам бир нечта пазларга ўрнатилганда, яъни тарқалган чулғамда юқори гармоникалар (5, 7 ва ҳоказо) таъсири анча камаяди. Лекин баъзилари жуда оз камаяди. Шунинг учун тарқалган чулғамда чулғам одими қисқартирилади, яъни чулғам одими y қутблар оралиғи τ дан кичикроқ ёки каттароқ олинади. Бунда чулғам икки қаватли қилиб ўралади; ҳар бир ғалтакнинг бир томони пазнинг тагида, бошқа томони эса бошқа пазнинг уст томонида ётади. Икки қутбли машинада $q = 3$ бўлганда икки қаватли чулғамнинг жойланиши 75-расм, *а* да кўрсатилган. Бунда ҳар бир фаза чулғами 6 та ғалтакдан тузилган. Биринчи, иккинчи ва учинчи ғалтакларнинг томонлари 1, 2 ва 3-пазларнинг тагида ва — 2′, 3′ ва 4′-пазларнинг уст томонида ётади; тўртинчи, бешинчи ва олтинчи ғалтакларнинг томонлари 2, 3 ва 4-пазларнинг уст томонида ва 1′, 2′ ва 3′-пазларнинг тагида ётади. Бу чулғам МЮК ининг статор айланаси бўйлаб тарқалиши 75-расм, *б* да келтирилган.

Одим қисқартирилган тарқалган чулғамнинг МЮК ($\dot{F}_х$) ни диаметрал одимли иккита тарқалган чулғам МЮК лари $\dot{F}'_х$ ва $\dot{F}''_х$ нинг йиғиндиси сифатида аниқлаш мумкин. Бунда уларнинг ўрамлар сони $w' = \frac{w}{2}$ га тенг ва бир-бирига нисбатан $\beta = \pi(\tau - y)/\tau$



75-расм. Икки қаватли, қисқартирилган одимли икки қутбли машина статорининг кўндаланг қирқими (*а*), шу чулғам ҳосил қиладиган МЮК нинг тарқалиш диаграммаси (*б*), икки қаватли чулғам МЮК лари векторларини қўшиш диаграммаси (*в*).

бурчакка силжиган бўлади. Бу чулғамлардан бири 1—1′, 2—2′, 3—3′-пазларнинг тагида ётадиган учта ғалтакдан, иккинчиси — 2-2′, 3-3′ ва 4—4′-пазларнинг уст томонида ётадиган учта ғалтакдан иборат. Йиғинди МЮК (F_1) нинг биринчи гармоникасининг амплитудаси шу икки чулғам МЮК биринчи гармоникалари амплитудалари (F_1' ва F_1'') векторларини қўшиш йўли билан аниқланади (75-расм, *в*). Фазада ток максимал бўлганда бу МЮК ларнинг қийматлари: $F_1' = F_1'' = 0{,}45 Iwk_{т1}$ билан аниқланади. Бунда қуйидаги ифодани оламиз:

$$F_1 = 2F_1'\cos(\beta/2) = 0{,}9 Iwk_{т1}\cdot k_{қ1}, \qquad (2\text{-}19)$$

бу ерда: $k_{қ1} = \cos(\beta/2)$ — чулғамнинг қисқартириш коэффициенти. Юқоридаги иккита чулғам МЮК ларининг фаза бўйича силжиши $\nu\beta$ бўлади. Бунда қисқартириш коэффициенти: $k_{қ\nu} = \cos(\nu\beta/2)$. Юқори гармоникалар учун $\nu > 1$ бўлгани сабабли уларнинг баъзилари учун $k_{қ1} < 1$. Демак, чулғам одимини қисқартириш МЮК нинг тақсимланиш эгри чизиғининг шаклини яхшилайди. Одимни турлича қисқартириб $\nu\beta = \pi$ га тенг бўлган гармоникани бутунлай йўқотиш мумкин.

г) Пазлар қийшиқлигининг МЮК га таъсири. Баъзи машиналарда пазларнинг охири унинг бошига нисбатан маълум бурчакка (γ) силжиган бўлади. Қийшиқ пазлар роторда ёки статорда бўлиши мумкин. Бундай қийшиқлик γ бурчакка тўғри келадиган ёй бўйича чулғам тарқалишига эквивалентдир. Агар $q\alpha = \gamma$ ва $q\sin(\alpha/2) = \gamma/2$ бўлса, биринчи гармоника учун қийшиқлик коэффициенти:

$$k_{қий} = \sin{}^{\gamma/2}/_{\gamma/2}.$$

Юқори гармоникалар учун:

$$k_{қий} = \frac{\sin \gamma\nu/2}{\nu\gamma/2}.$$

Қийшиқлик коэффициенти биринчи гармоникага нисбатан юқори гармоникалар учун кичкина бўлади. Демак, пазларнинг қийшиқлиги ҳам МЮК эгри чизиғининг шаклини синусоидага яқинлаштирар экан. Қутб бошмоқларининг қийшиқлиги ҳам худди шундай натижани беради.

Бу ҳолда ўзгарувчан ток машиналарида фаза чулғамининг ЭЮК формуласидаги чулғам коэффициенти қуйидагича аниқланади:

$$k_1 = k_{т1} \cdot k_{қ1} \cdot k_{қий}. \quad (2\text{-}20)$$

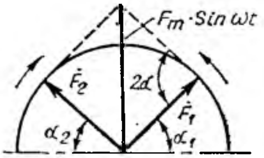
35. Бир, икки ва уч фазали чулғамларнинг магнит юритувчи кучлари

а) Бир фазали чулғамнинг магнитловчи кучи (ёки МЮК). Олдин айтиб ўтилганидек, агар чулғам бир нечта пазларга жойлаштирилса, МЮК нинг таркибида юқори гармоникалар камаяди Агар ток синусоидал ($i = I_m \sin \omega t$) бўлса, шу ток ҳосил қиладиган МЮК нинг вақт бўйича ўзгариши ҳам синусоидал бўлади, яъни $F = F_m \sin \omega t$. Умуман, бир фазали чулғамдан синусоидал ток ўтса, фазода қўзғалмас ва вақт бирлиги ичида ток частотасига мос пульсланувчи магнит майдони ҳосил бўлади. Пульсланувчи МЮК ни бир-бирига нисбатан тескари, бир хил тезликда айланадиган иккита айланма МЮК га ажратиш мумкин (76-расм). Бу расмда: $F_1 = F_2 = 0{,}5F_m$, $(\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha)$. Вақтнинг исталган моменти учун қуйидаги тенгламани ёзиш мумкин:

$$F_m \sin \omega t = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2\cos 2\alpha} = F_m\sqrt{\frac{(1 - \cos 2\alpha)}{2}}$$

бу ерда: $\sin \omega t = \sin \alpha$, яъни $\alpha = \omega t$.

$\dot{F}_1$ ва $\dot{F}_2$ векторлар билан абсцисса ўқи орасидаги α бурчак вақт бирлигида ўзгаради, яъни $\dot{F}_1$ ва $\dot{F}_2$ векторлар бир хил частота билан айланади. Ўзгарувчан ток машинаси бир фазали чулғамининг пульсланувчи МЮК учун қуйидаги формулани ёзиш мумкин:



76-расм. Пульсланувчи МЮК ни қарама-қарши томонга айланадиган иккита айланма МЮК билан алмаштириш.

$$F_{tx} = \dot{F}_m \sin \omega t \cdot \cos(x\pi/\tau)$$

ёки

$$F_{tx} = 0{,}5F_m \sin(\omega t - x\pi/\tau) + $$
$$+ 0{,}5F_m \sin(\omega t + x\pi/\tau),$$

бу ерда: x — чулғамнинг симметрик ўқигача бўлган масофа. Бу формуланинг иккала қисми ҳам МЮК нинг синусоидал тўлқинини ифодалайди. Бу тўлқин

якорь айланаси бўйлаб ҳаракатланади. Чунки якорь айланасининг маълум нуқтасида МЮК максимал қийматга эга бўлганда $\sin\left(\omega t - \frac{x\pi}{\tau}\right) = 1$ бўлади. Демак, $\left(\omega t - \frac{x\pi}{\tau}\right) = 90°$. Вақт ўтиши билан бу қиймат ўзгармайди. Лекин x нинг координатаси ўзгаради Шу асосда МЮКнинг максимал қиймати x координатасининг ўзгаришига қараб якорь айланаси бўйлаб айланади:

$$\dot{F}_{tx} = \dot{F}_{\text{тўғ}} + \dot{F}_{\text{тес}}.$$

Тўлқиннинг ҳаракат тезлиги қуйидагича аниқланади:

$$\omega t - \frac{x\pi}{\tau} = 0 \quad \text{ва} \quad \omega t + \frac{x\pi}{\tau} = 0.$$

Бундан тўғри тезлик: $v_{\text{тўғ}} = \frac{x}{t} = \frac{\omega\tau}{\pi} = 2f\tau$, тескариси: $v_{\text{тес}} = \frac{x}{t} = -\frac{\omega\tau}{\pi} = -2f\tau$. Қуйидагиларни эътиборга олиб: $v = \frac{\pi D n_1}{60}$ ва $\tau = \frac{\pi D}{2p}$, бу ерда: D — якорь диаметри; n_1 — магнит майдонининг айланиш частотаси. Ундан: $2p\tau n_1/60 = \pm 2f\tau$ ни оламиз. Тўғри ва тескари айланадиган магнит майдонининг айланиш частотаси: $n = \pm \frac{60f}{p}$.

Шундай қилиб, бир фазали чулғамнинг пульсланувчи МЮК бир-бирига нисбатан қарама-қарши томонга бир хил частота билан айланадиган иккита (тўғри ва тескари) айланма МЮК лардан иборат бўлар экан. Айланма МЮКларнинг амплитудалари ўзаро тенг ва пульсланувчи МЮК амплитудасидан икки марта кичик бўлади.

б) Икки фазали чулғамнинг МЮК.

Оддий икки фазали чулғам ўқлари бир-бирига нисбатан 90° силжитиб ўрнатилган иккита ғалтакдан иборат (77- расм). Ғалтаклар ўрамларининг сони бир хил. Агар ғалтаклардан бир-бирига нисбатан 90° га силжиган синусоидал ток ($i_A = I_m \sin \omega t$; $i_B = I_m \times \sin(\omega t + 90°) = I_m \cos \omega t$) ўтказилса, ҳосил бўладиган МЮК ларнинг вақт бирлигида ўзгарадиган шакли ҳам синусоидал бўлади ва улар ҳам чорак даврга силжиган бўлади, яъни

$$\dot{F}_A = F_m \sin \omega t \quad \text{ва} \quad \dot{F}_B = F_m \cos \omega t.$$

бунда $\dot{F}_A$ вектор $A - X$ ғалтак ўқи бўйича, $\dot{F}_B$ вектор $B - Y$ ғалтак ўқи бўйича йўналади. Вақтнинг исталган моментида йиғинди МЮК A ва B ғалтаклари МЮК ларининг геометрик йиғиндиси билан аниқланади. Йиғинди МЮК нинг қиймати қуйидагича аниқланади: $\dot{F}_й = \dot{F}_A + \dot{F}_B$. Сон қиймати:

$$F_й = \sqrt{F_m^2 \sin^2 \omega t + F_m^2 \cos^2 \omega t} = F_m.$$

Демак, вақтнинг исталган моментида икки фазали чулғамнинг йиғинди МЮК битта фаза МЮК амплитудасига тенг бўлар экан.

$\text{tg}\,\alpha = \frac{\dot{F}_A}{\dot{F}_B} = \text{tg}\,\omega t$; $\alpha = \omega t$ дан маълумки, йиғинди МЮК вектори билан ордината ўқи орасидаги бурчак вақт бирлиги ичида ўзгаради, яъни бу вектор ўзгармас частота билан айланади.

Фақат биринчи гармоникани эътиборга олиб, A фазанинг МЮК ини қуйидагича аниқлаш мумкин: $F_A = F_m \sin \omega t \cdot \cos\left(\frac{x\pi}{\tau}\right)$. B фазанинг магнитловчи кучи A фазанинг МЮК га нисбатан вақт бўйича 90° га силжиган, ғалтаклар ҳам фазода ўзаро 90° га силжиган. Унда:

$$\dot{F}_B = F_m \sin(\omega t + \pi/2) \cdot \cos\left(\frac{x\pi}{\tau} + \frac{\pi}{2}\right).$$

Битта фазанинг пульсланувчи МЮК ини турли томонга айланадиган иккита айланма МЮК сифатида ҳам қараш мумкин, яъни

$$F_A = 0{,}5F_m \sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau}\right) + 0{,}5F_m \sin\left(\omega t - \frac{x\pi}{\tau}\right),$$

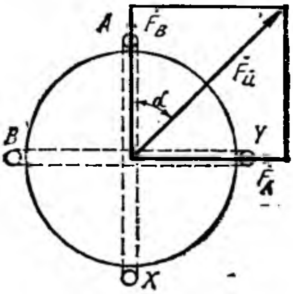
$$F_B = 0{,}5F_m \sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau} + \pi\right) + 0{,}5F_m \sin\left(\omega t - \frac{x\pi}{\tau}\right).$$

Бундан йиғинди МЮК:

$$F_й = 0{,}5F_m \left[\sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau}\right) + \sin\left(\omega t - \frac{x\pi}{\tau}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau} + \pi\right) + \sin\left(\omega t - \frac{x\pi}{\tau}\right)\right].$$

Бу ерда:

$$\sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau} + \pi\right) = 0.$$



77-расм. Энг оддий икки фазали чулғам.

78-расм. Оддий уч фазали чулғам.

Унда йиғинди МЮК:

$$F_й = F_m \sin\left(\omega t - \frac{x\pi}{\tau}\right).$$

Демак, икки фазали чулғам амплитудаси битта фаза МЮК амплитудасига тенг ва айланиш частотаси $n_1 = \frac{60f}{p}$ билан аниқланадиган айланма магнит майдонини ҳосил қилар экан. Бу майдоннинг айланиш йўналишини ўзгартириш учун ғалтакларнинг бирида ток йўналишини ўзгартириш лозим.

в) Уч фазали чулғамнинг МЮК. Энг оддий уч фазали чулғам фазода бир-бирига нисбатан 120° га силжиган учта ғалтакдан иборат (78-расм). Агар бу ғалтаклардан қийматлари тенг ва фазаси бўйича $2\pi/3$ га силжиган токлар, яъни: $i_A = I_m \times \sin \omega t$, $i_B = I_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$, $i_C = I_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$ ўтказилса, бу токлар ҳосил қиладиган МЮК лар ҳам фазаси бўйича $2\pi/3$ бурчакка силжиган бўлади.

МЮК нинг биринчи гармоникасини ҳамда ғалтакларни фазода $2\pi/3$ га силжиганлигини эътиборга олиб айрим фаза МЮК лари учун қуйидаги ифодаларни ёзиш мумкин:

$$\dot{F}_A = F_m \sin \omega t \cdot \cos\frac{x\pi}{\tau},$$

$$\dot{F}_B = F_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\frac{x\pi}{\tau} - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$\dot{F}_C = F_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\frac{x\pi}{\tau} - \frac{4\pi}{3}\right).$$

Айрим фазаларда ҳосил бўладиган пульсланувчи МЮК ни қарама-қарши томонга айланадиган иккита айланма МЮК лардан иборат деб, қуйидагича ёзиш мумкин:

$$F_A = 0{,}5F_m\left[\sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau}\right) + \sin\left(\omega t - \frac{x\pi}{\tau}\right)\right];$$

$$F_B = 0{,}5F_m\left[\sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau} - \frac{4\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t - \frac{x\pi}{\tau}\right)\right];$$

$$F_C = 0{,}5F_m\left[\sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau} - \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t - \frac{x\pi}{\tau}\right)\right].$$

Бу формулаларнинг иккинчи қисми бир хил ва биринчи қисмларининг йиғиндиси нолга тенг, яъни:

$$\sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau} - \frac{4\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t + \frac{x\pi}{\tau} - \frac{2\pi}{3}\right) = 0.$$

Унда уч фазали чулғамнинг йиғинди МЮК:

$$F_й = \frac{3}{2} F_m \sin\left(\omega t - \frac{x}{\tau}\pi\right).$$

Бу ерда:

$$F=\frac{3}{2}F_{mA};\ F_{mA}=0{,}9K_1\ \frac{w_1}{p}I.$$

Демак, уч фазали чулғамнинг МЮК доимо бир хилда қоладиган ва битта чулғам МЮК амплитудасининг 3/2 қисмига тенг бўлган айланма магнит майдонини ҳосил қилар экан, магнит майдонининг айланиш частотаси $n_1=\frac{60f_1}{p}$ формула билан аниқланади. Магнит майдонининг айланиш йўналишини ўзгартириш учун уч фазали чулғамнинг тармоққа улайдиган учта симидан иккитасининг ўрнини алмаштириш лозим.

III БЎЛИМ. АСИНХРОН МАШИНАЛАР

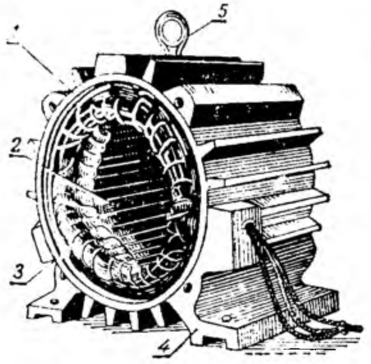
VI БОБ. АСИНХРОН МАШИНАНИНГ ТУЗИЛИШИ ВА ИШЛАШ ПРИНЦИПИ

36. Умумий тушунчалар

Ўзгарувчан ток машиналаридан асинхрон машиналар асосан **асинхрон двигателлар** сифатида халқ хўжалигининг турли соҳаларида машина ва механизмларни ҳаракатга келтириш учун ишлатилади. Уч фазали асинхрон двигателни 1889 — 91 йилларда рус инженери М. О. Доливо-Добровольский ихтиро қилган. Асинхрон двигателлар асосан бир фазали ва уч фазали бўлади. Бир фазали асинхрон двигателлар кичик қувватли (10 ... 600 Вт) бўлиб, асосан уй-рўзғор электр приборларида ишлатилади. Халқ хўжалигининг турли соҳаларида асосан уч фазали асинхрон двигателлар ишлатилади. Бошқа хил электр двигателларга қараганда асинхрон двигателлар қатор афзалликларга эга, жумладан тузилиши оддий, ишда ишончли, таннархи арзон, осон бошқарилади ва ҳоказо. Асинхрон двигателнинг ишлаш принципи магнит майдонига киритилган токли ўтказгичнинг шу майдон билан ўзаро таъсирига асосланган. Асинхрон машиналарда асосий магнит майдонини статор чулғамларидан ўтувчи уч фазали ток ҳосил қилади. Бу майдон айланма магнит майдони бўлади.

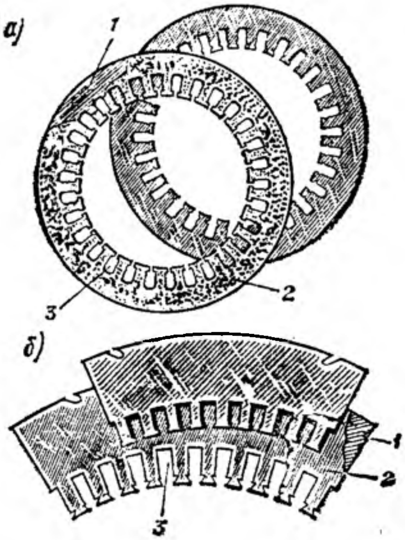
37. Уч фазали асинхрон двигателнинг тузилиши

Асинхрон двигатель асосан икки қисмдан: қўзғалмас қисм — **статор** ва айланувчи қисм — **ротордан** иборат. Статор двигатель корпуси *1*, асос *4*, корпус ичига ўрнатилган ферромагнит ўзак *2* ва шу ўзак пазларига жойлаштириладиган учта чулғам *3* дан ташкил топган (79-расм). Двигателнинг қўзғалмас қисмида подшипниклар ўрнатиладиган ва икки томондан статорга маҳкамланадиган ён шчитлар ҳам бўлади. Статор ичига ўрнатиладиган ферромагнит ўзак, уюрма токларни камайтириш мақсадида, қалинлиги 0,35 ... 0,5 мм ли ва махсус электротехника пўлатидан (пўлат маркаси: 2013, 2312, 2411 ва ҳоказо) тайёрланган юпқа пластинкалардан йиғилади. Статор пўлат ўзагининг пластинкалари маълум шаклда (пазли) штамплаб тайёрланади. Статор пўлат ўзагининг айрим пластинкалари 80-расм, *а* да, 80-расм, *б* да эса катта қувватли машиналар статори ўзагининг айрим сегментлари кўрсатилган. Пластинкаларнинг икки томонига изоляцияловчи махсус лок суртилади. Пластинкалар маълум тартибда йиғилади. Бунда статорнинг ички сиртида валга параллел бўлган



79- расм. Ўзгарувчан ток машинасининг статори:

1 — станина, *2* — пўлат ўзак, *3* — чулғам, *4* — асос, *5* — кўтарма болт.



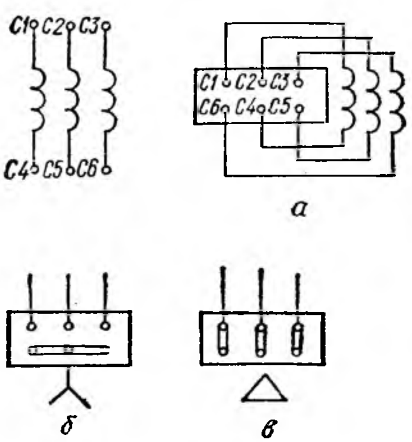
80- расм. Статор пўлат ўзагининг айрим пластинкалари:

1 — пўлат, *2* — лок қатлами ёки юпқа қоғоз, *3* — паз.

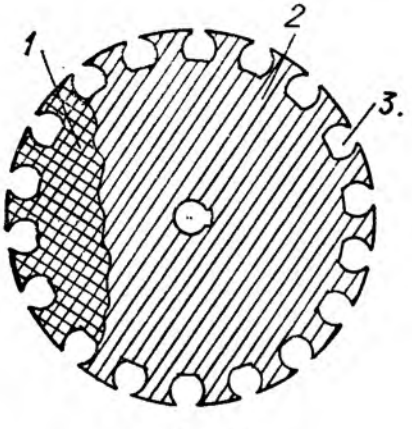
пазлар ҳосил бўлади. Бу пазларга статор чулғамлари жойлаштирилади.

Ўзгарувчан ток машиналарининг статор чулғамлари, уларни ҳисоблаш ва ўраш усуллари билан олдинги бўлимда танишдик. Статор пазларига учта статор чулғами жойлаштирилади. Чулғамларнинг бош ва охирги учлари машина корпусининг ён ёки уст томонига ўрнатилган клеммалар қутисига чиқарилади. Статор чулғамларининг бош учлари *С*1, *С*2, *С*3 билан ва охирги учлари *С*4, *С*5, *С*6 билан белгиланади. Статор чулғамлари юлдуз ёки учбурчак усулида уланади. Чулғамларни бундай усулларда улаш ушбу двигателни қиймати бўйича $\sqrt{3}$ марта фарқ қиладиган икки хил кучланишда (380/220 В ёки 220/127 В) ишлатишга имкон беради. Кўпинча асинхрон двигатель 380/220 В кучланишга мўлжаллаб тайёрланади. Агар тармоқ кучланиши 380 В бўлса, статор чулғамлари юлдуз усулида, тармоқ кучланиши 220 В бўлса, чулғамлар учбурчак усулида уланади. Ишлатиш давомида статор чулғамларини турли усулда улашни осонлаштириш мақсадида клеммалар қутисида айрим чулғамларнинг бош ва охирги учлари маълум тартибда ўрнатилади. 81-расмда клеммаларни ўрнатиш тартиби ва чулғамларнинг уланиши кўрсатилган. Агар тармоқ кучланиши двигатель паспортида кўрсатилган кучланишга мос келмаса, бундай двигателни шу тармоққа улаб ишлатиш мумкин эмас.

Асинхрон двигателнинг ротори унинг статори ичига ўрнатилади. Ротор асосан вал, ферромагнит ўзак ва унинг пазларига жойлаштирилган қисқа туташган симлардан ёки учта чулғамдан



81- расм.



82- расм. Ротор пўлат ўзагининг айрим пластинкаси:

1 — пўлат, *2* — лок қатлами ёки қоғоз, *3* — паз.

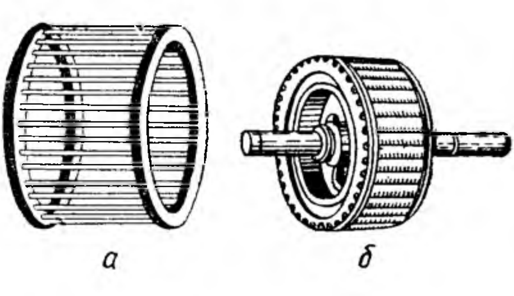
иборат бўлади. Роторнинг ферромагнит ўзаги ҳам махсус электротехника пўлатидан тайёрланган юпқа пластинкалардан йиғилади. Ротор ўзагининг пластинкалари ҳам маълум шаклда штамплаб тайёрланади. Ротор чулғами ҳам пўлат ўзак пазларига ўрнатилади. Ротор ўзагининг айрим пластинкаси 82-расмда ва ундаги пазларнинг шакли 60- расм *а* ва *в* да кўрсатилган. Пазлар очиқ, ярим очиқ ёки ёпиқ қилиб тайёрланади. Пластинкалар ротор валига кийдирилганда роторда узунасига пазлар ҳосил бўлади.

Асинхрон двигателлар ротори тузилиши икки хил:

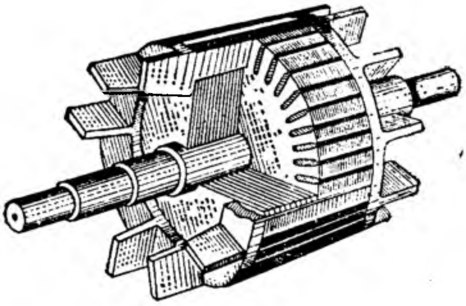
а) қисқа туташтирилган роторли асинхрон двигатель;

б) фаза роторли асинхрон двигатель.

а) Қисқа туташтирилган роторли асинхрон двигателлар роторининг ферромагнит ўзаги пазларига изоляцияси бўлмаган мис ёки алюминий симлар ёхуд стерженлар жойлаштирилади. Бу стерженларнинг учлари икки томондан мис ёки алюминий ҳалқаларга кавшарланади. Агар ротор пазларидаги стерженларни ва стержень учларини бирлаштирувчи ҳалқаларни ротордан чиқариб олинса, катакли ҳалқа ҳосил бўлади (83- расм, *а*). Катакли ҳалқанинг стерженлари роторнинг қисқа туташтирилган чулғами, бундай ротор эса қисқа туташтирилган ротор дейилади (83- расм, *б*). Қисқа туташтирилган ротор ўзагининг пазлари овалсимон бўлиб, унга кўпинча



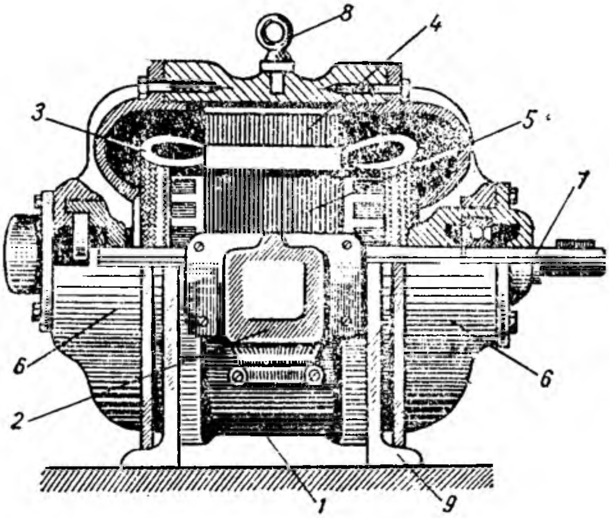
83- расм. Олмахон ҳалқаси (*а*), қисқа туташтирилган ротор (*б*).



84- расм. Қисқа туташтирилган ротор.

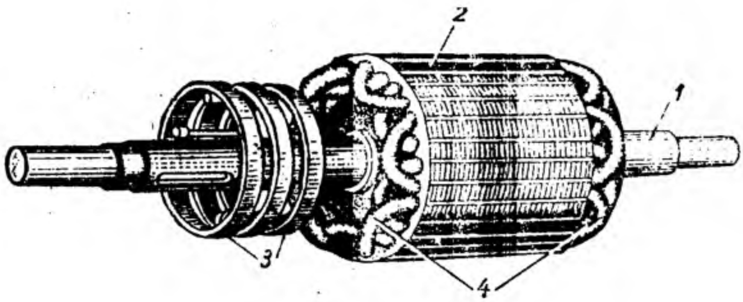
эритилган алюминий қуйилади ва яхлит „олмахон ҳалқаси“ ҳосил қилинади. Ротор танасининг икки ён томонидан совитувчи қанотлар ҳам чиқарилади (84- расм). Катакли ҳалқанинг стерженлари пўлат ўзакдан изоляцияланмайди, чунки қисқа туташтирилган мис ёки алюминий симларнинг электр ўтказувчанлиги пўлат ўзакнинг электр ўтказувчанлигидан ўн ва ундан ортиқ марта катта бўлади, бундай шароитда стерженларни изоляциялашнинг аҳамияти бўлмайди. Умуман, стерженлари ва ҳалқалари қуйма алюминийдан ишланган ротор оддий тузилган, таннархи арзон, енгил, тайёрланиш технологияси осон. 85- расмда қисқа туташтирилган роторли асинхрон двигателнинг конструктив схемаси кўрсатилган.

б) Фаза роторли асинхрон двигатель ҳам, вал ва унга ўрнатилган ферромагнит ўзакдан иборат бўлиб, ўзакнинг пазларига изоляцияланган мис симдан ўралган учта чулғам, фазода бир-бирига нисбатан 120° га силжитилган ҳолда жойлаштирилади. Кўпинча ротор чулғамлари юлдуз усулида уланади. Чул-



85- расм. Қисқа туташтирилган роторли асинхрон двигатель:

1 — станина (корпус), 2 — қисмалар қутиси, 3 — статор чулғами, 4 — статор пўлат ўзаги, 5 — ротор, 6 — подшипник шчитлари, 7 — вал, 8 — кўтарма болт, 9 — асос.

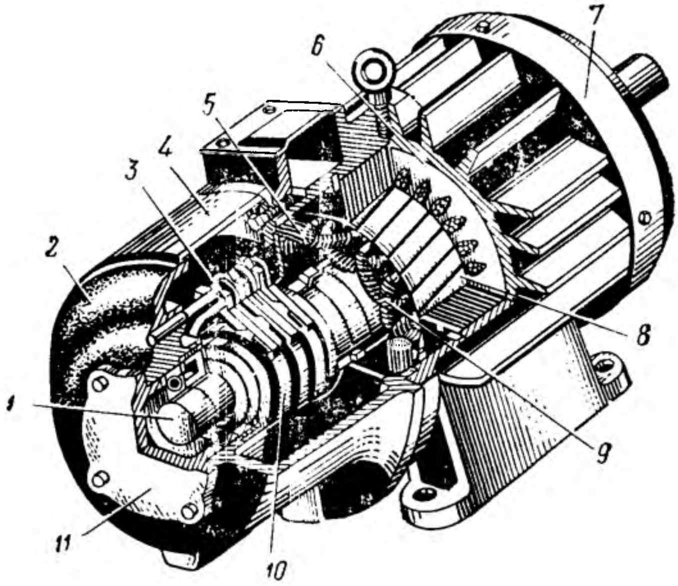


86-расм. Фазали ротор:

1 — вал, *2* — ротор пўлат ўзаги, *3* — контакт ҳалқалар, *4* — ротор чулғами.

ғамларнинг охирги учлари бир нуқтага уланади, бош учлари эса ротор ўқининг бир томонига ўрнатилган учта мис ёки латунь ҳалқага уланади (86-расм). Бу ҳалқалар машинанинг темир қисмларидан ва бир-биридан пухта изоляцияланган. Машинанинг қўзғалмас қисмига ўрнатилган махсус тутқичларда юпқа мис пластинкалардан ёки кўмирдан ясалган чўткалар ўрнатилган. Чўткалар пружина ёрдамида ҳалқаларга тегиб туради, ротор айланганда чўткалар ҳалқаларда сирпанади ва электр токини яхши ўтказадиган контакт ҳосил қилади. Шундай қилиб, ротор чулғамларининг бош учлари ҳалқа ва чўткалар орқали ташқи клеммаларга чиқарилади. Ротор чулғамининг клеммалари *Р*1, *Р*2 ва *Р*3 билан белгиланади. 87-расмда фаза роторли асинхрон двигателнинг айрим қисмлари кўрсатилган. Асинхрон двигателни юргизиш учун унинг статор чулғами уч фазали ток тармоғига уланиши лозим. Фаза роторли двигатель махсус юргизиш реостати ёрдамида юргизилади. Юргизиш реостати ротор чулғами билан кетма-кет уланади. Юргизиш реостати юлдуз усулида уланган уч фазали реостатдир. Юргизиш реостатининг қаршилиги 4 . . . 6 босқичли. Двигатель юргизилаётганида юргизиш реостатининг ҳамма қаршилиги ротор чулғамига бутунлай уланган бўлиши лозим. Статор чулғамлари тармоққа уланганда двигателнинг ротори айлана бошлайди. Унинг тезлиги ошган сари юргизиш реостатининг қаршилиги унинг сургичи ёрдамида бир босқичга камайтириб борилади ва юргизиш охирида реостат қаршилиги схемадан бутунлай чиқарилади. Бунда двигателнинг айланиш частотаси валдаги нагрузка қиймати билан аниқланади. Юргизиш реостатининг қаршилиги нолга тенг бўлганда ротор чулғамлари қисқа туташиб қолади. Ҳалқа ва чўткалар машинанинг нозик қисмлари ҳисобланиб, чўткалар ҳалқаларда сирпанавериб ейилади ва тез ишдан чиқади.

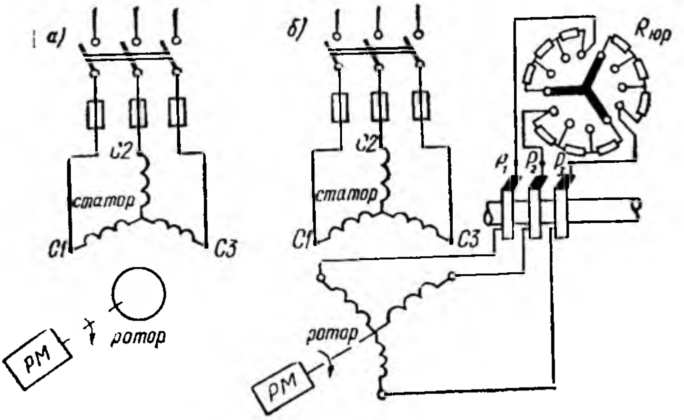
Асинхрон двигателда статор занжири ротор занжири билан электр жиҳатдан ўзаро боғланмаган. Статор чулғамлари тармоқ кучланишига уланганда чулғамлардан ўтадиган уч фазали ток энергияси роторга магнит майдони воситасида узатилади. Бу жи-



87- расм. Фаза роторли асинхрон двигателнинг умумий кўриниши (Маркаси МТ-22-6, 75 кВт):

1 — вал, *2* — подшипник шчити, *3* — чўтка туткич, *4* — корпус, *5* — статор чулғами, *6* — статор пўлат ўзаги, *7* — вентилятор қопқоғи, *8* — ротор пўлат ўзаги, *9* — ротор чулғами, *10* — контакт ҳалқалар, *11* — подшипник қопқоғи

ҳатдан асинхрон двигатель трансформаторга ўхшайди. Статор чулғами трансформаторнинг бирламчи чулғами, ротор чулғами эса трансформаторнинг иккиламчи чулғами ўрнида ишлайди. Шунинг учун асинхрон двигателлар баъзан индукцион машиналар дейилади. Саноат корхоналарида асосан, қисқа туташтирилган роторли асинхрон двигатель ўрнатилади. Қисқа туташтирилган роторли асинхрон двигателларнинг тузилиши оддий, ишда ишончли, уларни бошқариш осон. Лекин уларда юргизиш моментининг кичиклиги ва юргизиш токининг катталиги қисқа туташтирилган роторли двигателларнинг камчилиги ҳисобланади. Шунинг учун юргизиш моменти унча катта бўлмаган механизмларда қисқа туташтирилган роторли асинхрон двигателлар қўлланилади. Фаза роторли асинхрон двигателда юргизиш моментини юргизиш реостати ёрдамида максимал моментгача ошириш мумкин. Шунинг учун фаза роторли асинхрон двигателлар катта нагрузка билан юргизилиши лозим бўлган ва роторнинг айланиш частотасини ростлаш талаб қилинадиган механизмларда қўлланилади. 88- расмда қисқа туташтирилган роторли (*а*) ва фаза роторли асинхрон двигателнинг (*б*) электр схемаси кўрсатилган. Ҳар бир асинхрон двигателнинг техник характеристикаси унинг паспортида ёзилган бўлади. Унда қуйидагилар кўрсатилади:

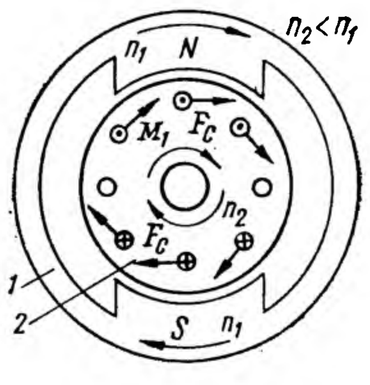


88- расм. Қисқа туташтирилган роторли (*а*) ва фазали роторли асинхрон двигателнинг (*б*) шартли белгилари (схемалари).

1. Двигатель маркаси
2. Номинал қуввати (кВт)
3. Номинал кучланиши (В) ва статор чулгамларининг уланиш схемаси
4. Двигателнинг номинал токи (А)
5. Частотаси
6. Номинал айланиш частотаси (айл/мин)
7. Нагрузкаси номинал бўлганда двигателнинг фойдали иш коэффициенти (η) ва қувват коэффициенти ($\cos\varphi$)
8. Ишлаб чиқарган завод номи.

38. Асинхрон двигателнинг ишлаш принципи

Асинхрон двигателнинг ишлаш принципи статор чулғамларидан уч фазали ток ўтганда статорда айланма магнит майдонининг ҳосил бўлишига асосланган. Асинхрон двигателнинг ишлаш принципини ўрганиш учун ичига магнит қутблари маҳкамланган ва ўз ўқи атрофида эркин айланадиган ҳалқа *1* олинади (89- расм). Бу ҳалқа айланганда, унинг ичидаги магнит майдони ҳам айланади, натижада айланма магнит майдони ҳосил бўлади. Энди бу ҳалқа ичига енгил айланадиган қисқа туташган ротор *2* ўрнатамиз. Агар магнитли ҳалқа маълум бир тезликда масалан, n, тезликда айлантирилса, магнит майдонининг куч чизиқлари ротор нинг қисқа туташтирилган симларини кесиб ўтади ва бу симларда ЭЮК ҳосил бўлади. Бу ЭЮК ротор симларида ток ҳосил қилади. Роторнинг қисқа туташган

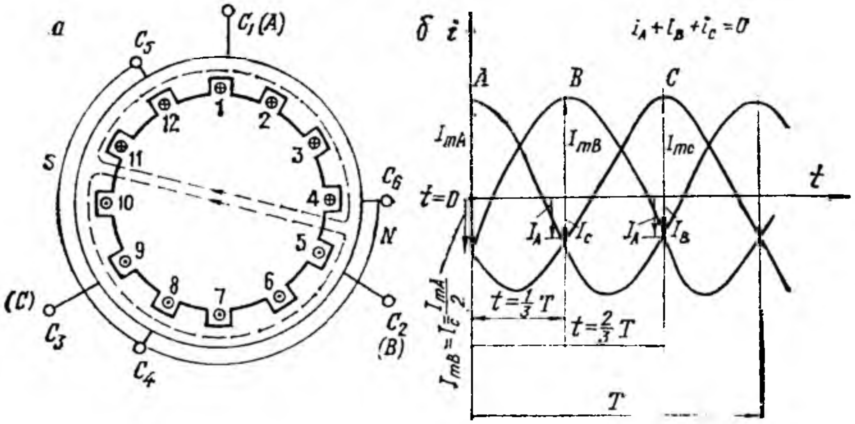


89- расм.

симларида (ёки ротор чулғамларида) ҳосил бўлган шу токнинг айланма магнит майдони билан ўзаро таъсири натижасида ротор симларига электромагниг кучлар F_c таъсир қилади. Бу кучларнинг йўналиши чап қўл қоидаси билан аниқланади. Роторнинг айрим симларига таъсир этувчи кучлар уни айлантирадиган электромагнит моментни ҳосил қилади. Натижада ротор ҳам қандайдир масалан, n_2 тезлик билан айланма магнит майдони йўналишида айлана бошлайди. Демак, асинхрон двигателнинг ишлаш принципи айланма магнит майдони билан роторнинг қисқа туташтирилган симларида (ёки ротор чулғамларида) ҳосил бўладиган токларнинг узаро таъсирига асосланган экан. Реал уч фазали синхрон двигателларда статор чулғамларидан уч фазали ток ўтганда статор ичида айланма магнит майдони ўз-ўзидан ҳосил бўлади.

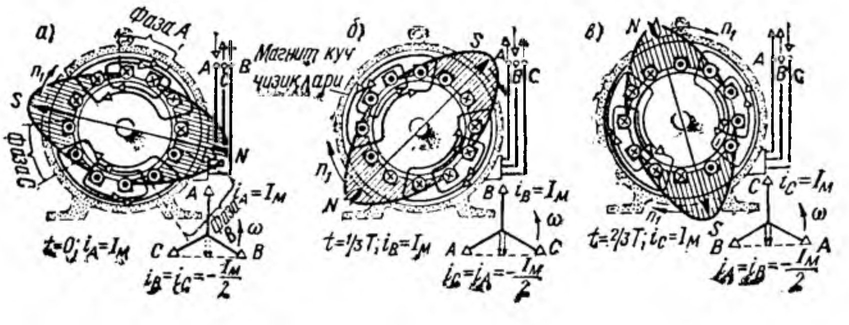
Айрим фазалари бир-бирига нисбатан 120° га силжиган статор чулғамларининг токи, фазода бир-бирига нисбатан 120° га силжиган магнитловчи кучларни ва статор ичида маълум бир тезликда айланадиган айланма магнит майдони (магниг оқими) ни ҳосил қилади.

Энди айрим фаза чулғамлари икки ўрамдан иборат бўлган уч фазали асинхрон двигатель статорида айланма магнит майдонининг ҳосил бўлишини кўриб чиқамиз. 90-расмда айрим фаза чулғамлари икки ўрамдан, яъни статор ўзагининг пазларида жойлашган тўртта симдан иборат бўлган статор схемаси чизилган. Статор чулғами юлдуз усулида уланган. Ўзакнинг 1, 2, 7 ва 8-пазларидаги симлар A фазага; 5, 6, 11 ва 12-пазларидаги симлар B фазага; 9, 10, 3 ва 4-пазларидаги симлар C фазага тегишлидир. Чулғамнинг бош учидан охирги учига йўналган ток мусбат, тескари томонга йўналган ток манфий деб қабул



90-расм. Статорнинг (якорнинг) уч фазали чулғамидан уч фазали ток ўтганда айланма магнит майдонининг ҳосил бўлиши.

қилинади. Маълумки, токли ҳар бир чулғам ўзгарувчан магнит майдонини ҳосил қилади. Уч фазали токнинг учта ўзгарувчан магнит майдони қўшилиб умумий йиғинди магнит майдонини ҳосил қилади. Йиғинди магнит майдонининг йўналиши ҳам доим ўзгариб туради. Лекин вақтнинг исталган айрим моментлари учун унинг йўналишини аниқлаш мумкин. 90-расм, *б* да чулғамлардан ўтадиган уч фазали токнинг вақт ичида ўзгариш графиги кўрсатилган. Унда вақтнинг бошланғич моментида ($t = 0$ бўлганда) ток *A* фазада мусбат ва максимал қийматга эга бўлсин. Бунда *B* ва *C* фазаларда ток манфий, қиймати эса I_A токнинг ярмиға тенг бўлади (91-расм, *а*). Чулғам симларида ток йўналиши мусбат бўлса (+) билан, манфий бўлса нуқта билан кўрсатилган. Учта чулғам симларидаги токнинг йўналишига қараб йиғинди магнит майдонининг йўналишини аниқлаш мумкин. 91-расмда фазаларда ток максимал бўлганда йиғинди магнит майдонининг йўналиши, шу майдоннинг куч чизиқлари ва магнит индукциясининг ўзгариш шакли (штрихланган юза) ҳам кўрсатилган. *A* фазада ток максимал бўлганда йиғинди магнит майдонининг куч чизиқлари статор пўлат ўзагининг ўнг томонида пўлат ўзакдан ҳавога, чап томонида эса ҳаводан пўлат ўзакка йўналади. Демак, шу моментда пўлат ўзак ярмининг ўнг томони — шимолий магнит қутб; чап томони — жанубий магнит қутб вазифасини бажаради. $t = 1/3T$ бўлганда *B* фазада ток мусбат ва максимал қийматга; *A* ва *C* фазаларда эса манфий ва қиймати I_B токнинг ярмига тенг бўлади. Бунда йиғинди магнит майдони янги вазиятни олади ва олдингига нисбатан 120° га бурилади. $t = 2/3T$ бўлганда *C* фазада ток максимал бўлади ва ҳоказо. Демак, айрим фаза чулғамларида ток ўзгарганда магнит майдонининг шакли ўзгармайди ва майдон ўқи соат стрелкаси ҳаракати йўналишида узлуксиз айланади. Шундай қилиб, асинхрон двигатель статорининг чулғамларидан уч фазали ток ўтганда статор ичида ўз-ўзидан айланувчи а й л а н м а м а г н и т м а й д о н и ҳосил бўлар экан. Чулғамларни тармоққа улайдиган учта симдан иккитасининг ўрни ўзгартирилса, айланма магнит майдонининг айланиш йўналиши ўзгаради.



91-расм.

Статор чулғамининг ҳар бир фазаси фақат битта ғалтакдан иборат бўлса, уч фазали ток системаси асинхрон машинада икки қутбли магнит майдонини ҳосил қилади. Агар машина икки қутбли бўлса, ўзгарувчан токнинг бир даври ичида магнит майдони 360° га бурилади, яъни бир марта айланади. Уч фазали чулғамдан ўтувчи ток кўп қутбли айланма магнит майдонини ҳам ҳосил қилади. Масалан, $p = 2$, яъни 4 қутбли магнит майдонини ҳосил қилиш учун статорнинг ҳар бир фаза чулғами иккита ғалтакдан иборат бўлиши ва бурчак эса икки марта кичик бўлиши, яъни ўрам симлари $180°/2 = 90°$ даги пазларда жойлашиши керак.

Статорда ҳосил бўладиган магнит майдонининг айланиш частотаси ўзгарувчан ток частотасининг қиймати f га тўғри пропорционал ва жуфт қутблар сони (p) га тескари пропорционал бўлади. Айланма магнит майдонининг айланиш частотаси n_1 билан белгиланади ва қуйидагича аниқланади:

$$n_1 = \frac{60f}{p}. \tag{3-1}$$

Айланма магнит майдонининг айланиш тезлиги (частотаси) **синхрон тезлик** дейилади, у баъзан n_c билан ҳам белгиланади. Агар ўзгарувчан ток частотаси $f = 50$ Гц бўлса, айланма магнит майдонининг айланиш частотаси фақат жуфт қутблар сонига боғлиқ бўлади. Жуфт қутблар сонига қараб айланма магнит майдонининг айланиш тезлиги ҳам ҳар хил бўлади, масалан: агар $p = 1$ бўлса, $n_1 = 3000$ айл/мин, $p = 2$ бўлса, $n_1 = 1500$ айл/мин, $p = 3$ бўлса, $n_1 = 1000$ айл/мин, $p = 4$ бўлса, $n_1 = 750$ айл/мин бўлади.

Асинхрон двигателнинг статор чулғамлари тармоққа улангандa унинг ротори айлана бошлайди. Роторнинг тезлиги n_2 аста-секин ўсиб боради, лекин магнит майдонининг тезлигига ета олмайди. **Асинхрон двигателда роторнинг айланиш тезлиги магнит майдонининг айланиш тезлигидан доимо кичик ($n_2 < n_1$) бўлади.** Бу хусусият фақат асинхрон двигателларга хос бўлган хусусиятдир. Чунки, роторнинг айланиш тезлиги айланма магнит майдонининг тезлигидан кичик бўлганида магнит майдонининг куч чизиқлари ротор симларини кесиб ўтади ва бу симларда ЭЮК ва ток ҳосил қилади, роторга айлантирувчи момент таъсир этади ва ротор айлана бошлайди. Агар роторнинг айланиш частотаси магнит майдонининг айланиш частотасига тенг бўлса, ротор симлари магнит майдони куч чизиқлари билан кесишмайди, симларда эса ЭЮК ҳосил бўлмайди, роторга айлантирувчи момент таъсир этмайди. Реал шароитда двигатель юргизилганда роторнинг тезлиги ошиб боради ва синхрон тезликдан камроқ тезликда турғун ишлай бошлайди. Роторнинг айланиш частотаси n_2 билан белгиланади. Двигатель нормал шароитда ишлаганда айланма магнит майдони роторга нисбатан ($n_1 - n_2$) тезлик билан айланади. Бу нисбий тезлик **сирпаниш тезлиги** дейилади. Сирпаниш тезлигининг

айланма магнит майдонининг тезлигига нисбати **асинхрон двигателнинг сирпаниши** дейилади. Сирпаниш s ҳарфи билан белгиланади ва асинхрон двигатель учун муҳим параметр ҳисобланади. Сирпаниш қуйидагича аниқланади:

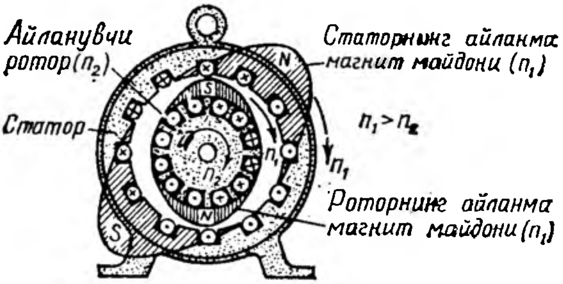
$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\,\%. \qquad (3\text{-}2)$$

Асинхрон двигателнинг сирпаниши, унинг ишлаш шароитига қараб 0 дан 1 гача ўзгариши мумкин. Двигатель салт ишлаганда унинг ротори синхрон тезликка яқин тезликда айланади. Бунда сирпанишнинг қиймати нолга яқин бўлади. Асинхрон двигателни юргизишнинг бошланғич пайтида унинг сирпаниши 1(100 %) га тенг бўлади. Двигатель номинал нагрузка билан ишлаганда сирпаниш ҳам номинал қийматга ($s_н$) эга бўлади. Қуввати 1 дан 1000 кВт гача бўлган асинхрон двигателларнинг **номинал сирпаниши** 0,01 дан 0,06 гача, яъни 1 дан 6 % гача; баъзи машиналарда 0,12 . . . 0,15 (12 . . . 15 %) гача бўлиши мумкин. Кичик қувватли двигателларнинг номинал сирпаниши 4 — 6 % ва катта қувватли двигателларники 1 — 2 % бўлади.

Асинхрон двигателнинг нагрузкаси ортган сари роторининг айланиш частотаси камая боради, сирпаниш қиймати эса орта боради. Сирпаниш кўпайса, ротор симларида ҳосил бўладиган ЭЮК ва ток қиймати ортади. Ротор токи кўпайса, роторга таъсир этувчи айлантирувчи момент ҳам кўпаяди. Шундай қилиб, нагрузка моменти ва айлантирувчи моментларнинг динамик мувозанати вужудга келади. Сирпаниш формуласидан роторнинг айланиш частотаси қуйидагича аниқланади:

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s). \qquad (3\text{-}3)$$

Агар асинхрон двигатель уланган тармоқда кучланиш ва частота номинал қийматга ва двигатель нагрузкаси ҳам номинал қийматга тенг бўлса, двигатель ротори номинал тезлик ($n_{2н}$) билан айланади. Асинхрон двигатель паспортида роторнинг айланиш частотаси кўрсатилади. Олдин айтиб ўтилганидек, ротор тезлиги айланма магнит майдони айланиш тезлигидан 1 . . . 6 % га кичик бўлади. Асинхрон двигателларда статор билан ротор орасидаги ҳаво оралиғи қанча кичик бўлса, улар орасидаги магнит боғланиш ҳам шунча кучли бўлади. Шунинг учун бу оралиқ асинхрон двигателларда мумкин қадар кичкина қилинади.



92- расм.

Асинхрон двигатель нормал шароитда ишлаганда унинг статорида асосий айланма магнит юритувчи куч, роторида эса роторнинг айланма магнит юритувчи кучи ҳосил бўлади (92-расм). Бу расмда статор ва ротор магнит майдонларининг бир-бирига нисбатан вазияти ва магнит майдонлари индукциясининг ўзгариш шакли кўрсатилган. Роторнинг айланиш частотаси n_2 га, лекин ротор МЮК ининг айланиш частотаси n_1 га тенг бўлади.

39. Асинхрон машинанинг ишлаш шароитлари

Асинхрон машина турли шароитларда (режимларда) ишлай олади. Бундай машиналар асинхрон двигатель сифатида, асинхрон генератор ва электромагнит тормоз сифатида ишлай олади. Машинанинг қандай шароитда ишлаши n_1 ва n_2 тезликлар қийматларига, уларнинг бир-бирига нисбатан катта ёки кичик бўлишига ва роторнинг айланиш йўналишига боғлиқ.

а) Асинхрон машинанинг асинхрон двигатель сифатида ишлаши. Бу шароитда $n_1 > n_2$ бўлади. Машинанинг роторига таъсир этадиган момент айлантирувчи момент бўлади. Машина электр энергиясини механик энергияга айлантириб беради. Двигателни юргизишнинг бошланғич пайтида ($t = 0$) $n_2 = 0$ бўлади. Бунда сирпаниш $s = 1$. Двигатель нагрузкасиз (салт) ишлаганда $n_1 \approx n_2$ бўлади. Бунда сирпаниш $s = 0$. Демак, асинхрон машина, сирпаниш қиймати 0 дан 1 гача ўзгарганда двигатель сифатида ишлайди.

б) Асинхрон машина генератор сифатида ишлаганда асинхрон машинанинг ротори бошқа бирламчи двигатель ёрдамида айланма магнит майдони йўналишида $n_2 > n_1$ тезлик билан айлантирилади, машинанинг сирпаниши манфий. Бундай машина якорида ток I актив қисмининг йўналиши ўзгаради, реактив қисмининг йўналиши ўзгаришсиз қолади. Бу шароитда роторга таъсир этувчи электромагнит момент тормозловчи момент бўлади. Асинхрон машина генератор сифатида ишлайди ва бирламчи двигателнинг механик энергиясини электр энергияга айлантириб беради. Асинхрон машинанинг сирпаниши 0 дан ∞ гача ўзгарганда у генератор сифатида ишлайди. Асинхрон машина генератор сифатида ишлаганда у тармоқдан магнитловчи ток, яъни реактив қувват олиб ишлайди. Бу қувват унда айланма магнит майдони ҳосил қилиш учун сарфланади. Машина истеъмолчига актив энергия бериб ишлайди. Асинхрон генератор реактив энергия манбаи бўлган синхрон генераторлар ёки компенсаторлар билан бирга ишлаши лозим. Асинхрон генератор амалда кам ишлатилади.

в) Асинхрон машинанинг электромагнит тормоз сифатида ишлаши. Машина ва механизмларни тез тўхтатиш учун турли хил тормоз курилмалари ишлатилади. Асинхрон машинани механик, электродинамик усулда ва ишлаб турган двигателни тармоққа тескари улаб тормозлаш мумкин. Асинхрон машина ишлаганда унинг магнит майдони ва ротори бир томонга айланади. Ишлаб турган двигателни тормозлаш учун статор

93- расм. Асинхрон машинанинг турли режимларда ишлаши.

чулғамларини тармоққа улайдиган учта симнинг иккитасини ўрни алмаштирилади. Бунда айланма магнит майдонининг йўналиши ўзгаради ва у тескари томонга айлана бошлайди. Ротор эса ўзининг инерцияси таъсирида илгаригидек айланади ва у олдин тормозланади, кейин яна айланма майдон йўналишида тескари томонга айлана бошлайди. Тескари томонга айланишидан олдин (тормозланган пайтда) машина тармоқдан узиб қўйилади. Машина электромагнит тормоз шароитида ишлаганда ротор занжирида қувват кўп исроф бўлади. Тормозланиш пайтида статор чулғамларида қисқа вақт давомида токнинг кўпайиб кетиши бу усулнинг камчилиги ҳисобланади. Демак, асинхрон машина электромагнит тормоз сифатида ишлаганда унинг сирпаниши 1 дан $+\infty$ гача ўзгарар экан. 93- расмда асинхрон машина турли шароитларда ишлаганда унинг сирпанишининг ўзгариш чегаралари кўрсатилган.

VII БОБ. АСИНХРОН МАШИНАНИНГ ДВИГАТЕЛЬ СИФАТИДА ИШЛАШИ

40. Асинхрон двигатель чулғамларининг электр юритувчи кучлари

Асинхрон двигатель статорининг чулғами тармоққа уланганда электр энергияси статордан роторга магнит майдони воситасида узатилади. Двигатель ишлаб турганда унинг статор чулғамидан ҳам, ротор чулғамидан ҳам ток ўтиб туради. Двигатель фаза роторли бўлса, ундан уч фазали ток; қисқа туташган роторли бўлса m фазали ток ўтади (m — ротор пазлари ёки қисқа туташган симлар сони). Статор ва ротор токлари ўзларининг хусусий МЮК ларини ($\dot{F}_1$ ва $\dot{F}_2$) ҳосил қилади. Натижада двигателда уларнинг йиғиндисига тенг бўлган йиғинди МЮК ҳосил бўлади. Йиғинди МЮК двигателнинг асосий магнит оқимини ($\dot{\Phi}$) ҳосил қилади. Асосий магнит оқимининг куч чизиқлари ста-

тор ва ротор чулғамлари билан илашади ва уларда ЭЮК ҳосил қилади. Статор чулғамининг ЭЮК E_1 табиатан ўзиндукция ЭЮК бўлиб, унинг қиймати (2-15) формула билан аниқланади:

$$E_1 = 4{,}44 w_1 \cdot k_1 f_1 \Phi_m, \qquad (3\text{-}4)$$

бу ерда: k_1 — чулғам коэффициенти; w_1 — статор чулғамининг бир фазасига тегишли эффектив ўрамлар сони.

ЭЮК нинг асосий гармоникаси учун чулғам коэффициенти 0,9 ... 0,96; трансформатор учун эса $k_1 = 1$ га тенг.

Асосий магнит оқими ротор чулғами (ёки қисқа туташтирилган симлари) билан ҳам кесишади ва уларда ҳам ЭЮК E_2 ҳосил қилади. Ротор чулғамида ҳосил бўладиган ЭЮК формуласини олдин қўзғалмас ротор учун, сўнгра айланадиган ротор (нормал ҳол) учун аниқлаймиз. Агар фаза роторли асинхрон двигателнинг ротор чулғами очиқ ҳолда бўлсэ, двигатель тармоққа уланганда унинг ротори айланмайди. Бу ҳолда айланма магнит оқими роторга нисбатан ҳам синхрон тезликда айланади ва ротор чулғамида $f_1 = \frac{np}{60}$ частотали ЭЮК ҳосил қилади. Ротори қўзғалмас асинхрон двигатель трансформатордек ишлайди. Ротор чулғамида ҳосил бўладиган ЭЮК қуйидагича аниқланади:

$$E_2 = 4{,}44 w_2 k_2 f_2 \Phi_m. \qquad (B)$$

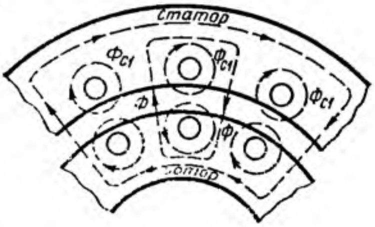
Бу шароитда $f_2 = f_1$ бўлгани учун:

$$E_2 = 4{,}44 w_2 k_2 f_1 \Phi_m, \qquad (3\text{-}5)$$

бу ерда: k_2 — ротор чулғамининг чулғам коэффициенти; w_2 — ротор чулғамининг эффектив ўрамлари сони.

Ротор чулғами ҳам ротор пазларига ўрнатилади, чулғам симлари бир-бирига нисбатан маълум бурчакка силжиган бўлади. Шунинг учун ротор чулғамининг ЭЮК формуласига чулғам коэффициенти киритилади.

Асинхрон машиналарда асосий магнит оқими Φ статорнинг пўлат ўзаги, ҳаво оралиғи ва роторнинг пўлат ўзаги орқали куршалади (94-расм). Магнит оқимининг бир қисми статор чулғамининг симлари, статор ўзаги ва ҳаво оралиғи орқали куршалади. Бу оқим статорнинг сочилма магнит оқими (Φ_{c1}) дейилади. Бундан ташқари, ротор токлари куч чизиқлари фақат ротор пўлат ўзаги ва ҳаво оралиғидан ўтиб куршаладиган роторнинг сочилма магнит оқими (Φ_{c2}) ни ҳам ҳосил қилади.



94- расм.

Сочилма оқим Φ_{c1} статор чулғамида сочилма ЭЮК E_{c1} ни ҳосил қилади. E_{c1} нинг қиймати статор чулғамининг индуктив қаршилигида кучланиш пасайиши, яъни $E_{c1} = -jI_0 x_1$ билан аниқланади.

Агар асинхрон машина салт ишлаш шароитида ишлаганда статор чулғамидан салт ишлаш токи ўтади.

Асинхрон машинанинг магнит занжирида ҳаво оралиғи бўлгани учун салт ишлаш токи, трансформаторникига қараганда анча катта бўлади ва статор номинал токининг 20 ... 60% ини ташкил қилади (трансформаторда 2 ... 10%). Салт ишлаш токининг катта бўлиши асинхрон машинанинг камчилиги ҳисобланади. Бунда статор занжирида энергия кўп исроф бўлади ва двигателнинг қувват коэффициенти камаяди. Салт ишлаш токини камайтириш мақсадида статор билан ротор орасидаги ҳаво оралиғи мумкин қадар кичкина қилинади. Масалан, қуввати 5 кВт гача бўлган двигателларда бу оралиқ 0,1 ... 0,3 мм бўлади.

Ротори қўзгалмас асинхрон двигатель трансформатор сифатида ишлаши мумкин дедик. Агар ротор чулғами занжирига нагрузка ($z_н$) уланса, бундай двигателнинг статор занжири ва ротор занжири учун ЭЮК лар ва токлар тенгламасини ёзиш мумкин. Бу тенгламалар нагрузкали трансформаторнинг ЭЮК лари ва токлари тенгламасига ўхшаш бўлади. Лекин айланма магнит майдонининг бўлиши, бирламчи ва иккиламчи чулғам токларининг ўзаро таъсири асинхрон машинанинг ўзига хос хусусиятидир. Асинхрон машиналарда статор ва ротор МЮК лар тўлқинларининг айланиш частоталари тенг бўлиши лозим. Статор ва роторда қутблар сони бир хил бўлиши керак. Шунда статор ва ротор МЮК ларининг тўлқинлари бир-бирига нисбатан қўзғалмас бўлади ва уларнинг ўзаро таъсири натижасида қувватни статордан роторга ўтиши таъминланади. Бу ерда ҳам асосий магнит оқими машинанинг турли иш шароитларида деярли бир хилда қолади. Умуман, қўзғалмас роторли асинхрон машинанинг назарияси трансформатор назариясига ўхшаш, лекин амалда асинхрон машина трансформатор ўрнида ишлатилмайди. Ротори қўзғалмас асинхрон машиналар **фазорегуляторлар** ва **индукцион регуляторлар** сифатида ишлатилади. Булар ҳақида кейинроқ тўхталамиз.

Асинхрон машина нормал шароитда ишлаганда унинг ротори айланма магнит майдони йўналишида айланади ва унинг иши давомида доимо $n_2 < n_1$ бўлади. Айланма магнит майдони ротор чулғамида ЭЮК E_{2S} ни ҳосил қилади ва у қуйидагича аниқланади:

$$E_{2S} = 4{,}44\, w_2 K_2 f_2 \Phi_m, \qquad (3\text{-}6)$$

бу ерда: f_2 — роторда ҳосил бўлган ЭЮК частотаси. Айланма магнит майдони роторга нисбатан $n_1 - n_2$ тезлик билан айланади. Бунда f_2 частота қуйидагича аниқланади:

$$f_2 = \frac{(n_1 - n_2)p}{60}. \qquad (3\text{-}7)$$

Айланувчи ротор чулғами ЭЮК ининг частотаси f_2 ни тармоқ кучланиш частотаси f_1 билан ифодалаш мумкин. Бунинг

учун юқоридаги формуланинг сурат ва махражини n_1 га кўпайтирамиз:

$$f_2 = \frac{(n_1 - n_2)p \cdot n_1}{60\, n_1} = \frac{n_1 p}{60} \cdot \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} = f_1 \cdot s. \qquad (3\text{-}8)$$

Демак, ротор чулгамида (ёки қисқа туташтирилган симларда) ҳосил бўладиган ЭЮК ва токнинг частотаси двигателнинг сирпаниш қийматига боғлиқ экан. Асинхрон двигатель нагрузка билан ишлаганда роторнинг айланиш тезлиги шу нагрузка қийматига қараб ўзгариб туради. Нагрузка кўп бўлса, ротор секинроқ айланади, двигателнинг сирпаниши эса каттароқ бўлади. Бунда ЭЮК E_{2s} нинг частотаси ҳам катта бўлади. Двигателни юргизишнинг дастлабки моментида $s = 1$ бўлади; бунда ротор ЭЮК ининг частотаси энг катта, яъни $f_2 = f_1 = 50$ Гц бўлади. Роторнинг айланиш частотаси ортиб боргани сари, ротор токининг частотаси камая боради. Двигатель салт ишлаганда $n_2 \approx n_1$ сирпаниш қиймати жуда кичкина бўлади. Бунда ротор токининг частотаси энг кичкина бўлади. Масалан, двигателнинг сирпаниши $s = 5\%$ ва тармоқнинг кучланиш частотаси $f_1 = 50$ Гц бўлса, ротор ЭЮК ининг частотаси:

$$f_2 = f_1 \cdot s = 50 \cdot 0{,}05 = 2{,}5 \text{ Гц бўлади.}$$

Айланувчи ротор чулгамининг ЭЮК E_{2s} ни қўзғалмас ротор чулғамида ҳосил бўладиган ЭЮК E_2 орқали ифодалаш мумкин, яъни:

$$E_{2s} = 4{,}44\, w_2 k_2 f_2 \Phi_m = 4{,}44\, w_2 k_2 f_1 \Phi_m \cdot s = E_2 \cdot s. \qquad (3\text{-}9)$$

Демак, айланувчи ротор чулғамида ҳосил бўладиган ЭЮК қўзғалмас ротор чулғамида ҳосил бўладиган ЭЮК ни сирпанишга кўпайтмасига тенг экан.

Агар ротор чулғамида ток частотаси ўзгарувчан бўлса, шу ток частотасига боғлиқ бўлган ротор параметрлари ҳам ўзгарувчан бўлади. Масалан, ротор чулғамининг индуктив қаршилиги ҳам ўзгарувчан бўлади. Айланувчи роторнинг индуктив қаршилиги қуйидагича ифодаланади:

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_{2s} = 2\pi f_1 \cdot L_2 \cdot s = x_2 \cdot s, \qquad (3\text{-}10)$$

бу ерда: x_2 — қўзғалмас роторнинг индуктив қаршилиги.

Шундай қилиб, двигателни юргизишнинг дастлабки моментида ($n_2 = 0$ ва $s = 1$ бўлганда) ротор чулғамининг ЭЮК ва индуктив қаршилиги энг катта; салт ишлаганда эса энг кичик бўлар экан. Нормал шароитда ишлаб турган двигателда ротор параметрларининг сирпанишга боғлиқ ҳолда ўзгариши асинхрон машинадан кучланиш, ток ёки частотани ўзгартирувчи машина сифатида фойдаланишга имкон беради.

41. Асинхрон двигатель электр юритувчи кучининг тенгламаси

Олдин асинхрон двигатель статор чулғамининг занжири учун ЭЮК тенгламасини аниқлаймиз. Асинхрон двигатель статорига тармоқдан бериладиган кучланиш $\dot{U}_1$ нинг асосий қисми статор чулғамида асосий магнит оқими ҳосил қиладиган ўзиндукция ЭЮК $\dot{E}_1$ билан; қолган қисми эса шу чулғамнинг актив ва реактив қаршиликларидаги кучланиш пасайишлари $\dot{I}_1 R_1$ ва $j\dot{I}_1 x_1$ билан мувозанатлашади. Асосий магнит оқими статор чулғамида ЭЮК $\dot{E}_1$ ни, сочилма оқим эса $\dot{E}_{c1} = -j\dot{I}_1 x_1$ сочилма ЭЮК ни ҳосил қилади. Кирхгофнинг иккинчи қонунига кўра:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{c1} = \dot{I}_1 R_1. \qquad (3\text{-}11)$$

Бундан статор чулғами занжири учун ЭЮК тенгламаси қуйидагича ёзилади:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 R_1. \qquad (3\text{-}12)$$

Статор чулғамининг актив ва реактив қаршиликларидаги кучланиш пасайиши жуда кичкина бўлади. Одатда, $\dot{I}_1 x_1$ кучланиш пасайиши $\dot{I}_1 R_1$ дан каттароқ бўлади.

Двигатель нормал шароитда ишлаганда асосий магнит оқими ротор чулғамида ЭЮК $\dot{E}_2$ ни, роторнинг сочилма оқими эса шу чулғамда сочилма ЭЮК $\dot{E}_{c2} = -j\dot{I}_2 x_2$ ни ҳосил қилади. Двигатель нормал шароитда ишлаганда ротор занжири қисқа туташтирилган. Ротор занжири учун ЭЮК лар йиғиндиси нолга тенг, яъни:

$$\dot{E}_2 s - j\dot{I}_2 x_2 s - \dot{I}_2 R_2 = 0. \qquad (3\text{-}13)$$

Бу тенгламанинг ҳар бир ҳадини s га бўлиб, ротор чулғами занжири учун ЭЮК тенгламасини ҳосил қиламиз:

$$\dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 R_2/s = 0. \qquad (3\text{-}14)$$

42. Асинхрон двигатель магнит юритувчи кучлари ва токларининг тенгламаси

Олдин айтиб ўтилганидек, асинхрон двигателнинг асосий магнит оқими статор ва ротор чулғамларининг МЮК лари (F_1 ва F_2) томонидан биргаликда ҳосил қилинади:

$$\Phi = \frac{F_1 + F_2}{R_м} = \frac{F_0}{R_м}, \qquad (3\text{-}15)$$

бу ерда: $R_м$ — аси... н двигатель магнит занжирининг қаршилиги; F_0 — асинхрон двигателнинг йиғинди МЮК.

Салт ишлаш шароитида статор чулгамининг магнитловчи кучи:

$$F_0 = 0{,}45\, m_1 \kappa_1 \frac{I_0 w_1}{p}. \qquad (3\text{-}16)$$

Нагрузкали двигателнинг статор ва ротор чулғамларининг МЮК лари:

$$F_1 = 0{,}45\, m_1 \kappa_1 \frac{I_1 w_1}{p}, \qquad (3\text{-}17)$$

$$F_2 = 0{,}45\, m_2 \kappa_2 \frac{I_2 w_2}{p}, \qquad (3\text{-}18)$$

бу ерда: m_2 — ротор чулғамининг фазалари сони.

Двигателнинг нагрузкаси ўзгарганда I_2 ва I_1 токларнинг қийматлари ўзгариб туради, чулғамларда бу токлар ҳосил қиладиган МЮК лар ҳам ўзгариб туради. Лекин двигатель турли шароитда ишлаганда асосий магнит оқими тахминан бир хилда қолади, яъни МЮК лар F_1 ва F_2 ўзгарса ҳам F_0 ўзгармайди:

$$\dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \text{const}.$$

Асинхрон двигателнинг магнитловчи кучлар тенгламаси қуйидагича ёзилади:

$$m_1 \kappa_1 w_1 \dot{I}_1 + m_2 \kappa_2 w_2 \dot{I}_2 = m_1 \kappa_1 w_1 \dot{I}_0, \qquad (3\text{-}19)$$

Бу тенгламани $m_1 \kappa_1 w_1$ га бўлиб, двигателнинг токлари учун қуйидаги тенгламани оламиз:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \frac{m_2 \kappa_2 w_2}{m_1 \kappa_1 w_1} \dot{I}_2 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2,$$

бу ерда: $\dot{I}'_2 = \frac{m_2 \kappa_2 w_2}{m_1 \kappa_1 w_1} \dot{I}_2$ — статор чулғамига келтирилган ротор чулғамининг токи. Юқоридаги тенгламадан статор токини аниқлаймиз:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}^1_2). \qquad (3\text{-}20)$$

Демак, асинхрон двигателда статор чулғамининг токи икки қисмдан: магнитловчи ток I_0 ва ротор токининг магнитсизловчи таъсирини йўқотувчи $(-\dot{I}^1_2)$ токдан иборат экан. Асинхрон двигателда статор чулғамининг токи $\dot{I}_1$ унинг ротор чулғамидаги ток $\dot{I}'_2$ нинг ўзгариши билан ўзгариб туради. Двигатель салт ишлаганда $s = 0$ ва $\dot{I}^1_2 = 0$ бўлади. Бу ҳолда $\dot{I}_1 = \dot{I}_0$. Қўзғалмас ротор учун $s = 1$. Бу ҳолда $\dot{E}_2$, s, $\dot{I}^1_2$ ва I_1 токлар ҳам ўзининг энг катта қийматига эришади. Демак, ротор токи $\dot{I}^1_2$ двигателнинг магнит системасини магнитсизлайдиган (трансформаторнинг иккиламчи чулғам токига ўхшаб) таъсир кўрсатар экан.

43. Ротор параметрларини статор чулғами ўрамлари сонига келтириш

Статор ва ротор параметрларини умумий векторлар диаграммасида тасвирлаш мақсадида ротор чулғамининг параметрлари статор чулғами ўрамлари сонига келтирилади. Бунда фазалари сони m_2, чулғам коэффициенти κ_2 айрим фаза чулғамининг ўрамлари сони w_2 бўлган ротор чулғами фазалар сони m_1, чулғам коэффициенти κ_1 ва ўрамлар сони w_1 бўлган чулғам билан, яъни статор чулғами билан алмаштирилади. Бундай алмаштириш ротор занжирининг энергетика балансига таъсир қилмаслиги лозим, яъни ротор занжирининг актив қуввати келтирилган ротор занжирининг актив қувватига тенг бўлиши; катталик векторлари орасидаги силжиш бурчаклари ҳам бир хилда қолиши керак. Ротор параметрларини статор чулғами ўрамлари сонига келтириш қуйидаги формулалар ёрдамида бажарилади. $s = 1$ бўлганда роторнинг статор чулғами ўрамлар сонига келтирилган ЭЮК:

$$\dot{E}_2' = \dot{E}_2\kappa_e = \dot{E}_1,$$

бу ерда: $\kappa_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\kappa_1 w_1}{\kappa_2 w_2}$ — қўзғалмас роторли асинхрон машинада ЭЮК (ёки кучланиш) нинг **т р а н с ф о р м а ц и я к о э ф ф и ц и е н т и.**

Статор чулғами ўрамлар сонига келтирилган ротор токи:

$$I_2^1 = \frac{m_2\kappa_2 w_2}{m_1\kappa_1 w_1} \cdot {}_2\dot{I} = \dot{I}_1 = \frac{\dot{I}_2}{\kappa_l},$$

бу ерда: $\kappa_l = \frac{m_1\kappa_1 w_1}{m_2\kappa_2 w_2} = \frac{m_1}{m_2}\kappa_e$—асинхрон машинада токнинг трансформация коэффициенти.

Асинхрон машинада коэффициентлар κ_e ва κ_l трансформатордагидек бир хил эмас. Чунки, статорда фазалар сони m_1 ва ротор чулғамининг фазалари сони m_2 бир хил бўлмайди (фақат фаза роторли двигателда $m_1 = m_2$).

Ротор чулғамининг келтирилган актив қаршилиги актив қаршиликлар R_2 ва R_2' да исроф бўладиган қувватнинг баробарлиги, яъни $m_2 I_2^2 R_2 = m_1 \dot{I}_2^{12} R_2^1$ шартидан аниқланади.

$$R_2^1 = R_2 \cdot \kappa_e \cdot \kappa_l = R_2\kappa_l.$$

Худди шундай келтирилган индуктив қаршилик

$$x_2^1 = x_2\,\kappa_e\,\kappa_l = x_2\kappa_l,$$

бу ерда: $\kappa = \kappa_e \cdot \kappa_l$ — асинхрон машинада **т р а н с ф о р м а ц и я** ёки **қ а р ш и л и к л а р н и к е л т и р и ш к о э ф ф и ц и е н т и** дейилади.

Қисқа туташтирилган роторли двигателда коэффициентлар κ_e ва κ_l ни аниқлашда $w_2 = 0{,}5$; $\kappa_2 = 1$ ва $m_2 = z_2$ деб олинади. Бу

ерда: z_2 — ротор пазлари ёки стерженлари сони. Бундай чулғамда айрим фазалар бурчак $\alpha = \frac{2\pi p}{z_2}$ ка сурилган бўлади; лекин доим $p_2 = p_1$.

44. Асинхрон двигателнинг вектор диаграммаси

Нормал шароитда ишлаб турган асинхрон двигатель учун вектор диаграмма қуришда ротор чулғамининг параметрлари статор чулғамига келтирилади. Асинхрон двигателнинг бир фазаси учун қурилган вектор диаграмма нагрузка уланган трансформаторнинг вектор диаграммасига ўхшаш. Вектор диаграмма асинхрон двигателнинг статор ва ротор чулғамлари ЭЮК лари ва токларининг асосий тенгламалари асосида қурилади. Ротор занжири учун ЭЮК лар тенгламасини келтирилган қийматларда ёзамиз. Асинхрон двигателнинг асосий тенгламалари:

$$\left.\begin{aligned} \dot U_1 &= (-\dot E_1) + j\dot I_1 x_1 + \dot I_1 R_1, \\ 0 &= \dot E_2^1 - j\dot I_2^1 x_2^1 - \dot I_2^1 R_2^1/s, \\ \dot I_1 &= \dot I_0 + (-\dot I_2^1). \end{aligned}\right\} \tag{3-21}$$

Нормал шароитда ишлаб турган асинхрон двигателда сирпаниш қиймати кичкина бўлади. Шунинг учун R_2^1/s нинг қиймати R_2^1 га нисбатан анча катта. R_2^1/s нинг қанчалик катта бўлишини аниқлаш учун R_2^1/s дан $\left(R_2^1 \frac{s}{s}\right)$ ни айирамиз ва R_2^1 ни қўшамиз:

$$\frac{R_2^1}{s} = \frac{R_2^1}{s} - R_2^1 \frac{s}{s} + R_2^1 = R_2^1 + R_2^1\left(\frac{1-s}{s}\right) = R_2^1 + R_к. \tag{3-22}$$

Демак, $\frac{R_2^1}{s}$ қаршилиги икки қисмдан, яъни R_2^1 қаршилик ҳамда қўшимча қаршилик $R_к$ дан иборат бўлар экан. Бунда ротор занжири учун ЭЮК лар тенгламасини бошқача ёзиш мумкин, яъни:

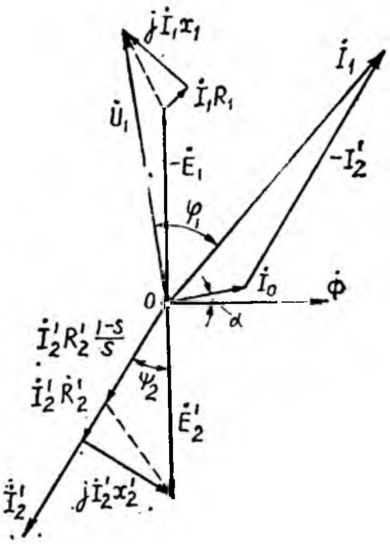
$$0 = \dot E_2^1 - j\dot I_2^1 x_2^1 - \dot I_2^1 R_2^1 - \dot I_2^1 R_2^1\left(\frac{1-s}{s}\right). \tag{3-23}$$

Энди айланувчи роторли ва нагрузка уланган асинхрон двигатель учун вектор диаграмма қурамиз. Магнит оқими $\dot\Phi$ нинг векторини горизонтал йўналишда чизамиз. Салт ишлаш токи $\dot I_0$ нинг вектори $\dot\Phi$ дан α бурчакка олдинда чизилади. ЭЮК лар $\dot E_1$ ва $\dot E_2$ векторлари Φ дан 90° орқада қолади (95-расм). Ротор токининг қиймати (3-25) ифодасидан аниқланади. Ротор чулғами R_2^1 ва x^1 қаршиликларга эга, шунинг учун ротор токи $(\dot I_2^1)$ $\dot E_2$ ЭЮК векторларидан ψ_2 бурчакка орқада қоладиган қилиб чизи-

лади. Бу бурчакнинг қиймати қуйидагича аниқланади:

$$\psi_2 = \operatorname{arc\,tg} \frac{x_2^1 s}{R_2^1}.$$

Ротор чулғамининг актив қаршилигидаги кучланиш пасайиши векторлари $\dot{I}_2^1 R_2^1$ ва $\dot{I}_2^1 R_2^1\left(\frac{1-s}{s}\right)$ ротор токи $\dot{I}_2'$ вектор йўналишида; индуктив қаршилигидаги кучланиш пасайиши вектори $j\dot{I}_2^1 x_2$ $\dot{I}_2'$ вектордан 90° олдинда қилиб чизилади. Ротор занжири қисқа туташган занжир бўлганлиги учун бу векторларнинг йиғиндиси $\dot{E}_2^1$ векторга тенг бўлади.



95- расм.

Диаграммада статор токи $\dot{I}_1$ векторини топиш учун $\dot{I}_0$ га $(-\dot{I}_2^1)$ векторни қўшамиз. Тармоқдан статор чулғамига бериладиган $\dot{U}_1$ кучланиш векторни аниқлаш учун статор чулғами учун ёзилган тенгламага қараймиз. $(-\dot{E}_1)$ вектор $\dot{E}_1$ векторга тескари қилиб чизилади. $-\dot{E}_1$ векторга статорнинг актив ва реактив қаршиликларидаги кучланишлар пасайиши векторларини қўшамиз, яъни $\dot{I}_1R_1$ вектор $\dot{I}_1$ ток йўналишида; $j\dot{I}_1x_1$ вектор $\dot{I}_1$ вектордан 90° олдинда келадиган қилиб чизилади. Энди $\dot{I}_1x_1$ вектор учини O нуқта билан бирлаштириб, тармоқ кучланиши вектори $\dot{U}_1$ ни аниқлаймиз.

Асинхрон двигателнинг вектор диаграммаси (95- расм) иккиламчи чулғам кучланиши $\overline{OK} = \dot{I}_2 R_2^1\left(\frac{1-s}{s}\right)$ га тенг бўлган трансформатор учун қурилган вектор диаграммага ўхшайди. $\overline{OK}$ кучланиш гўё қаршилиги $R_2^1\left(\frac{1-s}{s}\right)$ га тенг бўлган нагрузкага берилган. Асинхрон двигателнинг вектор диаграммаси иккиламчи чулғам қисмаларига $R_2^1\left(\frac{1-s}{s}\right)$ га ўзгарувчан қаршилик уланган трансформаторнинг вектор диаграммасига ўхшайди. Демак, асинхрон двигатель электр жиҳатдан қаршилиги $R_2^1\left(\frac{1-s}{s}\right)$ бўлган актив нагрузка билан ишлайдиган трансформатордир. Бун-

дай трансформаторнинг иккиламчи чулғами қисмаларидан олинадиган қувват:

$$P_2^1 = m_1 (I_2^1)^2 R_2^1 \left(\frac{1-s}{s}\right). \qquad (3\text{-}24)$$

Бу қувват асинхрон двигателнинг **тўла механик қуввати** дейилади.

Асинхрон двигатель нагрузка билан ишлаганда статор ва ротор чулғамларида ҳосил бўладиган ЭЮК ва токларнинг частотаси ҳар хил бўлади. Одатда, вектор диаграмма бир хил частотали синусоидал катталиклар учун қурилади. Юқорида келтирилган вектор диаграммани қуришда ротор частотаси тармоқ токи частотасига келтирилиб қурилади. Асинхрон двигатель учун иккита вектор диаграмма, яъни статор занжири учун алоҳида, ротор занжири учун алоҳида диаграмма қурса ҳам бўлади. Бунда ротор занжирининг параметрлари статор чулғами ўрамлари сонига келтирилмайди.

45. Асинхрон двигателнинг эквивалент электр схемаси

Асинхрон двигателнинг ишлашини анализ қилишда унинг ўрнини боса оладиган, яъни двигателга эквивалент бўлган электр схемадан фойдаланилади. Двигателнинг эквивалент электр схемаси унинг асосий тенгламалари асосида тузилади. Эквивалент электр схема бир-бирига электромагнит воситасида боғланган статор ва ротор занжирлари параметрларининг электр қаршиликлари воситасида кўрсатилади.

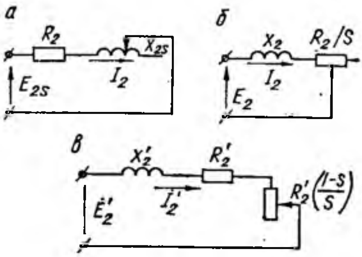
Эквивалент электр схема бўйича асинхрон двигателнинг токини, ундаги қувват исрофини, кучланиш пасайишини аниқлаш мумкин. Ротор занжири учун алоҳида эквивалент схема тузиш мумкин. Илгари айтиб ўтилганидек, айланувчи ротор чулғамидаги токнинг таъсир этувчи кучи ва унинг частотаси роторнинг айланиш частотасига боғлиқ.

Ротор занжири учун тузилган эквивалент схемадан (96-расм, *а*) ротор токи: $I_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{z_2} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + x_{2s}^2}}$. Ротор айланиб турганда E_{2s} ва унинг частотаси ҳамда индуктив қаршилиги x_{2s} двигатель сирпанишига тўғри пропорционал, яъни $E_{2s} = E_2 \cdot s$; $x_{2s} = x_2 \cdot s$. Унда:

$$I_2 = \frac{E_2 \cdot s}{\sqrt{R_2^2 + (x_2 \cdot s)^2}} \quad \text{ёки} \quad I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R^2}{s}\right)^2 + x_2^2}}.$$

Охирги формулага 96-расм, *б* да келтирилган эквивалент схема тўғри келади. Бу схемада E_2 ва x_2 лар ўзгармас, R_2 қаршилик эса двигатель сирпанишига мос ҳолда ўзгариб туради. 96-расм, *в* да келтирилган ротор занжирининг эквивалент схе-

масида ротор занжирининг актив қаршилиги икки қисмдан, яъни R'_2 ва $R'_2\left(\frac{1-s}{s}\right)$ лардан иборат. R^1_2 қаршиликнинг қиймати двигателнинг ишлаш шароитига боғлиқ эмас. Қаршилик $R^1_2\left(\frac{1-s}{s}\right)$ двигателнинг ишлаш шароитига, яъни унинг сирпанишига боғлиқ.



96-расм. Ротор занжирининг эквивалент электр схемаси.

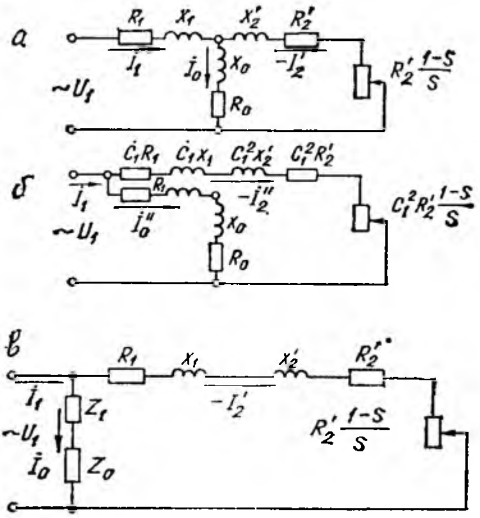
Асинхрон двигателнинг ЭЮК лари ва токлари тенгламасига ва вектор диаграммасига мос келадиган электр схемаси унинг эквивалент электр схемаси дейилади. Асинхрон двигателнинг эквивалент схемаси учта асосий қисмдан тузилади:

а) қаршилиги R_1, x_1 ва токи $\dot{I}_1$ бўлган статор занжири қисми;

б) қаршиликлари R_0, x_0 ва токи $\dot{I}_0$ бўлган магнитловчи қисм;

в) қаршиликлари R'_2, x'_2, $R'_2\left(\frac{1 \quad s}{s}\right)$ ва токи $(-\dot{I}'_2)$ бўлган ротор чулгами қисмидан.

97-расм, *а* да асинхрон двигателнинг Т симон эквивалент электр схемаси келтирилган. Бу схемада фақат $R'_2\left(\frac{1-s}{s}\right)$ қаршилик ўзгарувчан параметр ҳисобланади. Бу қаршилик қийматининг ўзгариши двигатель валидаги механик нагрузка қийматининг ўзгаришига боғлиқ. Чунки нагрузка қиймати ўзгарса, двигатель сирпанишининг қиймати ҳам ўзгаради. Масалан, двигатель валидаги нагрузка моменти $M_2 = 0$ бўлса, сирпаниш ҳам $s = 0$ бўлади. Бу ҳолда $R'_2\left(\frac{1-s}{s}\right) = \infty$ бўлади ва бу двигателнинг салт ишлаш шароитига мос келади. Агар двигатель валидаги нагрузка моменти уни айлантирувчи моментдан катта бўлса, ротор айланмай қолади, сирпаниш $s = 1$ бўла-



97-расм. Асинхрон двигателнинг Т симон (*а*) ва Г симон (*б*) эквивалент электр схемаси.

ди ва бу двигателнинг қисқа туташиш шароитида ишлашига мос келади.

Асинхрон двигателнинг эквивалент схемасини соддалаштириш ва шу асосда ҳисоблашни осонлаштириш мумкин. Шу мақсадда магнитловчи қисм қаршиликлари R_0 ва x_0 ни тармоқ қисмларига кўчирамиз. Магнитловчи ток қиймати ўзгармас бўлгани учун қаршиликлар R_1 ва x_1 га қаршиликлар R_0 ва x_0 ни кетма-кет улаш лозим бўлади ва асинхрон двигателнинг Г симон эквивалент электр схемасини оламиз (97-расм, *б*). Аслида қаршиликлар озгина ўзгаради. Бу ўзгаришни қандайдир коэффициент киритиш билан эътиборга олинади. Математик ҳисоблашларни келтирмасдан Г симон схема учун қуйидагиларни ёзиш мумкин:

$$\dot{I}_1'' = \dot{I}_0'' + (-\dot{I}_2''); \quad \dot{I}_2'' = \dot{I}_2'/C_1,$$

бу ерда: I_2' ва I_2'' — Т симон ва Г симон эквивалент схеманинг иш контури токлари.

Юқорида келтирилган схемадаги $C_1 = I + (R_1 + jx_1)(R_0 + jx_0)$ комплексини унинг модули билан алмаштириш мумкин. Қуввати 10 кВт ва ундан катта бўлган асинхрон двигателлар учун $C_1 = 1{,}02 \ldots 1{,}05$ га тенг. Кенг қўлланадиган двигателларда бўладиган электромагнит процессларни анализ қилишда, кўпинча $C_1 = 1$ олинади. Бунда ҳисоблаш осонлашади ва хато катта бўлмайди. Шунинг учун $C_1 = 1$ бўлганда асинхрон двигателнинг Г симон эквивалент электр схемасини **магнитловчи контури тармоқ кучланиши қисмларига кўчирилган соддалаштирилган эквивалент схема** дейилади (97-расм *в*).

Бу схемадаги $\dot{I}_0''$ токни $\dot{I}_0$ токка тенг деб олиш мумкин.

Г симон эквивалент схемада статор ва ротор контурлари қаршиликлари кетма-кет уланган бўлади ва иш контурини ташкил қилади; иш контурига магнитловчи контур параллел уланади. Иш контури токининг қиймати қуйидагича аниқланади:

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{E}_2'}{\sqrt{\left[R_1 + R_2' + R_2'\left(\frac{1-s}{s}\right)\right]^2 + (x_1 + x_2')^2}}.$$

Агар $\dot{E}_2' = \dot{E}_1 \approx \dot{U}_1$ бўлса:

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2}} \qquad (3\text{-}25)$$

бўлади.

Асинхрон двигателнинг эквивалент схемасида магнитловчи занжирнинг тармоққа уланиши (R_1 ва x_1 қаршиликлар билан бирга) натижасида двигателнинг баъзи параметрлари аниқ бўлмай қолади, яъни бунда маълум хатоликка йўл қуйилади, лекин бу хатоликни эътиборга олмаса ҳам бўлади.

VIII БОБ. АСИНХРОН ДВИГАТЕЛНИНГ ЭЛЕКТРОМАГНИТ МОМЕНТИ ВА ИШ ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИ

46. Асинхрон двигателда қувват исрофи. Двигателнинг фойдали иш коэффициенти

Асинхрон двигатель тармоқдан электр энергияси олади ва уни механик энергияга айлантириб беради. Электр энергияни механик энергияга айлантиришда двигателда маълум энергия исроф бўлади. Двигателда исроф бўладиган энергия асосан электрик, магнит ва механик исрофлардан иборат бўлади. Асинхрон двигатель тармоқдан

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 \qquad (3\text{-}26)$$

қувватни олади. Бу қувватнинг бир қисми статорнинг темир ўзаги магнитланганда, магнит исроф сифатида ($\Delta p_{п1}$) ҳамда статор чулғамларидан ток ўтганда электрик исроф ($\Delta p_{э1}$) сифатида йўқолади. Статор чулғамларида электрик исроф:

$$\Delta p_{э1} = m_1 I_1^2 R_1 \qquad (3\text{-}27)$$

билан аниқланади.

Тармоқдан олинган қувватнинг қолган қисми магнит майдони воситасида роторга узатилади ва бу қувват **электромагнит қувват** ($P_э$) дейилади. Электромагнит қувват қуйидагича аниқланади:

$$P_{эм} = P_1 - (\Delta p_{п1} + p_{э1}). \qquad (3\text{-}28)$$

Электромагнит қувватнинг бир қисми ротор чулғамида электр исроф учун сарфланади, яъни ротор чулғамидан ток ўтганда у қизийди. Бунда электромагнит қувватнинг бир қисми иссиқликка айланади. Ротордаги электрик исроф қуйидагича аниқланади:

$$\Delta p_{э2} = m_2 I_2^2 R_2 = m_1 I_2'^2 R_2'. \qquad (3\text{-}29)$$

Двигатель нормал шароитда ишлаганда магнитланиш частотаси кичкина бўлади. Шунинг учун ротор ўзагининг магнитланиши учун сарфланадиган магнит исроф ҳам жуда озгина бўлади, кўпинча, у эътиборга олинмайди. Электромагнит қувватнинг қолган қисми двигателда механик қувватга айланади. Қувватнинг бу қисми двигателнинг **тўла механик** қуввати (P_2^1) дейилади ва қуйидагича аниқланади:

$$P_2' = P_э - \Delta p_{э2}. \qquad (3\text{-}30)$$

(3-24) ифодани эътиборга олиб, тўла механик қувватнинг формуласини қуйидагича ёзамиз:

$$P_2' = m_1 I_2'^2 \cdot R_2' \left(\frac{1-s}{s}\right) = \Delta p_{э2}\left(\frac{1-s}{s}\right). \qquad (3\text{-}31)$$

Бу ифодадаги P'_2 нинг қийматини (3-30) га қўямиз:

$$\Delta p_{э2}\left(\frac{1-s}{s}\right)=P_э-\Delta p_{э2}. \qquad (3\text{-}32)$$

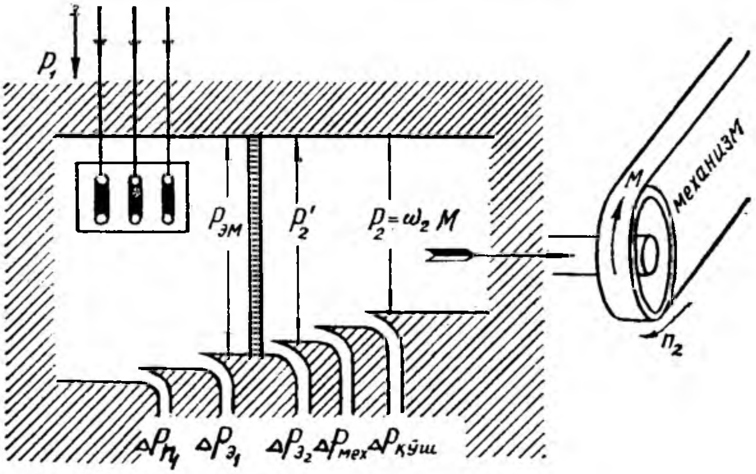
Бу ифодадан $\Delta p_{э2}$ ни аниқлаймиз: $\Delta p_{э2}=P_э\cdot s$.

Демак, ротор чулғамида иссиқликка айланадиган қувват, яъни ротордаги электр исрофи, двигателнинг сирпанишига тўғри пропорционал экан. Агар сирпаниш кичкина бўлса, роторда электр исроф ҳам озроқ; агар сирпаниш қиймати катта бўлса, электромагнит қувватнинг кўпроқ қисми роторда исроф бўлар экан. Шунинг учун ҳам сирпаниш қиймати қанча кичкина бўлса, асинхрон двигатель шунча тежамли ишлайди. Двигатель ишлаганда подшипникларнинг ишқаланиши ва айланадиган қисмининг ҳавода ишқаланиши натижасида ҳам маълум қувват исроф бўлади. Бундан ташқари, сочилма магнит оқимлари ҳамда статор ва ротор пўлат ўзагининг тишларида ва яхлит темир қисмларида магнит майдонининг ўзгариб туриши натижасида ва бошқа сабаблар натижасида қўшимча қувват исроф бўлади.

Асинхрон двигателнинг тўла механик қувватидан механик исроф ($\Delta p_{мех}$) ни ва қўшимча исроф ($\Delta p_{қўш}$) ни айирсак, двигатель вали орқали механизмга узатиладиган фойдали қувватни топамиз. Бу қvвват двигатель валидаги қувват ёки фойдали ишга сарфланадиган механик қувват дейилади ва P_2 билан белгиланади:

$$P_2=P'_2-(\Delta p_{мех}+\Delta p_{қўш}).$$

Фойдали ишга сарфланадиган қувватни бошқача усулда аниқлаш ҳам мумкин. Бунинг учун двигателда бўладиган йиғинди



98-расм. Асинхрон двигателнинг энергетик диаграммаси.

қувват исрофини аниқлаш лозим бўлади. Сўнгра тармоқдан двигателнинг статорига бериладиган қувват P_1 дан йиғинди қувват исрофини айириш лозим бўлади, яъни:

$$P_2 = P_1 - \sum \Delta p, \tag{3-33}$$

бунда:

$$\sum \Delta p = \Delta p_{п1} + \Delta p_{э1} + \Delta p_{э2} + \Delta p_{мех} + \Delta p_{қўш}, \tag{3-34}$$

бу ерда: $\sum \Delta p$ — двигателда исроф бўладиган қувватлар йиғиндиси.

Юқоридаги мулоҳазалар асосида асинхрон двигателнинг энергетик диаграммасини қуриш мумкин (98-расм). Асинхрон двигателнинг фойдали иш коэффициенти қуйидагича аниқланади:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum \Delta p}{P_1}. \tag{3-35}$$

Ҳозирги замон асинхрон двигателларининг номинал фойдали иш коэффициенти 83 ... 95% гача боради. Одатда, двигателнинг қуввати қанча катта бўлса, унинг фойдали иш коэффициенти шунча катта бўлади.

47. Асинхрон двигателнинг электромагнит моменти

Механизмни ҳаракатлантирувчи ҳар қандай двигателнинг, шу жумладан, асинхрон двигателнинг ҳам ишлашига баҳо берилаётганда унинг механик хусусиятлари ҳисобга олиниши лозим. Турли механизмларга двигатель танлашда ҳам уларнинг механик хусусиятларига эътибор берилади. Лозим бўлган айлантирувчи моментни ҳосил қилиб бериш қобилияти, нагрузка моменти ўзгарса ҳам айланиш тезлигининг ўзгармаслиги; айланиш тезлигини ўзгартириш мумкинлиги двигателнинг муҳим механик хусусиятлари ҳисобланади.

Асинхрон двигателнинг роторига таъсир этадиган айлантирувчи момент ротор чулгамидан ўтувчи ток (ротор токи) билан асосий магнит оқимининг ўзаро таъсири натижасида ҳосил бўлади. Двигателнинг электромагнит моменти (ёки айлантирувчи моменти) унинг электромагнит қуввати орқали қуйидагича ифодаланади:

$$M = \frac{P_э}{\omega_{1м}}, \tag{3-36}$$

бунда: $\omega_{1м} = \frac{2\pi n_1}{60}$ — айланма магнит майдонининг бурчак тезлиги;

n_1 — синхрон тезлик.

Агар синхрон тезлик: $n_1 = \frac{60 f_1}{p}$ бўлса, у ҳолда:

$$\omega_{1м} = \frac{2\pi f_1 60}{60 p} = \frac{\omega_{1э}}{p} = \frac{2\pi f}{p}. \tag{3-37}$$

Айлантирувчи момент формуласини чиқариш учун қуйидагиларни қайта ёзамиз:

$$\Delta p_{э2} = P_э \cdot s; \quad P_э = \frac{m_1 I_2'^2 R_2'}{s}.$$

У ҳолда двигателнинг айлантирувчи моменти:

$$M = \frac{P_э}{\omega_{1м}} = \frac{m_1 I_2'^2 R_2'}{\omega_{1м} \cdot s}. \qquad (3\text{-}38)$$

Айлантирувчи момент Нм ёки кГм да ўлчанади. Демак, сирпаниш ўзгармас бўлганда двигателда ҳосил бўладиган айлантирувчи моментнинг қиймати ротор занжиридаги қувват исрофига тўғри пропорционал экан. Момент формуласига (3-37) ифодани қўйиб:

$$M = \frac{m_1 I_2'^2 R_2' p}{2\pi f_1 \cdot s} \qquad (3\text{-}39)$$

ни оламиз. Энди бу формуладаги I_2' ўрнига унинг (3-25) да келтирилган қийматини қўямиз:

$$M = \frac{m_1 p U_1^2 R_2'/s}{2\pi f_1[(R_1 + R_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2]}, \qquad (3\text{-}40)$$

бу ерда: U_1 — статор чулғамининг фаза кучланиши.

Демак, асинхрон двигателнинг айлантирувчи моменти статор чулғамига бериладиган тармоқ кучланишининг квадратига тўғри пропорционал (яъни, $M \equiv U_1^2$), шунинг учун ҳам двигателнинг айлантирувчи моменти тармоқ кучланишининг ўзгариши билан ўзгариб туради.

Айлантирувчи моментнинг формуласини бошқача ёзиш ҳам мумкин. Бунинг учун вектор диаграмманинг ротор чулғамига тегишли қисмидан фойдаланамиз (95-расмга қаранг). Вектор диаграммадан:

$$\dot{I}_2' \cdot R_2'/s = \dot{E}_2' \cos\psi_2. \qquad (3\text{-}41)$$

Бу ифодани (3-38) га қўямиз:

$$M = \frac{m_1 \dot{I}_2' \cdot \dot{E}_2 \cos\psi_2}{\omega_{1м}}.$$

Агар $\dot{E}_2' = \dot{E}_1$ бўлишини эътиборга олсак ва $\dot{E}_1$ ўрнига $\dot{E}_1 = 4{,}44\, w_1 f_1 \kappa_1 \Phi_m$ ни қўйсак:

$$M = \frac{m_1 p I_2' \cdot 4.44 w_1 \kappa_1 f_1}{\omega_{1э}} \cdot \Phi_m \cos\psi_2$$

ни оламиз.

Бу формулада m_1, κ_1, f_1, w_1 ва $\omega_{1э}$ ўзгармас катталиклардир. Уларни маълум бир коэффициент билан, масалан C билан ифодаласак:

$$C_м = \frac{4{,}44 m_1 \kappa_1 p}{\omega_{1э}} f_1 w_1 = \text{const},$$

у ҳолда:

$$M = C_м I_2' \Phi_m \cos\psi_2. \qquad (3\text{-}42)$$

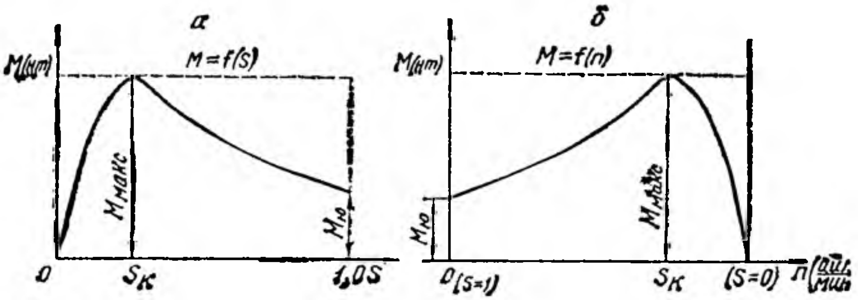
Демак, асинхрон двигателнинг электромагнит моменти магнит оқимини ротор токининг актив ташкил этувчиси $I_2' \cos\psi_2$ га кўпайтмасига тўғри пропорционал экан. Бу формула фақат асинхрон двигателлар учун эмас, балки бошқа ҳар қандай двигателлар учун ҳам тўғридир. Бу формула айлантирувчи моментни двигателда бўладиган физик ҳодисалар билан боғлашга имкон беради.

48. Асинхрон двигателнинг механик характеристикаси

Асинхрон двигатель айлантирувчи моментининг формуласи (3-40) да фақат двигателнинг сирпаниши s ўзгарувчан катталикдир. Асинхрон двигатель учун айлартирувчи моментнинг сирпаниш билан боғлиқлиги, яъни $M = f(s)$ муҳим аҳамиятга эгадир. Бу боғланиш двигателнинг механик характеристикаси дейилади. Двигателнинг механик характеристикаси унинг нормал ишлаш чегараларини аниқловчи асосий характеристикадир. Двигателнинг механик характеристикаси $U_1 = \text{const}$, $f = \text{const}$ ва $R_к = \text{const}$ бўлган шароитда олинади. Двигателнинг механик характеристикасини аниқлаш учун турли шароитда (салт ишлашдан то номинал нагрузка билан ишлагунча) сирпаниш қийматини (3-38) формулага қўйиб, унинг айлантирувчи моментининг қиймати ҳисоблаб чиқилади ва маълум масштабда характеристика қурилади. Бунда формуладаги R_1, R_2', x_1, x_2' ларнинг қиймати каталогдан олинади; двигатель уланадиган тармоқнинг кучланиши U_1 ва частотаси f_1 маълум. Механик характеристика айлантирувчи моментнинг двигателнинг айланиш частотаси орқали боғланиши, яъни $M = f(n)$ билан ҳам берилиши мумкин. Двигателнинг механик характеристикаси, яъни $M = f(s)$ ва $M = f(n)$ боғланишлар 109-расмда кўрсатилган. Двигателни юргизишнинг бошланғич пайтида: $n_2 = 0$ ва $s = 1$ бўлади. Бу вақтда двигателда ҳосил бўлган айлантирувчи момент юргизиш моменти дейилади. Агар (3-40) формулага $s = 1$ ни қўйсак, юргизиш моментининг қийматини аниқлаш мумкин бўлади:

$$M_ю = \frac{m_1 p U_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]}. \qquad (3\text{-}43)$$

Ҳар бир механизм двигателнинг айлантирувчи моментига тескари таъсир қилувчи, яъни тормозловчи момент ҳосил қилади.



99- расм.

Бу механизмнинг **статик моменти** ($M_{ст}$) дейилади. Статик момент қуйидагича аниқланади:

$$M_{ст} = M_0 + M_2,$$

бу ерда: M_0 — двигатель ва механизмнинг ишқаланиш, яъни салт ишлаш моменти; M_2 — нагрузка билан ишлаш моменти.

Двигателнинг юргизиш моменти статик моментдан катта бўлса, ротор айлана бошлайди ва айлантирувчи момент статик моментга тенглашгунча роторнинг айланиш частотаси орта боради. $M = M_{ст}$ бўлганда двигатель бир хил тезлик билан турғун ишлай бошлайди. Двигатель роторининг тезлиги ортгани сари унинг сирпаниши камая боради. Сирпаниш камайган сари айлантирувчи момент катталашади. Сирпаниш бирор қийматгача камайганда двигателнинг айлантирувчи моменти максимал қийматга ($M_{макс}$) эришади (99- расм). Сирпанишнинг бу қиймати **критик сирпаниш** дейилади ва $s_к$ билан белгиланади. Сирпаниш янада камайганда двигателнинг айлантирувчи моменти (M) ҳам камая бошлайди. Двигатель салт ишлаганда унинг айлантирувчи моменти M_0 гача, нагрузка билан ишлаганда $M_{ст}$ гача камаяди. Моментлар тенглашганда двигатель бир хил тезликда ишлай бошлайди. Агар двигатель номинал нагрузка билан ишласа, унинг сирпаниши ҳам номинал қийматга эришади. Механик характеристикадан маълумки, агар $s \simeq 0$ бўлса, двигателнинг айлантирувчи моменти ҳам нолга тенг бўлади.

Айлантирувчи моментнинг максимал қийматини аниқлаш учун олдин критик сирпаниш қийматини аниқлаш лозим. Бунинг учун айлантирувчи моментнинг сирпаниш бўйича унинг биринчи ҳосиласи олинади ва нолга тенглаштирилади, яъни:

$$\frac{dM}{ds} = 0.$$

Айлантирувчи момент ўрнига (3-40) даги ифодани қўйиб, дифференциалланади ва $s_к$ қуйидагича аниқланади:

$$s_к = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}.$$

Бу формуладаги (±) ишора машинанинг двигатель ёки генератор сифатида ишлашига тегишли. Машина генератор бўлиб ишлаганда унинг сирпаниши манфий; двигатель ёки электромагнит тормоз бўлиб ишлаганда сирпаниши мусбат бўлади. Критик сирпаниш қийматини (3-40) га қўйиб, айлантирувчи моментнинг максимал қиймати аниқланади:

$$M_{max} = \pm \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]}. \qquad (3\text{-}45)$$

(3-44) ва (3-45) ифодалардаги статор чулғами актив қаршилигининг қиймати нормал машиналарда $(x_1 + x_2')$ нинг жуда оз қисмини ташкил қилади (тахминан 10 ... 12%). Шунинг учун, критик сирпанишни ҳисоблашда R_1 эътиборга олинмаса ҳам бўлади. У ҳолда (3-44) ва (3-45) формулалари янада соддалашади:

$$s_к = \pm \frac{R_2'}{x_1 + x_2'}, \qquad (3\text{-}46)$$

$$M_{max} = \frac{m_1 p_1 U^2}{4\pi f\,(R_1 + x_1 + x_2')}. \qquad (3\text{-}47)$$

Демак, асинхрон двигателда критик сирпаниш ротор чулғамининг актив қаршилигига тўғри пропорционал экан Қисқа туташтирилган асинхрон двигателларда критик сирпанишнинг қиймати 12 ... 20% ни, катта қувватли двигателларда 4—5% ни ташкил қилади.

Юқоридаги формула айлантирувчи моментнинг максимал қиймати ротор чулғамининг актив қаршилиги (R_2') га боғлиқ эмаслигини кўрсатади. $\frac{R_2'}{x_1 + x_2'}$ нисбат қанча катта бўлса, моментнинг максимал қиймати шунча катта сирпанишда ҳосил бўлади. Моментнинг максимал қиймати маълум частотада қаршиликлар x_1 ва x_2' йиғиндисига деярли тескари пропорционал бўлади.

Асинхрон двигателнинг юргизиш моменти ҳам амалий аҳамиятга эга, лекин асинхрон двигателларнинг юргизиш моменти унча катта бўлмайди. Қисқа туташтирилган роторли двигателларда $\frac{M_ю}{M_н} = 0{,}7 \ldots 1{,}8$ га тенг бўлади. Баъзан юргизиш вақтида двигателнинг юргизиш моменти катта бўлиши талаб қилинади Маълум шароитда (фаза роторли двигателларда) юргизиш моменти айлантирувчи моментнинг максимал қийматига тенг бўлиши ҳам мумкин. Юргизишнинг бошланғич пайтида $s=1$ бўлади. Лекин юргизиш моменти максимал моментга тенг бўлиши учун $s_к = \frac{R_2'}{x_1 + x_2'} = 1$ бўлиши лозим. Демак, бу шароитда $R_2' = x_1 + x_2'$ бўлар экан.

Демак, асинхрон двигателнинг юргизиш моменти фақат ротор чулғамининг актив қаршилиги машинанинг тўла индуктив қаршилигига тенг бўлганида максимал қийматига эришар экан. Двигателнинг тўла индуктив қаршилиги қанча катта бўлса, унинг юргизиш моменти шунча кичкина бўлади.

Фаза роторли асинхрон двигателда ротор чулғамининг актив қаршилиги икки қисмдан: ротор чулғамининг қаршилиги R_2' ва юргизиш реостатининг қаршилиги $R_ю'$ дан иборат бўлади. Одатда, юргизиш реостатининг қаршилиги ротор чулғами қаршилигидан 8 . . . 10 марта катта қилиб олинади (бу ерда гап чулғам ва реостат айрим фазасининг қаршилиги тўғрисида бораётир).

Энди асинхрон двигателнинг турғун ишлашини кўриб чиқамиз Агар тармоқ кучланиши ўзгармас бўлса, роторнинг айланиш частотаси нагрузкага боғлиқ бўлади. Нагрузка қиймати ўзгарса, роторнинг айланиш тезлиги ўзгаради. Умуман, роторга таъсир этувчи моментлар тенгламаси қуйидагича ёзилади:

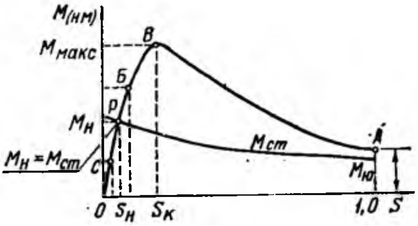
$$M - M_{ст} = J\frac{d\omega}{dt} = M_{орт} = M_д,$$

бу ерда: M — двигателнинг айлантирувчи моменти; $M_д = J\frac{d\omega}{dt}$ — (ортиқча момент) динамик момент; J — инерция моменти; $\frac{d\omega}{dt}$ — бурчак тезланиш.

Ортиқча моментни динамик момент ёки инерция кучларининг моменти дейилади. Динамик момент мусбат ёки манфий бўлиши мумкин. Бу момент двигателнинг айлантирувчи моменти ёки у ҳаракатга келтираётган нагрузка уланган механизм моментларининг ўзгаришидан ҳосил бўлади. Агар $\frac{d\omega}{dt} = 0$ бўлса, $M_д = 0$ ёки $M - M_{ст} = 0$ бўлади. Бу ҳолда двигатель бир хил тезлик билан ишлай бошлайди ва айлантирувчи момент статик момент билан мувозанатлашади, яъни $M = M_{ст}$ бўлади. Бирор сабаб билан M ёки $M_{ст}$ ўзгарса, двигателнинг айланиш тезлиги ўзгаради. Баъзи вақтда двигателнинг айланиш тезлиги ўзгарса ҳам моментларнинг мувозанати ўз-ўзидан қайта тикланаверади. Демак, бу ҳолда двигатель турғун ишлайди баъзи вақтда айланиш тезлигининг ўзгариши билан моментларнинг мувозанати бутунлай бузилади, уларнинг мувозанати тикланмайди ва натижада двигатель тўхтайди. Шу нуқтаи назардан двигателнинг механик характеристикаси икки қисмга бўлинади:

а) характеристиканинг $s = 0$ дан $s = s_к$ гача бўлган қисми, (100-расм, OB қисми) двигателнинг турғун ишлайдиган (иш) қисми дейилади;

б) характеристиканинг $s = s_к$ дан $s = 1$ гача бўлган қисми, (100-расм, BA қисми) двигателнинг турғун ишлай олмайдиган қисми дейилади. Характеристиканинг бу қисмида сирпаниш ортган сари двигателнинг айлантирувчи моменти камая боради.



100- расм.

Двигателнинг турғун ишлаши. Одатда, бирор системанинг масалан, двигатель ва у ҳаракатга келгираётган механизмнинг бир меъёрда ишлаши бирор куч таъсирида бузилганда, система ўз-ўзидан аввалги ишлаш ҳолатига қайтишга интилса ва натижада аввалгидек ишлай бошласа, бундай система *турғун ишлайдиган система* дейилади. Масалан, двигатель номинал момент ва номинал сирпаниш билан ишлаб турган бўлсин. Маълумки, двигатель валидаги нагрузка қиймати ўзгариши билан унинг айлантирувчи моменти ҳам ўзгаради. Масалан, номинал шароитда ишлаб турган двигателда нагрузка моменти (M_2) кўпайса, моментларнинг мувозанати бузилади, яъни $M_н$ ва $M_{ст}$ тенг бўлмай қолади:

$$M_н < M_0 + M_2 = M_{ст}.$$

Бунда двигателнинг тезлиги камая бошлайди ва сирпаниши ортади. Бу двигатель электромагнит моментининг кўпайишига олиб келади. Электромагнит момент статик момент билан тенглашгунча ўсиб боради, натижада двигатель момент ва сирпанишнинг бошқа қийматида яна турғун ишлай бошлайди (110-расм, *Б* нуқта).

Двигатель турғун ишлаб турганда, агар нагрузка моменти қандайдир қийматдан камайса, унда статик момент электромагнит моментдан кичик бўлади, яъни:

$$M_н > M_0 + M_2 = M_{ст}.$$

Бунда двигателнинг тезлиги орта бошлайди ва сирпаниши камаяди. Бу ўз навбатида электромагнит моментнинг камайишига олиб келади ва у статик момент билан тенглашгунча камаяди. Бунда двигатель момент ва сирпанишнинг бошқа қийматида ўз-ўзидан яна турғун ишлай бошлайди (110-расм, *C* нуқта). Шунинг учун ҳам характеристиканинг бу қисмини двигатель турғун ишлайдиган қисми дейилади.

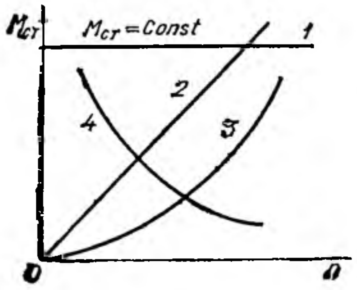
Характеристиканинг *BA* қисмида двигатель турғун ишлай олмайди. Двигатель моменти максимал моментга тенг бўлган шароитда у турғун ишлаб турган бўлсин. Бу шароитда нагрузка моментининг жуда озгина кўпайиши ҳам сирпанишнинг катталашувига сабаб бўлади, бунда электромагнит момент камаяди. сирпаниш эса янада кўпаяди. Бу ўз навбатида электромагнит моментнинг янада камайишига олиб келади ва шу кабилар. Бу ҳол сирпаниш бирга тенг бўлгунча, яъни двигатель тўхтагунча давом этади. Шундай қилиб, двигатель электромагнит моментининг максимал моментга тенг бўлиши унинг турғун ишлаш хусусиятини чегаралайди. Асинхрон двигатель турғун ишлаши

учун, унинг номинал моменти максимал моментдан доимо кичкина бўлиши лозим. Бунда двигатель фақат номинал нагрузкада эмас, балки нагрузка маълум даражада камайганда ёки кўпайганда турғун ишлайверади. Бошқача айтганда, асинхрон двигатель ўта нагрузка билан ишлаш қобилиятига эга бўлиши керак. Максимал моментнинг номинал моментга нисбати асинхрон двигателнинг ўта нагрузка билан ишлаш қобилияти дейилади ва қуйидагича аниқланади:

$$\lambda = \frac{M_{max}}{M_н}. \qquad (3\text{-}48)$$

Амалда кичик ва ўрта қувватли асинхрон двигателларнинг ўта нагрузка билан ишлаш қобилияти 1,6 . . . 2; ўрта ва катта қувватли двигателларда 1,8 . . . 2,5 га тенг бўлади. Ўта нагрузка билан ишлаш қобилиятининг катта бўлиши двигателларнинг ўлчамларини ва оғирлигини оширади, энергетика кўрсаткичларини пасайтиради

Двигателга уланган механизм (нагрузка) айлантирувчи моментга тескари йўналган тормозловчи момент ҳосил қилади. Ҳар бир механизм ҳам ўзининг механик характеристикасига эга. Механизмнинг нагрузка билан ишлаш моментининг сирпанишга ёки айланиш частотасига боғлиқлиги, яъни $M_{ст}=f(s)$ ва $M_{ст}=f(n)$ механизмнинг механик характеристикаси дейилади. Двигателнинг турғун ишлаши унинг ва механизмнинг механик характеристикаларига боғлиқ. 101-расмда баъзи механизмлар механик характеристикаларининг шакли келтирилган. 1-эгри чизиқ двигатель тезлигига боғлиқ бўлмаган механик характеристика (кўтарма кранлар, чиғирлар, поршенли насослар, конвейерлар ва ҳоказо); 2-эгри чизиқ — нагрузка моменти двигатель тезлигига пропорционал бўлган механизмлар (лента-аррали станоклар, йўнувчи станоклар, электр генераторлари); 3-эгри чизиқ — параболик механик характеристика (вентиляторлар, марказдан қочма насослар ва ҳоказо).



101-расм.

Асинхрон двигателнинг номинал моменти ($M_н$) двигатель механик характеристикасининг механизмнинг механик характеристикаси билан кесишган нуқта орқали аниқланади. Асинхрон двигатель юргизилганда унинг тезлиги табиий механик характеристика бўйича олдин B нуқтагача ўсиб боради. Сўнгра P нуқтагача камаяди. Агар бошланғич юргизиш моменти $M_ю$ статик момент $M_{ст}$ дан кичик бўлса, двигатель юрмайди. Двигателнинг юргизиш моменти (3-43) ифода билан аниқланади. Юргизиш момен-

тининг номинал моментга нисбати ҳам амалий аҳамиятга эга:

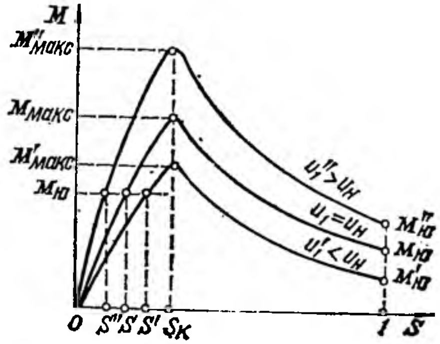
$$к = \frac{M_ю}{M_н}. \qquad (3\text{-}49)$$

Қуввати 0,6 ... 100 кВт гача бўлган қисқа туташтирилган роторли асинхрон двигателларда $к = 1 \ldots 1{,}8$; ундан катта қувватли двигателларда 0,7 ... 1 га тенг бўлади.

Шундай қилиб, асинхрон двигатель механик характеристиканинг *OB* қисмида турғун ишлайдиган системадир. Характеристиканинг бу қисмида двигатель тежамли ишлайди, чунки сирпаниш қиймати кичик. Демак, ротор занжирида қувват исрофи ($\Delta p_{э2} = P_э \cdot s$) озгина.

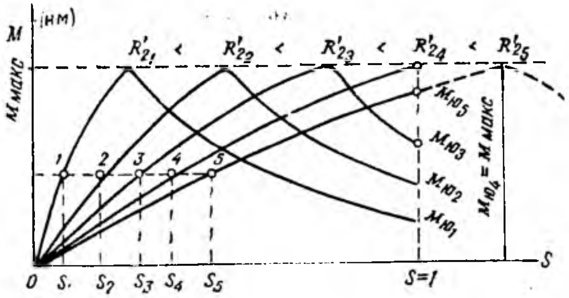
49. Тармоқ кучланиши ва ротор чулғами актив қаршилигининг механик характеристикага таъсири

Асинхрон двигателнинг айлантирувчи, яъни электромагнит моменти (юргизиш, максимал моменти) формулаларидан маълумки, бу моментлар тармоқ кучланишининг квадратига тўғри пропорционалдир ($M \equiv U_1^2$). Лекин критик сирпаниш ($s_к$) қиймати тармоқ кучланиши қийматига боғлиқ бўлмайди. Тармоқ кучланиши қийматининг ҳар қандай ўзгариши двигателнинг бошланғич ва максимал моментларини ва айланиш тезлигини ўзгартиради. 102-расмда тармоқ кучланиши номинал қийматдан бир оз ортганда ва бир оз камайганда механик характеристиканинг ўзгариши кўрсатилган. Характеристиканинг момент ўқида нагрузка моменти ($M_н$) ни белгилаб оламиз ва бу нуқтадан абсцисса ўқига (*OS*) параллел чизиқ ўтказамиз. Бу чизиқнинг характеристикалар билан кесишган нуқталари двигатель нагрузкаси ўзгармас бўлганда ва тармоқ кучланиши ўзгарганда двигатель сирпанишини аниқлайди. Кучланиш камайиши билан мотор сирпаниши ортади, айланиш тезлиги эса камаяди. Тармоқ кучланишининг озгина камайиши двигателнинг нагрузка билан ишлаш қобилиятини анча камайтиради. 102-расмда, мисол тариқасида, асинхрон двигателнинг механик характеристикаси кучланиши $U_1 = U_н$ бўлганда (1-эгри чизиқ) ва кучланиши $U_1 = 0{,}7 \cdot U_н$ бўлганда (2-эгри чизиқ) келтирилган. Кучланиш 0,7 $U_н$ бўлганда двигателнинг электромагнит моменти деярли 2 мартага камаяди.



102-расм.

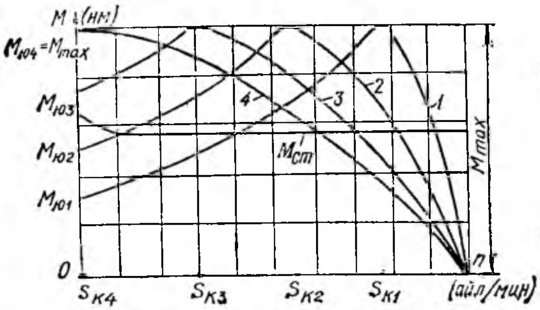
(3-46) формулада двигателнинг максимал моменти ротор чулғамининг актив қаршилигига боғлиқ эмас, лекин критик сирпаниш қиймати роторнинг актив қаршилигига боғлиқ. Демак, асинхрон двигатель ротор



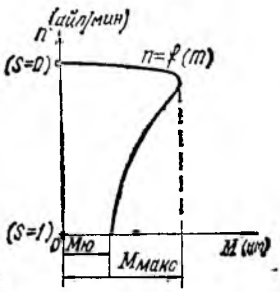
103- расм.

чулғами занжирининг актив қаршилигини ошириб, критик сирпаниш қийматини ошириш мумкин. Бунда айлантирувчи моментнинг максимал қиймати ўзгармай қолаверади, фақат у критик сирпаниш каттароқ бўлган томонга сурилади, холос (103-расм). Максимал момент критик сирпаниш катта бўлган томонга сурилганда двигателнинг юргизиш моменти ҳам катталашади Ротор чулғамининг актив қаршилигини ошириб юргизиш моментини максимал моментга тенглаштириш мумкин (103- расм, 4- характеристика). Лекин R'_2 қаршилик R'_{24} дан катта бўлганда двигателнинг юргизиш моменти яна максимал моментдан кичик бўлади (5- характеристика). Баъзи механизмларда юргизиш моментининг катта бўлиши талаб қилинади. Бундай механизмларда фаза роторли асинхрон двигателлар ишлатилади. Фаза роторли двигателларда, ротор чулғамига кетма-кет уланган махсус юргизиш реостати воситасида, ротор чулғами занжирининг актив қаршилигини ўзгартириб ҳар хил бир нечта механик характеристикаларни олиш мумкин.

Қисқа туташтирилган роторли двигателларда ротор стерженларининг қаршилигини ўзгартириш мумкин эмас. Шунинг учун қисқа туташтирилган роторли двигателлар **фақат битта механик характеристикага эга бўлади.** Бу механизмга мос двигатель танлашни қийинлаштиради. Шунинг учун қувватлари бир хил. лекин механик характеристикалари турлича бўлган қисқа туташтирилган роторли двигателлар ишлаб чиқарилади. 104- расмда қувватлари тенг, лекин механик характеристикалари турлича бўлган 4 та двигателнинг механик характеристикалари кўрсатилган. Бу характеристикаларнинг шакли бир-бирига ўхшамайди. Бу ерда ҳам қайси двигателда ротор чулғамининг актив қаршилиги каттароқ бўлса, шу двигателнинг юргизиш моменти ҳам каттароқ бўлади. Масалан, критик сирпаниши $s_к = 1$ бўлган тўртинчи двигателнинг юргизиш моменти максимал моментга тенг ($M_ю = M_{макс}$). Шу расмда механизмнинг механик характеристикаси ҳам ($M_{ст} = f(n)$) кўрсатилган. Бу механизмни 1 ва 2-характеристикали двигателлар юргиза олмайди; 3 ва 4- характеристикали двигателлар эркин юргизиб юбора олади. Лекин ротор чулғамининг қаршилиги катта бўлган двигателларнинг фойдали иш коэффициенти нисбатан кичик бўлади, бу эса уларнинг камчилиги ҳисобланади.



104- расм.



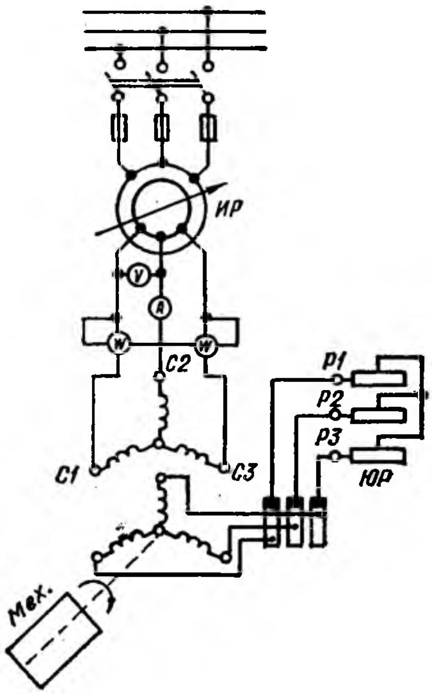
105- расм.

Двигателларнинг механик характеристикалари турли адабиётларда ҳар хил кўринишда чизилади. Масалан, $M=f(s)$; $M=f(n)$ ёки $n=f(M)$. Механик характеристика $n=f(M)$ билан ифодаланса, момент қиймати абсцисса ўқига, n ёки s қиймати ордината ўқига қўйилади (105- расмда).

50. Асинхрон двигателнинг иш характеристикалари

Двигатель турли қийматли нагрузка билан ишлаганда унинг айрим параметрлари ўзгариб туради. Шу параметрлар қийматига қараб двигателнинг қандай ишлаётганини аниқлаш мумкин. Шунинг учун ҳам двигателнинг нагрузкаси ўзгарганда шу параметрларнинг ўзгариши ўрганилади. Бу ўзгаришларни двигателнинг иш характеристикалари равшан кўрсатиб беради. Иш характеристикаларини қуриш учун лозим бўлган катталиклар қийматларини аниқлаш мақсадида схема йиғилади (106- расм). Нагрузканинг турли қийматларида ўлчаш асбобларининг кўрсатиши жадвалга ёзиб олинади, номаълум катталиклар формулалар ёрдамида аниқланади. Сўнгра двигателнинг иш характеристикалари маълум масштабда қурилади. Тажриба ўтказишда $U_1=\text{const}$ ва $f=\text{const}$ бўлиши керак.

Роторнинг айланиш частотаси n_2 (ёки сирпаниши s). Фойдали иш коэффициенти η двигателнинг айлантирувчи моменти M, қувват коэффициенти $\cos\varphi_1$ ҳамда статор токи I_1 нинг двигатель валидан олинадиган фойдали қувват P_2 га қараб ўзгаришини кўрсатувчи эгри чизиқлар **д в и г а т е л н и н г и ш х а р а к т е р и с т и к а л а р и** дейилади. Тажриба вақтида двигатель нагрузкасининг қиймати бир неча марта ўзгартирилади ва n_2, I_1, M, P_1 ҳамда агар механизм ўрнида ўзгармас ток генератори ишлатилса, унинг кучланиши U_2 ва токи I_2 ёзиб борилади. Олинган маълумотлар асосида, маълум масштабда, двигателнинг иш характеристикалари, яъни $n_2=f(P_2)$; $I_1=(P_2)$; $\eta=f(P_2)$; $M=f(P_2)$; $\cos\varphi_1=f(P_2)$ боғланишлари қурилади. Двигателнинг иш характеристикалари унинг турғун ишлаш чегарасида қурилади. Иш характеристикаларининг баъзилари устида тўхталиб ўтамиз.



106- расм.

а) Тезлик характеристикаси—$n_2=f(P_2)$ боғланиш. Двигатель салт ишлашдан то тўла нагрузка билан ишлагунгача бўлган даврда роторнинг айланиш частотаси озгина (2...6%) камаяди. Ротор чулғамида электр исроф қийматини камайтириш мақсадида двигатель номинал шароитда ишлаганда унинг сирпаниши 0,02 ... 0,06 дан ошмайдиган қилиб тайёрланади. Шунинг учун асинхрон двигателнинг тезлик характеристикаси анча „каттиқ" характеристика ҳисобланади. Идеал „қаттиқ" характеристика абсцисса ўқига параллел чизиқ кўринишида бўлади. Двигатель салт ишлаганда ротор чулғамидаги исроф — $\Delta P_{э2}$ электромагнит қувватга қараганда жуда кичик бўлади. Агар уни эътиборга олинмаса, яъни $\Delta P_{э2}=0$ бўлса, у ҳолда $s=\frac{P_{э2}}{P_э}=0$; $n_2\approx n_1$ бўлади. Двигатель номинал нагрузка билан ишлаганда сирпаниши $s=\frac{\Delta P_{э2}}{P_э}=1...6\%$ дан ошмайди. Шунинг учун $n_2=f(P_2)$ боғланиш абсцисса ўқи томон бир оз эгилади, двигатель нагрузкаси ортган сари унинг тезлиги камаяди, сирпаниши эса бир оз ортади (107- расм);

б) Двигатель айлантирувчи моментининг P_2 га боғлиқлиги, яъни $M=f(P_2)$. Айлантирувчи моментнинг номинал қиймати қуйидагича аниқланади:

$$M_н=\frac{P_{2н}}{\omega_н}=\frac{P_{2н}\cdot 60}{2\pi\cdot n_н}$$

ёки

$$M_н=9550\frac{P_{2н}}{n_{2н}},\ (Н\cdot м.) \qquad (3\text{-}50)$$

ёки

$$M_н=975\frac{P_{2н}}{n_{2н}},\ (кГм)$$

бунда: $P_{2н}$ кВт да берилади.

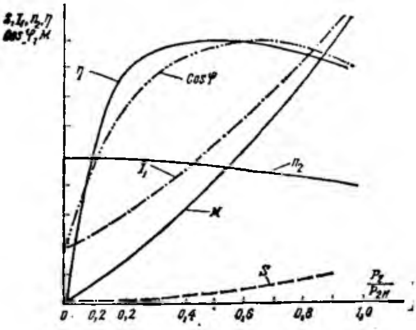
Агар $n_2=\text{const}$ бўлса, $M=f(P_2)$ боғланиш деярли тўғри чизиқ бўлади. Лекин P_2 нинг ортиши билан n_2 бир оз камаяди,

шунинг учун нагрузка ортиши билан айлантирувчи момент P_2 га қараганда тезроқ ортади ва $M = f(P_2)$ боғланиш юқорига эгилган эгрироқ чизиқ кўринишида бўлади (107-расм).

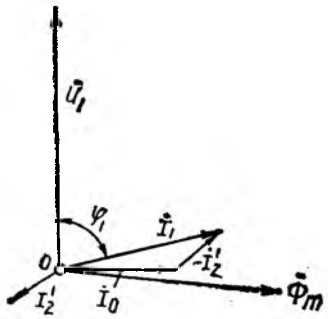
в) Статор токи — $I_1 = f(P_2)$ боғланиш. Двигателнинг салт ишлаш токи номинал токнинг 20 . . . 40 процентини ташкил қилади. Нагрузка ортиши билан двигателнинг актив, яъни фойдали ишга сарфланадиган қуввати ортиб боради.

Статор токининг реактив қисми доимо бир хилда қолади. Шунинг учун ҳам турли нагрузкада двигателнинг магнит оқими деярли ўзгармайди. Шунинг учун бу боғланиш деярли тўғри чизиқ бўлади (107-расм).

7) Қувват коэффициенти. Асинхрон двигатель электр тармоғидан актив ва реактив ток қабул қилади. Унинг актив токи нагрузка қийматига тўғри пропорционал бўлади. Двигатель салт ишлаганда унинг актив токининг қиймати жуда кичкина бўлади. Двигателнинг реактив токи магнитловчи токдир. унинг қиймати турли иш шароитларида бир хилда қолади. Шунинг учун $\dot{I}'_2$ ток кичик бўлганда (яъни, двигатель кам нагрузка билан ишлаганда) статор токи $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2)$ тармоқ кучланиши $\dot{U}_1$ га нисбатан фазаси жиҳатидан 90° га яқин бурчак (φ_1) га силжиган бўлади (108-расм). Демак, двигателнинг қувват коэффициенти салт ишлаганда кичкина бўлар экан. Двигатель кичик нагрузка билан ишлаганда унинг умумий токи таркибида реактив токнинг улуши катта бўлади. Шу сабабдан салт ишлаш шароитида ёки кам нагрузка билан ишлаганда двигателнинг қувват коэффициенти 0,1 . . . 0,2 дан ошмайди. Двигателнинг нагрузкаси ортган сари токнинг актив қисми ҳам орта боради. Тармоқ кучланиши U_1 ва двигатель токи I_1 векторлари орасидаги бурчак кичиклашиб боради, қувват коэффициенти эса катталашади. Нагрузка номинал қийматга яқинлашганда $\cos\varphi_1$ энг катта қийматга эришади. Бунда $\cos\varphi_1 = 0,8 \ldots 0,85$ бўлади. Нагрузканинг янада ортиши натижасида роторнинг айланиш тезлиги камаяди, сирпаниш ва роторнинг



107-расм.



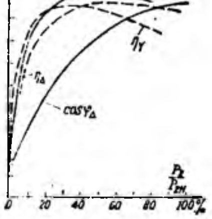
108-расм.

индуктив қаршилиги ($x_2 \cdot s$) ортади. Бунда қувват коэффициенти бир оз камаяди (107-расмга қаранг). Демак, асинхрон двигателнинг қувват коэффициенти катта бўлиши учун уни доимо номинал ёки унга яқин нагрузка билан ишлатиш лозим экан. Бунда берилган механизм учун асинхрон двигатель қувватини тўғри танлаш муҳим аҳамиятга эга. Амалда кўпчилик двигателларда нагрузка қиймати ўзгариб туради. Агар двигатель кам нагрузка билан (масалан, номинал нагрузканинг 50...60%) ишласа, унинг қувват коэффициенти 0,4...0,5 бўлади, яъни двигатель тежамли ишламайди. Бу холда қувват коэффициентини ошириш учун тармоқ кучланишини $\sqrt{3}$ марта камайтириш лозим. Бунинг учун статор чулғамини юлдуз усулида улаш кифоя. Бунда магнитловчи токнинг, бинобарин, магнит оқимининг қиймати тахминан $\sqrt{3}$ марта камаяди. Бундан ташқари, статор токининг актив қисми катталашади, $\cos\varphi_1$ нинг қиймати ортади. 109-расмда асинхрон двигателнинг статор чулғами юлдуз ва учбурчак усулида уланганда нагрузка қийматига қараб $\cos\varphi_1$ нинг ва фойдали иш коэффициенти η нинг ўзгариши кўрсатилган. Статор чулғами юлдуз усулида уланганда двигатель кам нагрузка билан ишласа ҳам, унинг қувват коэффициенти анча катта бўлади. Корхонада ўрнатилган ҳамма асинхрон двигателлар доимо тўла нагрузка билан ишламайди, бу корхонанинг $\cos\varphi_1$ қийматини камайтиради. Бу ҳолда корхонанинг қувват коэффициентини сунъий йўл билан, масалан, ишлаб турган асинхрон двигателларга конденсаторлар батареясини параллел улаб оширилади.

д) Фойдали иш коэффициентининг фойдали қувватга боғланиши — $\eta = f(P_2)$. Олдин кўрганимиздек, асинхрон двигатель ишлаб турганда тармоқдан олинган қувватнинг бир қисми унинг ўзида исроф бўлади. Тўла исроф бўладиган қувват қуйидагича аниқланади:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{п1} + \Delta P_{э1} + \Delta P_{э2} + \Delta P_{қўш} + \Delta P_{мех}. \qquad (3\text{-}54)$$

Асинхрон двигателда статор ва ротор чулғамларида электр исроф қиймати нагрузка токининг квадратига тўғри пропорционалдир. Бу исрофлар қиймати нагрузканинг ўзгариши билан ўзгариб туради. Двигатель нормал шароитда ишлаганда ротор токининг частотаси жуда кичик (1...3 Гц) бўлганидан роторнинг пўлат ўзагида магнит исрофи жуда кичкина бўлади. Шунинг учун у баъзан, эътиборга олинмайди. Двигатель пўлатидаги магнит исрофлар ва ишқаланиш учун сарфланадиган механик исроф двигателнинг турли иш шароитларида бир хил бўлади. Булар доимий исрофлар дейилади. Двигателда бўладиган қўшимча исроф қиймати, тахминан, $0{,}005 \cdot P_2$ га тенг деб олинади. Қиймати ўз-



109-расм.

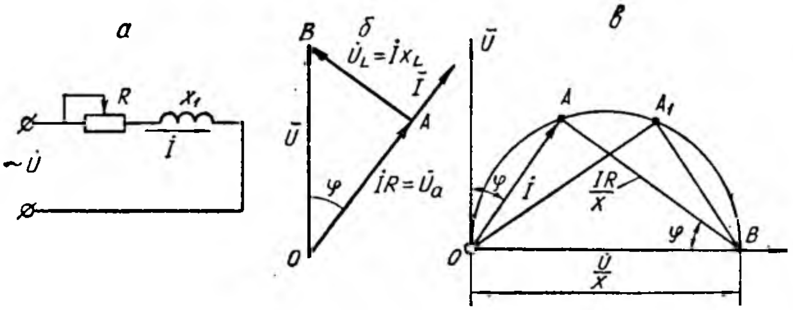
гариб турадиган қувват исрофи қиймати доимо бир хилда қоладиган қувват исрофига тенг бўладиган нагрузкада двигателнинг фойдали иш коэффициенти ўзининг максимал қийматига эришади. Ҳозирги пайтда ишлатилаётган асинхрон двигателларда бу шарт нагрузка номинал нагрузка қийматининг 60 — 85% ини ташкил қилганда юзага келади. Кичик ва ўртача қувватли (1 кВт дан 100 кВт гача) двигателларнинг фойдали иш коэффициентининг энг катта қиймати $\eta = 0{,}7 \ldots 0{,}9$ гача боради. Қуввати 100 кВт ва ундан юқори бўлган двигателларда $\eta = 0{,}92 \ldots 0{,}94$ гача етади. Статор чулғамлари юлдуз ва учбурчак усулида уланганда фойдали иш коэффициентининг P_2 га боғлиқлик эгри чизиқлари 109- расмда кўрсатилган.

IX БОБ. АСИНХРОН ДВИГАТЕЛНИНГ АЙЛАНА ДИАГРАММАСИ

51. Умумий тушунчалар

Асинхрон двигателнинг қандай ишлашини аниқлайдиган (юргизиш, нормал нагрузка билан ишлаш ва ростлаш) характеристикалари тажриба ўтказиш йўли билан аниқланади. Бунда двигателнинг нагрузкаси ўзгартирилади ва схемага уланган ўлчов приборларининг кўрсатишлари ёзиб олинади. Бунинг учун кўп вақт ва турли ўлчов приборлари талаб қилинади; электр энергияси сарфланади; натижалар аниқ бўлмайди. Асинхрон двигателнинг айлана диаграммаси унинг айрим қисмларидаги ток, кучланиш ва қувватни миқдор ва сифат жиҳатидан ўзаро муносабатларини равон кўрсатиб беради. Айлана диаграмма двигателнинг иш характеристикаларини қуриш учун, ҳамма катталикларни график усулда аниқлаш имконини беради. Двигателнинг айлана диаграммаси салт ишлаш ва қисқа туташиш тажрибаларидан олинган маълумотлар асосида қурилади.

Олдин кетма-кет уланган, қиймати ўзгарувчан актив (R) ва ўзгармас индуктив (x_L) қаршиликли оддий занжир учун айлана диаграмма қуришни кўриб чиқамиз (110-расм, *а*). Бу занжирда тармоқ кучланиши ўзининг актив $\dot{U}_a = IR$ ва индуктив $\dot{U}_L = Ix_L$ ташкил этувчиларидан иборат бўлади ва ток вектори кучланиш векторидан маълум φ бурчакка орқада қоладиган қилиб чизилади (110-расм, *б*). Вектор диаграммада кучланиш $\dot{U}$ вектори $\dot{I}R$ ва $\dot{I}x_L$ векторларнинг йиғиндисига тенг бўлади; OAB учбурчакни оламиз. Бу учбурчакнинг томонларини x га бўлиб, OAB учбурчакни ҳосил қиламиз. (110-расм, *в*). Бу учбурчакнинг OA катети ток вектори $\dot{I}$ ни ифодалайди. Ток векторига нисбатан $\varphi = \operatorname{arctg}\frac{x}{R}$ бурчак билан ордината ўқининг мусбат йўналишида кучланиш вектори чизилади. Занжирда актив қаршилик қиймати ўзгариши билан занжирда ток қиймати ўзгаради ва учбур-



110- расм.

чак катетларининг вазияти ҳам ўзгаради. Бунда янги катетлар OA_1 ва A_1B ҳосил бўлади. Лекин учбурчакнинг гипотенузаси $\frac{\dot U}{x}$ ўзгармай қолаверади. Занжирнинг янги иш шароити A_1 нуқта билан аниқланади. Агар актив қаршилик қиймати нолдан чексизгача ўзгартирилса, диаграммада ток $\dot I$ вектори турли вазиятда бўлади ва векторнинг учи диаметри $\frac{U}{x} = \mathrm{const}$ бўлган айлана чизади. Агар $R = 0$ бўлса (фақат индуктив нагрузка), A нуқта B нуқта билан туташади. Агар $R = \infty$ бўлса, ток $\dot I = 0$ бўлади ва A нуқта O нуқта билан туташади. Қаршиликнинг ҳар хил оралиқ қийматида ток I вектори OAA_1B айлана бўйлаб турли вазиятда бўлади. Шунинг учун бу айлана **токлар айланаси** дейилади.

Энди асинхрон двигателнинг Г симон эквивалент схемаси (97-расм, *б* га қаранг) асосида унинг айлана диаграммасини қуриш мумкин бўлади. Бу схема иккита параллел шохобчадан, яъни $\dot I_0$ ток ўтадиган магнитловчи шохобчадан ва $(-\dot I_2')$ ток ўтадиган асосий (иш) шохобчадан иборат. Занжирга қиймати ўзгармас кучланиш $\dot U_1$ берилади. Бу схемада магнитловчи шохобча токи $\dot I_0$ ўзгармас, яъни: $\dot I_0 = \frac{\dot U_1}{(z_0 + z_1)} = \mathrm{const}$. Магнитловчи ток $\dot I_0$ вектори $\dot U$ вектордан φ_0 бурчакка орқада қолади (111-расм, *а*). Бунда:

$$\mathrm{tg}\varphi_0 = \frac{x_0 + x_1}{R_0 + R_1}.$$

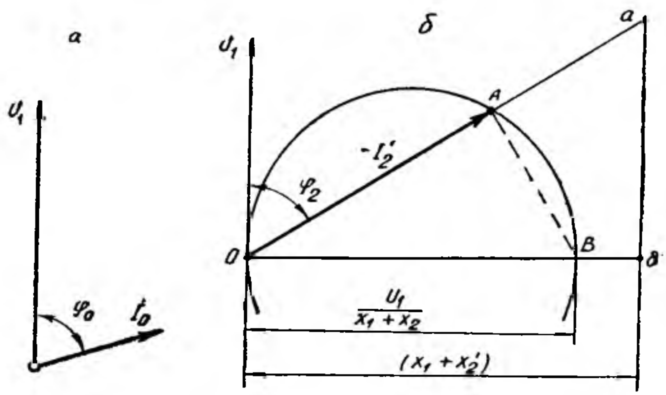
$(x_0 + x_1) > (R_0 + R_2)$ бўлгани учун φ_0 бурчак 90° га яқин бўлади. Эквивалент схеманинг асосий (иш) шохобчаси 120-расм, *а* даги схемага ўхшаш, қиймати ўзгармас индуктив $(x_1 + x_2')$ ва қиймати ўзгарадиган актив $(R_1 + \frac{R_2'}{S})$ қаршиликлардан иборат.

Шунинг учун двигатель сирпаниши ўзгарганда $-\dot{I}'_2$ токнинг қиймати ҳам ўзгаради. Иш шохобчасининг актив қаршилиги $\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right) = 0$ бўлгандаги сирпаниш қийматида $(-\dot{I}'_2)$ ток максимал қийматга эришади. Бунда $-\dot{I}'_2$ ток реактив ток бўлади, қиймати қуйидагича аниқланади:

$$\dot{I}'_{2макс} = \frac{\dot{U}_1}{x_1 + x_2}.$$

Асосий шохобчанинг актив қаршилиги ўзгарганда $(-\dot{I}'_2)$ ток векторининг учи *OAB* айлана бўйича ҳаракатланади (111-расм, *б*). Бунда *OB* айлана диаметридир. Ток масштаби m_I да $(-\dot{I}'_2)$ токнинг максимал қиймати $\dot{I}'_{2макс}$ га тўғри келади. Энди юқорида айтилганларни исботлаш учун, абцисса ўқида қаршиликлар масштаби m_x да иш шохобчанинг реактив қаршилиги $(x_1 + x'_2)$ га тенг бўлган *Об* чизиғини чизамиз ва унинг *б* нуқтасидан абцисса ўқига тик қилиб *ба* тик чизиғини чиқарамиз, *ба* чизиғи шу масштабда (берилган сирпанишда) иш шохобчасининг актив қаршилиги $\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)$ га тенг. Унда $оа = \sqrt{(об)^2 + (ба^2)}$ шу масштабда (берилган сирпанишда) иш шохобчанинг тўла қаршилигини ифодалайди:

$$z_{иш} = \sqrt{(x_1 + x'_2)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2}.$$



111-расм. Асинхрон двигателнинг соддалаштирилган вектор диаграммаси: *а* — магнитловчи шохобча учун, *б* — иш шохобчаси учун.

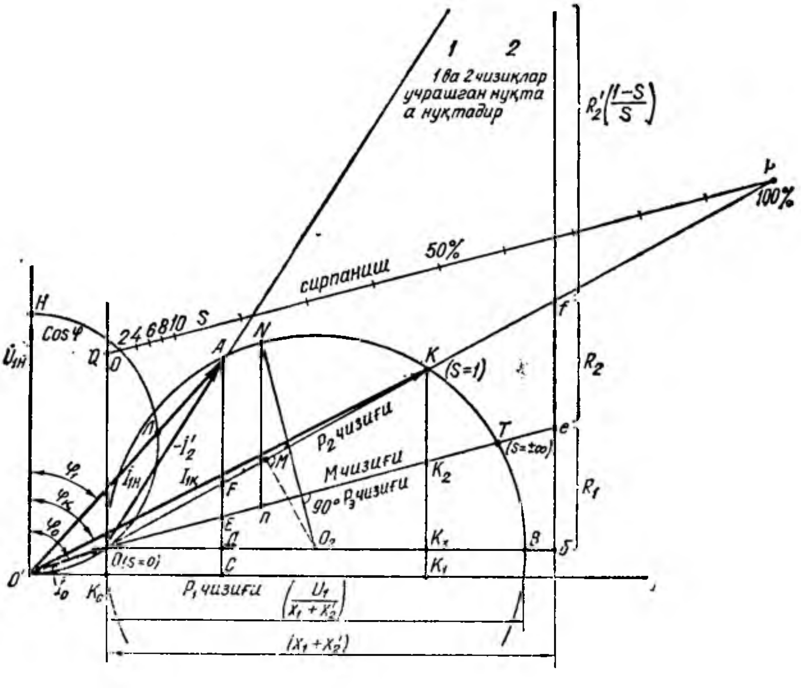
Оба ва *ОВА* учбурчаклар ўхшашдир. Унда: $Об/Оа = OA/OB$.
Бундан *ОА* ни аниқлаймиз: $OA = \frac{oB \cdot об}{Oa} = \frac{\dot{I}'_{2макс}(x_1 + x'_2)}{z_{иш}} = \frac{\dot{U}}{z_{иш}} = \dot{I}'_2$.
Ордината ўқи билан *ОА* чизиғи орасидаги бурчакнинг тангенси:

$$\operatorname{tg}\varphi_2 = \frac{Об}{аб} = \frac{x_1 + x'_2}{R_1 + \frac{R'_2}{S}} \text{ бўлади.}$$

Демак, *ОА* чизиқ қиймати ва йўналиши бўйича $-\dot{I}'_2$ ток векторини ифодалар экан. $-\dot{I}'_2$ векторнинг бошини $\dot{I}_0$ вектор охиридан қўйиб, токлар диаграммасини бирлаштириб қурамиз (112-расм). Бунда *О'А* чизиғи токлар масштабида $\dot{I}_1$ токни, $\overline{OA}$ чизиғи $(-\dot{I}'_2)$ токни ифодалайди. Диаметри *ОВ* бўлган айлана бу токлар учларининг вазиятларини кўрсатади. Диаграммада:

$$\dot{I}_0 = m_i \cdot OO'; \quad \dot{I}'_2 = m_i OA; \quad \dot{I}_1 = m_i O'A,$$

$$\dot{I}_{1a} = m_i \cdot AC; \quad \dot{I}_{1p} = O'Cm_i.$$



112-расм. Асинхрон двигателнинг айлана диаграммасини қуриш.

52. Асинхрон двигателнинг айлана диаграммасини қуриш

Асинхрон двигателнинг айлана диаграммаси салт ишлаш ва қисқа туташиш тажрибаларидан олинган маълумотлар асосида қурилади. Умуман, айлана диаграммани қуриш учун тармоқнинг фаза кучланиши $\dot{U}_1$; салт ишлаш токи $\dot{I}_0$; салт ишлашда ток билан кучланиш орасидаги силжиш бурчаги φ_0; қисқа туташиш токи $\dot{I}_{1к}$; қисқа туташишда ток билан кучланиш орасидаги силжиш бурчаги $\varphi_к$ ҳамда статор фаза чулғамининг актив қаршилиги R_1 маълум бўлиши керак. Аңа шу параметрлар тажрибалар ўтказиш йўли билан аниқланади.

С а л т и ш л а ш т а ж р и б а с и. Тажриба ўтказиш учун 106-расмда келтирилган схема йиғилади ва двигатель юргизиш реостати ёрдамида юргизилади. Индукцион регулятор (ИР) ёрдамида двигателга номинал кучланиш берилади. Двигателга нагрузка уланмайди, яъни $M_{ст}=0$ бўлади. Статор чулғамига номинал кучланиш $\dot{U}_{1н}$ берилганда ўлчов приборларининг кўрсатган қийматлари, яъни I_0, салт ишлаш қуввати P_0 ёзиб олинади ва қувват коэффициенти аниқланади:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}\,\dot{U}_{1н}\cdot I_0}.$$

Қ и с қ а т у т а ш и ш т а ж р и б а с и. Тажриба ўтказиш схемаси олдингидек қолади. Двигателнинг ротори тормозланади. Индукцион регулятор ёрдамида кучланиш $U_к$ нолдан секин-аста статор токи номинал қийматига етгунча ошириб борилади. Кучланишнинг бу қиймати жуда кичкина, яъни $U_к=(0{,}15\ ...0{,}3)U_{1н}$ бўлади. Ток номинал қийматга етганда ўлчов приборларининг кўрсатиши ($U_к$, $I_к$, $P_к$) ёзиб олинади. Қисқа туташишда қувват коэффициенти қуйидагича аниқланади:

$$\cos\varphi_к = \frac{P_к}{m_1 U_{1к} I_{1н}}.$$

Агар двигателга номинал кучланиш берилса, қисқа туташиш токининг қиймати қуйидагича аниқланади:

$$I_{1к} = I_{1н}\frac{U_{1н}}{U_{1к}}.$$

Т о к л а р а й л а н а с и н и қ у р и ш. Олдин кўриб ўтганимиздек кучланиш $\dot{U}_{1н}$ вектори ордината ўқи бўйича йўналади (112-расм). Ток масштаби аниқланади. $\dot{I}_0$ ток кучланиш $\dot{U}_{1н}$ дан φ_0 бурчакка орқада бўлади. $\dot{I}_{1к}$ ток $\dot{U}_{1н}$ вектордан $\varphi_к$ бурчакка кейинда чизилади ҳамда диаграммадан O ва K нуқталар аниқланади. OK чизиғи ўтказилади, бу чизиқ ўртасидан (M нуқта) OB чизиғи билан учрашгунча MO_2 тик чизиғи чизилади ва O_2 нуқта аниқланади. OO_2 радиусда чизилган айлана т о к л а р а й л а н а с и

бўлади. 112-расмдаги айлана диаграммадан двигателга тегишли бошқа параметрларни ва катталикларни ҳам аниқлаш мумкин. Масалан, қувватларни аниқлаймиз. Двигатель тармоқдан оладиган P_l қувват статор токининг актив қисмига, яъни $\dot{I}_{1a} = I_1 \cos\varphi_1$ га пропорционалдир. Шунинг учун OB чизиғига тик бўлган AC чизиғи қувватлар масштаби ($m_р$) да P_1 қувватни ифодалайди: $P_1 = \overline{AC} \cdot m_р$. Магнитловчи шохобча оладиган қувват амалда статор пўлатидаги магнит исрофига, яъни $\Delta p_{п1}$ га тенг. Бу қувват салт ишлаш токининг актив қисмига пропорционал ва DC чизиғи билан кўрсатилади, яъни $\Delta p_{п1} = \overline{DC} \cdot m_р$. Эквивалент схеманинг иш шохобчаси оладиган қувват $\dot{I}_2'$ токнинг актив қисмига пропорционал, диаграммада $\overline{AD}$ чизиғи билан кўрсатилади. Иш шохобча оладиган қувватни ($P_{иш}$) айрим қисмларга ажратиш мумкин бўлади:

$$P_{иш} = m_1 \dot{I}_2'^2 \left| R_1 + R_2' + R_2^1\left(\frac{1-S}{S}\right)\right|,$$

бу ерда: $\Delta p_{э1} = m_1 \dot{I}_2'^2 R_1$ — статор чулғамидаги электр исрофи; $\Delta P_{э2} = m_1 \dot{I}_2'^2 R_2'$ — ротор чулғамидаги электр исрофи; $P_{мех} = P_2 = m_1 I_2'^2 R_2'^2 \left(\frac{1-S}{S}\right)$ — роторнинг тўла механик қуввати (фойдали қувват). Бу қувватларни айлана диаграммасидан аниқлаш мумкин. Бунинг учун диаграммада ($x_1 + x_2'$) қаршиликни ифодалайдиган $Об$ чизиғи чизилади (қаршиликлар масштаби m_z да). $б$ нуқтадан $Об$ га тик чизиқ чизилади ва шу чизиқда (масштабда) $бе = R_1$ ва $ef = R_2'$ қаршиликлар қўйилади. Энди OA чизиғини $Об$ га тик чизиқ билан кесишган жойида a нуқта топилади. Бунда $aб$ чизиғи иш шохобчасининг актив қаршиликлари йиғиндисини ифодалайди (112-расм). O нуқтани e ва f нуқталар билан бирлаштириб AD чизиғида E ва F нуқталарни аниқлаймиз. Бу нуқталар AD чизиғини DE: EF: $FA = R_1 : R_2' : R_2'\left(\frac{1-S}{S}\right)$ нисбатда тақсимлайди ва унда:

$$\Delta p_{э1} = \overline{DF}\, m_р;\ \Delta p_{э2} = \overline{EF}\, m_р;\ P_{мех} = \overline{FA} \cdot m_р \text{ бўлади.}$$

Диаграммада $\overline{Of}$ ва $\overline{Oe}$ чизиқларнинг ўрни двигателнинг ишлаш режимига боғлиқ бўлмайди ва бу чизиқлар токлар айланасида K ва T нуқталарни аниқлайди. OK чизиғи м е х а н и к қ у в в а т (P_2) чизиғи дейилади. $\overline{OT}$ чизиғи эса э л е к т р о м а г н и т қ у в в а т чизиғи дейилади, чунки $\overline{AE}$ чизиғи роторга бериладиган электромагнит қувватни характерлайди:

$$P_{эм} = P_{мех} + \Delta p_{э2} = \overline{AE} m_р.$$

Двигателнинг электромагнит моменти электромагнит қувватга

пропорционал $P_э = M\omega_1$, чунки ω_1 айланувчи магнит майдонининг бурчак тезлиги ўзгармасдир. Демак, $\overline{AE}$ чизиғи моментлар масштабида двигатель айлантирувчи моментининг қийматини ифодалайди. $\overline{OT}$ чизиғи моментлар чизиғи дейилади. Двигателнинг сирпаниши ротордаги электр исроф қуввати $(\Delta p_{э2})$ нинг электромагнит қувватга бўлган нисбати билан аниқланади:

$$S = \frac{\Delta p_{э2}}{P_{эм}} = \overline{EF}/\overline{AE}.$$

Диаграммадан сирпанишни аниқлаш учун абцисса ўқидаги K_0 нуқтадан тик чизиқ чизамиз. Сўнгра ихтиёрий Q нуқтадан фойдали қувват чизиғи билан кесишгунча электромагнит қувват чизиғига параллел бўлган $\overline{QP}$ чизиғи чизилади. Бу чизиқ сирпаниш чизиғи бўлади. Бу чизиқни 100 та тенг бўлакка бўлиб, сирпаниш шкаласи ҳосил қилинади. Берилган A нуқтага тўғри келадиган сирпанишни топиш учун $\overline{CA}$ чизиғи сирпаниш шкаласигача давом эттирилади, кесишиш нуқтаси сирпанишни процент ҳисобида аниқлайди.

Қувват коэффициентини аниқлаш учун ордината ўқида исталган диаметрда айлана чизилади. Бунда токлар айланасида берилган A нуқта учун : $\cos\varphi_1 = \frac{O^1Л}{O^1H}$ билан аниқланади. Ҳисоблаш қулай бўлиши учун айлана диаметри $O'H$ 100 мм га тенг қилиб олинади. Унда $\cos\varphi = \frac{\grave{O}Л}{100}$ билан аниқланади.

Двигателнинг ўта нагрузкаланиш қобилиятини аниқлаш учун максимал моментни топиш керак. Бунинг учун O_2 нуқтадан электромагнит қувват чизиғига тик ўтказамиз, бу чизиқни токлар айланаси билан кесишгунча давом эттирамиз ва N нуқтани топамиз. Бу нуқтадан ордината ўқига параллел чизиқ чизиб, бу чизиқни электромагнит қувват чизиғи билан кесишган жойда n нуқтани топамиз. Унда моментлар масштабида Nn чизиғи максимал момент қийматини аниқлайди: Агар A нуқта (токлар айланасида) номинал ишлаш режимига тўғри келса, унда двигателнинг ўта нагрузкаланиш қобилияти: $\lambda = \frac{M_{макс}}{M_н} = \frac{Nn}{AE}$ бўлади. Юргизиш моменти токлар айланасида $S = 1$ бўлган нуқтага, яъни K нуқтага тўғри келади, $M_ю = KK_2m_м$.

Двигателнинг фойдали иш коэффициенти $\eta = P_2/P_1$ билан аниқланади. Айлана диаграммада: $P_2 = \overline{AF} \cdot m_р$ ва $P_1 = \overline{AC}\ m_р$. Унда: $\eta = \frac{AF}{AC}$. Фойдали иш коэффициентини бундай аниқлашда, қўшимча исроф эътиборга олинмаганлиги учун маълум хатога йўл қўйилади. Шунинг учун қуйидаги формула билан аниқланиши лозим: $\eta = 1 - \frac{\sum \Delta p}{P_1}$ ёки $\eta = 1 - \frac{\sum \Delta p}{P_2 + \sum \Delta p}$, бу ерда $\sum \Delta p = \Delta p_{п1} +$

$+\Delta p_{э1}+\Delta p_{э2}+\Delta p_{мех}+\Delta p_{қўш}$ ҳисоблаш йўли билан аниқланади. Қўшимча қувват исрофи стандарт асосида P_1 нинг 0,5% ига тенг қилиб олинади, яъни $\Delta p_{қўшн}=0{,}005\cdot P_1$. Қўшимча қувват исрофи статор токи I_1 га пропорционал. Шунинг учун номинал бўлмаган режимда қўшимча қувват исрофи: $\Delta p_{қўш}=\Delta p_{қўшн}\left(\frac{I_1}{I_{1н}}\right)^2$ билан аниқланади.

Айлана диаграмма асосида двигателнинг иш характеристикаларини қуриш учун диаграммада статор токининг $I_1=\left(\frac{1}{4};\ \frac{2}{4};\ \frac{3}{4};\ \frac{4}{4};\ \frac{4}{5}\right)\cdot I_{1н}$ қийматлари учун токлар айланасида A_1; A_2; A_3 ва бошқа нуқталар аниқланади ва токнинг айрим қийматлари учун двигатель параметрлари аниқланади ва двигателнинг иш характеристикалари, яъни n; η; M; $\cos\varphi_1$, I_1 ларнинг фойдали қувват P_2 га боғлиқлик эгри чизиқлари тегишли масштабларда қурилади.

X БОБ. АСИНХРОН ДВИГАТЕЛНИ ЮРГИЗИШ ВА АЙЛАНИШ ЧАСТОТАСИНИ ЎЗГАРТИРИШ

53. Асинхрон двигателни юргизиш

Турли хил механизмларни ҳаракатга келтириш учун асинхрон двигателлар ишлатилади. Турли механизмларда асинхрон двигателларнинг ишлаш шароитлари ҳар хил бўлади, уларни юргизиш шароитлари ҳам турлича. Двигателни юргизиш мумкин қадар осон ва қўшимча қурилмаларсиз бажарилиши лозим Двигатель осон юргизилиши учун унинг юргизиш моменти етарли даражада катта бўлиши, юргизиш токи эса мумкин қадар кичик бўлиши лозим. Двигатель юргизилганда баъзи бир механизмларда унинг тезлиги маълум вақт ичида жуда текис ўсиб бориши, баъзиларида эса юргизиш моментининг анчагина катта бўлиши талаб қилинади.

Маълумки, двигателни юргизиш учун унинг статор чулғамлари тармоққа уланиши керак. Чулғамлардан уч фазали ток ўтганда статор ичида айланма магнит майдони ҳосил бўлади. Юргизишнинг бошланғич пайтида р о т о р қ ў з ғ а л м а с, я ъ н и $s=1$ б ў л г а н и у ч у н у қ и с қ а в а қ т қ и с қ а т у т а ш и ш ш а р о и т и г а я қ и н ш а р о и т д а и ш л а й д и. Шунинг учун юргизишнинг бошланғич пайтида статор токи, яъни юргизиш токи анча катта бўлади. Юргизиш токининг қиймати (3-25) ифода асосида қуйидагича аниқланади:

$$I_ю\approx I_2'=\frac{U_1}{\sqrt{(R_1+R_2')^2+(x_1+x_2')^2}}.$$

Юргизиш моменти (3-42) формула бўйича аниқланади. Ҳар бир асинхрон двигатель учун юргизиш токининг номинал токка нисбати, яъни $I_ю/I_н$ юргизиш моментининг номинал моментга нисба-

ти, яъни $M_ю/M_н$ ва двигателни тўла юргизиш учун кетган вақт муҳим кўрсаткич ҳисобланади. Асинхрон двигателни юргизишда амалда бир нечта усул қўлланилади: статор чулғамларини тўғридан-тўғри тармоққа улаб юргизиш; статор чулғамига пасайтирилган кучланиш бериб юргизиш ва ротор чулғамига юргизиш реостатини кетма-кет улаб юргизиш (фаза роторли двигателларда).

а) Қисқа туташтирилган роторли асинхрон двигателларни тўғридан-тўғри тармоққа улаб юргизиш. Кичик ва ўртача қувватли двигателлар рубильник ёки магнитли юргизгич ёрдамида тўғридан-тўғри тармоққа улаб юргизилади, бу усул энг кўп тарқалган ва осон усул ҳисобланади. Двигателнинг номинал токи;

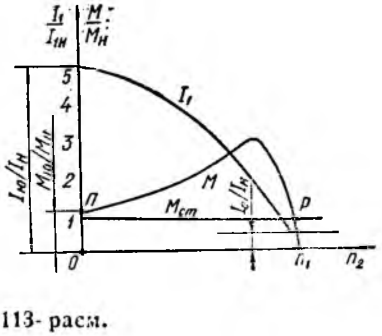
$$I_н = \frac{P}{\sqrt{3}\,U_н \cos\varphi \eta_н}$$

билан аниқланади. Юргизишнинг бошланғич пайтида ротор қўзғалмас ($n_2 = 0$ яъни, $s = 1$) бўлгани учун анча катта ток ҳосил бўлади. Бу ток юргизиш токи дейилади. Қисқа туташтирилган роторли асинхрон двигателларда юргизиш токи двигателнинг номинал токидан 4 . . .7 марта катта бўлади:

$$I_ю = m\,I_н = (4 - 7)\,I_н,$$

бу ерда: $m = \frac{I_ю}{I_н}$ — юргизиш токининг номинал токдан неча марта катталигини кўрсатувчи коэффициент.

Ҳар бир двигатель учун муҳим бўлган бу коэффициентнинг қиймати справочникларда берилади. Двигатель юргизилиши билан юргизиш токининг қиймати жуда тез камаяди. Юргизиш токининг сўниш вақти двигатель қандай шароитда юргизилишига (салт ишлаш ёки нагрузка билан ишлаш шароитига қараб) ҳамда механизмнинг механик характеристикасига қараб, тахминан 5 . . .10 секундга боради. Двигатель юргизилгандан сўнг унинг тезлиги ва айлантирувчи моменти табиий механик характеристика бўйича ўсиб боради (113-расм). Расмда $П$ нуқта бошланғич (юргизиш) моментни ифодалайди, айлантирувчи момент P нуқтада статик момент билан мувозанатлашади, яъни $M = M_{ст}$. Агар юргизиш моменти $M_ю < M_{ст}$ бўлса, двигатель юра олмайди. Шу расмда механизмнинг (статик моменти) механик характеристикаси ва юргизиш токининг ўзгариши, яъни сўниши ҳам кўрсатилган.

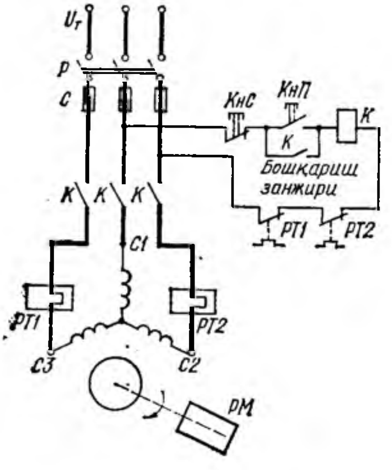


113- расм.

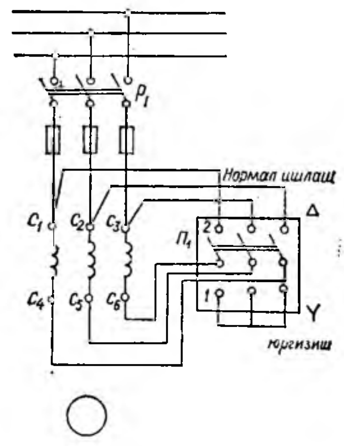
Юргизиш токи анча катта бўлса ҳам двигатель учун хавфли эмас, чунки унинг қиймати жуда қисқа вақт ичида камаяди

ва чулғамларни ҳаддан ташқари қиздиришга улгурмайди. Лекин двигатель токининг қисқа муддатга кўпайиши тармоқ кучланиши тебранишига сабаб бўлади. Айниқса катта қувватли двигателлар бу усулда юргизилганда тармоқ кучланишининг камайиши жуда сезиларли бўлади. Катта қувватли двигатель юргизилаётганда кучланишнинг камайиши шу тармоққа уланган ва ишлаб турган бошқа асинхрон двигателлар ишига ёмон таъсир қилади. Чунки, двигателнинг айлантирувчи моменти тармоқ кучланиши квадратига тўғри пропорционалдир ($M = U_1^2$). Шунинг учун ҳар қандай катта қувватли асинхрон двигателни тўғридан-тўғри тармоққа улаб юргизиш ярамайди. Одатда, тўғридан-тўғри тармоққа улаб юргизиладиган двигателнинг қуввати шу двигатель энергия олаётган трансформатор қувватининг 25% дан ошмаслиги лозим. Амалда энергия билан таъминловчи трансформаторларнинг қувватига қараб, қуввати 55...75 кВт бўлган қисқа туташтирилган роторли асинхрон двигателларни тўғридан-тўғри тармоққа улаб юргизиш мумкин. 114-расмда асинхрон двигателни магнитли юргизгич ёрдамида тўғридан-тўғри тармоққа улаш схемаси кўрсатилган.

б) Тармоқ кучланишини пасайтириб юргизиш. Юргизишнинг бундай усули катта қувватли қисқа туташтирилган роторли асинхрон двигателларни юргизишда, шунингдек, қуввати унча катта бўлмаган электр тармоқларида ўртача қувватли двигателларни юргизишда қўлланилади. Асинхрон двигателнинг юргизиш токи тармоқ кучланиши қийматига тўғри пропорционал. Тармоқ кучланишининг қиймати маълум даражада камайтирилса, юргизиш токи ҳам камаяди. Тармоқ кучланиши қийматини автотрансформатор (ёки оддий трансформатор) ёрдамида; статор чулғамларини уланиш схемаларини ўзгартириш



114- расм.



115- расм.

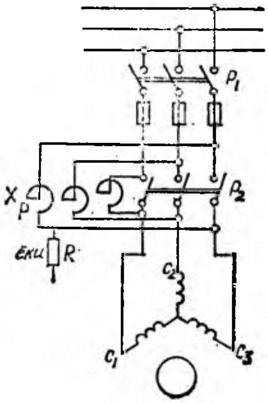
йўли билан ҳамда статор чулғамларига актив ёки реактив қаршиликни кетма-кет улаш йўли билан пасайтирилади. Қуйида бу усуллар билан танишамиз.

1. Статор чулғамини юлдуз усулидан учбурчак усулига ўтказиш йўли билан юргизиш. Асинхрон двигателнинг статор чулғамлари кўпинча учбурчак усулида уланади. Чулғамлар учбурчак усулида уланганда юргизиш токи анча катта бўлади. Агар чулғамлар юлдуз усулида уланса, айрим фаза чулғамларига бериладиган кучланиш $\sqrt{3}$ марта камаяди, демак, фаза токлари ҳам $\sqrt{3}$ марта камаяди. Бунда линия токлари уч марта камаяди. Статор чулғамларининг уланиш схемасини ўзгартириш уч фазали переключатель *П* ёки контактор ёрдамида бажарилади (115-расм). Асинхрон двигатель юргизилаётганда переключатель *1* вазиятда бўлади. Бунда статор чулғамлари юлдуз усулида уланган бўлади, юргизиш токи анча кичкина бўлади. Двигатель юргизилгандан сўнг переключатель чаққонлик билан *2* вазиятга ўтказилади. Бунда статор чулғамлари учбурчак усулида уланиб қолади ва двигатель нормал шароитда ишлайди. Демак, двигателнинг статор чулғами юлдуз усулидан учбурчак усулига ўтказилиб юргизилса, тармоқдаги юргизиш токи уч марта камаяр экан. Двигателнинг юргизиш моменти тармоқ кучланиши квадратига тўғри пропорционал ($M \equiv \dot{U}_1^2$) бўлгани учун юргизиш вақтида айлантирувчи моментнинг қиймати ҳам уч марта камаяди. Шунинг учун номинал нагрузка билан юргизиладиган двигателларни бу усул билан юргизиб бўлмайди. Юргизиш вақтида айлантирувчи моментнинг (юргизиш моментининг) камайиши бу усулнинг камчилиги ҳисобланади.

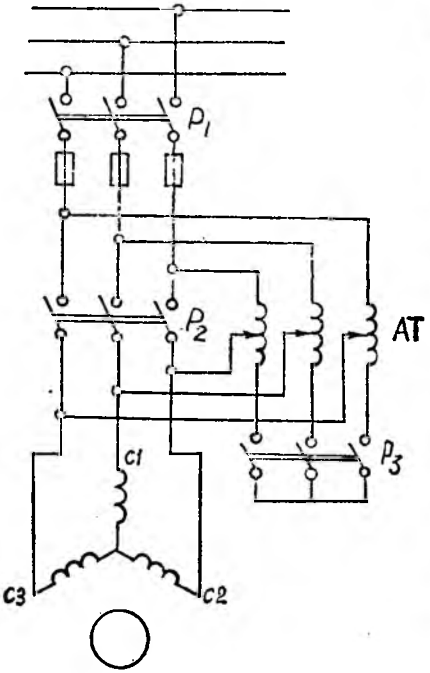
2. Асинхрон двигатель статорининг чулғамига актив ёки реактив қаршилик улаб юргизиш Юргизиш вақтида реактив ёки актив қаршилик статор чулғамига кетма-кет уланади (116-расм). Асинхрон двигатель 1-рубильник ёрдамида тармоққа уланади, бу вақтда 2-рубильник очиқ ҳолатда бўлади. Статор чулғамига ток реактор орқали ўтади ва унинг индуктив қаршилигида ($x_р$) кучланиш пасаяди ($\dot{I}_1 x_р$). Статор чулғамларига пасайган кучланиш $\dot{U}_1^1$ берилади. $\dot{U}_1^1$ кучланишнинг қиймати қуйидагича аниқланади:

$$\dot{U}_1' = \dot{U}_1 - j\dot{I}_1 x_р.$$

Бу кучланиш таъсирида двигатель юриб кетади. Айланиш тезлиги ортиб борган сари ротор чулғамида ҳосил бўладиган ЭЮК $\dot{E}_2$ камайиб боради, бунда юргизиш токи ҳам камаяди. Натижада чулғам билан кетма-кет уланган қаршиликларда кучланиш пасайиши ҳам камаяди, бунда двигателга бериладиган кучланиш $\dot{U}_1$ двигателнинг тезлиги ортган сари автоматик равишда кўпайиб боради. Двигатель юргизилгандан сўнг 2-рубильник уланади ва двигателга тармоқ кучланиши $\dot{U}_1$ берилади, бунда у нормал



116- расм.



117- расм.

шароитда ишлай бошлайди. Тармоқ кучланишининг $\frac{U_1'}{U_{1н}}$ марта камайиши натижасида юргизиш моментининг $\left(\frac{U_1'}{U_{1н}}\right)^2$ марта камайиши бу усулнинг камчилиги ҳисобланади. Турли двигателларни юргизиш учун лозим бўлган реактор қаршилиги қуйидаги формула билан аниқланади:

$$x_р = \frac{U_{1н}(1 - K_р)}{K_р I_ю}, \qquad (3\text{-}51)$$

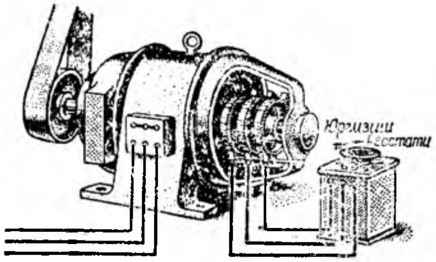
бу ерда: $\dot{U}_{1н}$ — статор чулғамининг номинал фаза кучланиши; $I_ю'$ — реактор ёрдамида юргизиш токи; $I_ю$ — двигателни тўғридан-тўғри тармоққа улаб юргизилгандаги юргизиш токи.
Бу ерда

$$k_р = \frac{I_ю'}{I_ю}.$$

Одатда, бу усул учун $k_р = 0{,}65$ га тенг.

3. Асинхрон двигателни автотрансформатор ёрдамида тармоқ кучланишини пасайтириб юргизиш (117-расм). Схемада учта рубильник ишлатилади. Дастлаб авто-

трансформатор чулғамларини юлдуз усулида улайдиган 3-рубильник ёпилади, сўнгра уни тармоққа улайдиган 1- рубильник уланади ва двигателга пасайтирилган кучланиш U_1' берилади. Юргизиш токи k_a марта камаяди. k_a автотрансформаторнинг трансформация коэффициентидир. Бунда автотрансформаторнинг бирламчи чулғамида юргизиш токи k_a^2 марта камаяди, чунки кучланишни пасайтирувчи автотрансформаторда бирламчи чулғам токи унинг иккиламчи чулғам токидан K_a марта кичикдир Демак, двигатель автотрансформатор ёрдамида юргизилганда юргизиш токи уни тўғридан-тўғри тармоққа улангандаги юргизиш токидан K_a^2 марта кам бўлади. Агар двигатель учун $m = 6$ бўлса ва тармоқ кучланиши автотрансформатор ёрдамида 380 В дан 220 В гача камайтирилса: $\frac{I_ю'}{I_ю} = \frac{m}{K_a^2} = \frac{6}{\left(\frac{380}{220}\right)^2} = 2$. Демак, бу шароитда двигатель юргизилганда унинг номинал токидан фақат 2 марта катта юргизиш токи ҳосил бўлар экан.



118- расм. Фаза роторли асинхрон двигатель ва юргизиш реостати.

Двигателнинг ротори айланиб кетгандан сўнг 3-рубильник узилади. Бунда автотрансформатор реактив қаршиликка айланади ва статор чулғамига бериладиган кучланиш бир оз кўпаяди. Ниҳоят, 2-рубильник ёпилади ва двигатель тармоқдан номинал кучланиш олиб ишлай бошлайди. Автотрансформатор ёрдамида двигателни юргизиш уч босқичда бажарилади: биринчи босқичда двигателга номинал кучланишнинг 50 . . .70%; иккинчи босқичда номинал кучланишнинг 70 . . .80% ва охирги босқичда унга тўла номинал кучланиш берилади.

54. Фаза роторли асинхрон двигателни юргизиш

Фаза роторли асинхрон двигателларнинг статорида ҳам, роторида ҳам уч фазали чулғам бўлади. Роторнинг уч фазали чулғами юлдуз усулида уланган бўлади. Ротор чулғами учлари валда ўрнатилган ва ундан изоляцияланган учта контакт ҳалқаларга уланади. Махсус чўтка тутгичларда турадиган, мис пластинкаларидан ёки кўмирдан ишланган чўткалар контакт ҳалқаларда сирпанади, чўткалар роторнинг ташқи клеммасига уланади.

Фаза роторли асинхрон двигателлар махсус уч фазали юргизиш реостати ёрдамида юргизилади (118-расм). Юргизиш реостати ротор чулғами билан кетма-кет уланади, реостатнинг айрим фазалари юлдуз усулида уланган бўлади. Юргизиш реостати ёрдамида роторнинг актив қаршилигини ошириб, юргизиш токи