

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ**  
**ОЛИЙ ВА ЎРТА МАХСУС ТАЪЛИМ ВАЗИРЛИГИ**  
**ТОШКЕНТ ТЎҚИМАЧИЛИК ВА ЕНГИЛ САНОАТ ИНСТИТУТИ**

*Қўлёзма ҳуқуқида*  
**УДК 62-83:677.052**

**Эгамберганоў Дилмурод Икромович**

**Тўқимачилик машиналари учун микропроцессорли  
электр юритмани ишлаб чиқиш**

**5A5311001 – Технологик жараёнлар  
ва ишлаб чиқаришни автоматлаштириш**

**Магистр**  
**академик даражасини олиш учун ёзилган**  
**диссертация**

**Илмий раҳбар:**  
**т ф.д., проф. Арипов Н.М.**

**Тошкент-2018**

## МУНДАРИЖА

|                |  |    |
|----------------|--|----|
|                | <b>Кириш</b> .....   | 2  |
| <b>I боб</b>   | <b>Муаммонинг бугунги кундаги ҳолати ва масаланинг қўйилиши</b> .....  | 7  |
| 1.1.           | Йигирув машиналарининг ростланадиган электр юритмаларига талаблар.....   | 7  |
| 1.2.           | Муаммонинг бугунги кундаги ҳолати ва мавжуд аналоглар тўғрисида маълумотлар .....  | 10 |
| 1.3.           | Частота ўзгарткичини ишлаб чиқиш учун асосий техник маълумотлар .....  | 16 |
| <b>II боб</b>  | <b>Электр юритманинг бошқариш алгоритмини тузиш ва тузилмасини аниқлаш</b> .....   | 18 |
| 2.1.           | Асинхрон двигателларнинг бошқариш схемалари ва бошқаришнинг асосий усуллари.....   | 18 |
| 2.2.           | Электр юритма тизимининг микропроцессорли бошқариш схемасига қўядиган асосий талаблари.....  | 27 |
| 2.3.           | Частотавий бошқариладиган электр юритмаларнинг тузилиши ва унинг рақамли бошқариш алгоритмини тузиш.....                               | 32 |
| <b>III боб</b> | <b>”Частота ўзгарткич – асинхрон двигател” тизимида двигателнинг статор токини модули бўйича бошқариш усулини тадқиқот қилиш</b> ..... | 36 |
| 3.1.           | Частота ўзгарткичларни бошқариш усуллари ва тузилмалари.....   | 36 |
| 3.2.           | Асинхрон двигателнинг статор токини модули бўйича бошқариш усули.....  | 42 |
| 3.3.           | Двигател статор токининг модули бўйича бошқариладиган ЭЮ лардаги электромагнит жараёнларини тадқиқот этиш.....                         | 45 |
|                | <b>Хулоса</b> .....  | 59 |
|                | <b>Адабиётлар рўйхати</b> .....  | 62 |
|                | <b>Илова</b> .....   |    |

## КИРИШ

*Магистрлик диссертацияси мавзусининг асосланиши ва унинг долзарблиги.* Бугунги кунда ишлаб чиқарилаётган электр энергиясининг 60% дан кўпроғини электр юритма тизимлари сарфлайди. Истеъмол этилаётган электр энергиясининг асосий улуши (50% гача) кенг тарқалган оддий, ростланмайдиган қисқа туташган роторли асинхрон двигател (АД) лар асосида тузилган электр юритмага тўғри келади. Кўп холларда АД ли электр юритмалар ўрнатилган саноат қурилмаларида юклама моменти вақт бўйича ўзгариб туради. Бу эса электр энергиясини исрофларига сабаб бўлиб, тармоқдаги қувват коэффициентини пасайтиради. Аниқ бир ҳолат учун сезиларли бўлмаган энергиянинг исрофи республика миқёсида катта ҳажмга эгадир. Бундан ташқари, ўта юкланиш пайтидаги АД нинг юргизиш ва химоялаш муаммолари мавжуд.

Технологик қурилмаларнинг турли-туманлиги, улардаги тезликни ростлаш талаб қилмаслиги, энергетик жихатдан унча юқори бўлмаган талабларни қўйувчи ўтиш жараёнлари, уларда химоя ва носозликларнинг диагностикасини таъминлаш имкониятига эга бўлмаган, лекин арзон бўлган асинхрон электр юритмаларини ишлатилатишни тақозо этади. Бундай қурилмаларнинг ишончлилигини паст даражада бўлиши оқибатида юритмадаги АД ларнинг тез ишдан чиқишига сабаб бўлади.

Юқорида айтиб ўтилган масалаларни ечимини таъминлаб берувчи жихоз – частота ўзгартгич билан жихозланган АД ли умумсаноат юритмасидир. Кейинги ўн йиллар ичида кучли токли электроника ва микропроцессорли техниканинг ривожланиши ҳамда уларнинг нархини кескин пасайиши, ҳозирда кенг тарқалган электр юритмаларда частота ўзгарткичларни қўллашниши иқтисодий жихатдан мақсадга мувофиқ бўлмоқда. Лекин частота ўзгарткичлардан фойдаланиш жараёни чекланганлиги, яъни уларни технологик қурилмалардаги давомли ёки қисқа-такрорланувчан

режимларда рационал ишлаши ва тезликни раvon ва катта диапазонда ростланиши талаб қилиниши билан боғлиқдир.

Шунинг учун, ишончли ва арзон частота ўзгарткичларни яратиш, уларни қўлланиш сохаларини кенгайтиради ва шу билан бирга, эскирган қурилмаларни модернизациялаш имкониятини амалга оширади. Ўзгарткичларни қўллаш, минимал сарф-харажатлар орқали ишлаб чиқарилаётган махсулот сифатини ва технологик муаммоларини ечилишини таъминлайди. Лекин частота ўзгарткичларни ишлатиш ёрдамчи электр механик датчикларни ўрнатилишини талаб қилиб, АД нинг юргизиш жадаллигини чеклайди. Бу эса технология талаблари бўйича хар доим хам тўғри келмайди. “Частота ўзгарткич-асинхрон двигател” тизими асосида қурилган датчиксиз электр юритмаларни ишлаб чиқиш бундай чеклашларни бартараф қилиш имкониятини беради.

***Тадқиқот объекти ва предмети.*** Замонавий ярим ўтказгичли ва микропроцессорли техникани ишлатиш орқали яратилган частота ўзгарткичларнинг янги тузилмаси диссертациянинг тадқиқот объектидир. Ишда тадқиқот предмети сифатида саноат корхоналаридаги мураккаб технологик жараёнларни автоматлаштиришни амалга оширувчи микропроцессорли бошқариладиган “частота ўзгарткич-асинхрон двигател” тизими бўйича ростланадиган асинхрон электр юритма қабул қилинган.

***Тадқиқот мақсади ва вазифалари.*** Диссертациянинг мақсади частота ўзгарткичларнинг янги тузилмасини ҳамда бошқариш схемасини яратишда замонавий ярим ўтказгичли ва микропроцессорли техникани ишлатиш масалалари кўриб чиқиш, бундай юритманинг характеристикалари ва хоссаларини ўрганишни амалга ошириш, олинган натижаларни энергия ва ресурсларни тежовчи технологик қурилмалар ҳамда жараёнларни автоматлаштиришга тадбиқ этиш бўйича тавсияларни ишлаб чиқишдир. Мақсадга кўра, ишда қуйидаги тадқиқот вазифалари ечилган: муаммонинг бугунги кундаги ҳолати ва масаланинг қўйилиши ҳамда частота ўзгарткичини ишлаб чиқиш учун асосий техник маълумотларни аниқлаш; асинхрон

двигател-ларнинг бошқариш схемалари ва бошқаришнинг асосий усуллари кўриб чиқиш; ”частота ўзгарткич-асинхрон двигател” тизимида двигателнинг статор токини модули бўйича бошқариш усули тадқиқот қилиш; электр юритмани микропроцессорли бошқариш тизимининг оптимал архитектураси ва дастурий таъминотини яратиш масалалари кўриб чиқиш; олинган натижаларни тадбиқ этиш бўйича тавсияларни бериш.

**Илмий янгилиги.** Ишда биринчи мартаба, частота ўзгарткичли асинхрон электр юритманининг янги тузилмаси яратиш учун унинг бошқариш схемасида ЎЗР да патентланган статор токининг модули бўйича бошқариш усулидан фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг асосий масалалари ва фаразлари.** Тадқиқотнинг асосий масалалари – муаммонинг бугунги кундаги ҳолати ва масаланинг кўйилиши-ни ўрганиш, частота ўзгарткичларнинг янги тузилмасини ҳамда бошқариш схемасини яратиш, “частота ўзгарткич-асинхрон двигател” тизими бўйича ростланадиган асинхрон электр юритманинг характеристикалари ва хосса-ларини ўрганишдир. Тадқиқотнинг фаразлари – текстил корхоналаридаги мураккаб технологик жараёнларни автоматлаштиришни амалга оширувчи микропроцессорли бошқариладиган электр юритмани яратиш.

**Мавзу бўйича қисқача адабиётлар шарҳи (тахлили).** Ишда замонавий автоматик, электр юритма ва кучли токли ўзгарткич техникаси назарияси, микропроцессорли технологик жараёнларни автоматлаштириш тизимлари частотавий ростланадиган асинхрон электр юритма ва унинг рақамли бошқариш схемалари, уларнинг дастурий таъминоти масалаларига бағишланган меъёрий, илмий, ўқув адабиётлари ҳамда илмий-техник ва илмий-услубий даврий нашрлар, шунингдек интернет материалларидан фойдаланилди.

**Тадқиқотда қўлланилган методиканинг тавсифи.** Частотавий ростланадиган асинхрон электр юритма ва кучли токли ўзгарткич ва микро-

процессор техникасининг замонавий бошқариш тизимлари ҳамда автоматик бошқариш назариясининг услубияти ва усуллари, фазовий ҳолатлар усули ва матрицали таҳлил.

***Тадқиқот натижаларининг назарий ва амалий аҳамияти.***

Асинхрон двигателнинг статор токини модули бўйича бошқариш янги патентланган усули тадқиқ этилди; усул асосида ростланадиган электр юритманинг микропроцессорли бошқариш тизимининг оптимал архитектураси ва дастурий таъминотини яратиш масалалари кўриб чиқилди. Диссертацияда олинган натижаларни текстил корхоналаридаги технологик жараёнларни автоматлаштирувчи электр юритмаларда қўллаш тавсия этилади, шунингдек ушбу материалларни ихтисослик фанларида ҳам қўлланма сифатида ишлатилиши мумкин.

***Диссертация таркибининг қисқача тавсифи.*** Магистрлик диссертацияси кириш, учта боб, хулосалар, фойдаланилган ва ўрганилган адабиётлар рўйхати ҳамда иловалардан ташкил топган. Ишнинг умумий ҳажми 66та бет, 21-расм ва 2-жадваллардан иборат. Фойдаланилган ва ўрганилган адабиётлар рўйхатида 44та адабиёт, 3та интернет сайтлар келтирилган.

# **1. МУАММОНИНГ БУГУНГИ КУНДАГИ ХОЛАТИ ВА МАСАЛАНИНГ ҚЎЙИЛИШИ**

## **1.1. Йигирув машиналарининг ростланадиган электр юритмаларига талаблар**

Йигирув машиналари тўқимачилик корхоналарининг йигирув ишлаб чиқаришнинг якуний бўғини бўлиб, у хом ипдан йигирилган ипни хосил қилиш учун мўжалланган. Йигирув машиналарининг кўплаб турлари мавжуд, буларнинг асосий турларидан бири халқали йигирув машиналаридир, улар йигирилган ипни тортиш, эшиш ва ўрашни амалга оширади. Хозирда, йигирув ишлаб чиқаришда пневмомеханик йигирув машиналари кенг қўлланишга эга.

Йигирув машиналари йигирув ишлаб чиқаришнинг энг кўп энергия истеъмол қилувчи машиналаридир. Улар йигирув ишлаб чиқаришдаги электр энергияни 50...60% ни истеъмол қилади.

Йигирув машиналарига қўйиладиган асосий талаб – бу тезликни ростлашдир. Бунинг натижасида, ипни ўрашдаги тарангликни ўзгармаслиги таъминланади. Ўрашдаги тарангликни камайиши ёки кўпайиши, ипга кейинги ишлов беришлардаги узилишларни ортишига ва шу сабабли меҳнат унумдорлигини пасайиши ва яроқсиз маҳсулотларни кўпайишига олиб келади [19, 28].

Йигириш жараёнида ипнинг таранглиги ўзгармас холда қолмайди, балки ипни йигиришда узлуксиз равишда ўзгариб туради. Йигириш жараёнидаги ипнинг таранглиги бир қатор сабабларга боғлиқ бўлади, булардан асосийлари – ўралиш баллонининг шакли (у асос баландлигининг ўзгариши билан ўзгариб туради), ва ўраш амалга ошириладиган асос диаметри.

Ипнинг таранглиги, баллон узунлиги бўйича кичик, яъни бикрроқ бўлиб қолганда ортади. Ипнинг таранглиги, у агар асоснинг кичик диаметрига ўралса, катта, ёки катта диаметрга ўралганда эса – кичик бўлади. Шунинг учун, ростлаш шундай амалга оширилиши керакки,

таранглик ортганда веретеналарнинг айланиш тезлиги камайиши керак ва аксинча.

Мос равишда, ўрашнинг бошида ва охиридаги тезликни камайтириш, асосий ёки базавий ростлаш деб номланади. Битта қатламни ўраш давомидаги тарангликни тенглаштириш учун қатламли ростлаш деб номландиган ростлаш керак бўлади.

Йигирув машиналарининг электр юритмалари одатдаги қисқа туташув роторли асинхрон двигателдан амалга оширилади. Йигирув машиналари истеъмол қиладиган қуввати, уларнинг конструктив элементлари ва технологик кўрсаткичларига, шу жумладан, веретеналар сони ва уларнинг айланиш тезлиги, веретеналар орасидаги масофа, халқа диаметри, асоснинг тўли-ши ва йигирилган ипнинг чизиқли зичлиги ва бошқаларга боғлиқ бўлади.

П-76-5М4 туридаги йигирув машина пахта толосидан 10... 50 тексли йигирилган ипни ишлаб чиқариш тучун мўжалланган. Машинадаги веретеналар сони 240 дан 384 гача (24 та веретена карралиги билан) дир.

Машинанинг бошқариш схемаси қуйидагиларни: двигателни ўта юкла-малар ва қисқа туташуш токидан химоялаш, ўрашни бошлашни кичик тезликда ва тугатишни катта тезликда амалга ошириш, ўраш тугагандан сўнг эса автоматик тарзда машинани тўхтатишни таъминлайди

Машина асосий узатмасининг электр юритмасидаги кичик тезликдаги двигатели  $M2$  уланганда, ипни ўраш кичик узилишлар билан бошланади, катта тезликдаги двигател  $M1$  уланганда эса машина ишчи тезликка ўтади. Ўраш тугагандан сўнг двигател  $M1$  узилади ва двигател  $M2$  яна ишга туши-рилади, шунинг учун ўраш яна кичик тезликда бошланади. Йигирув машиналарининг электр юритмаларига қуйидаги асосий талаблар қўйилади [25]:

1. Машинани ишга тушириш вақтини 5...7 с оралиғида таъминлаш; бундан тезроқ ишга туширишда ипнинг узилиши содир бўлади, секинроқда эса сиртмоқлар хосил бўлиб, тугунлар пайдо бўлади.

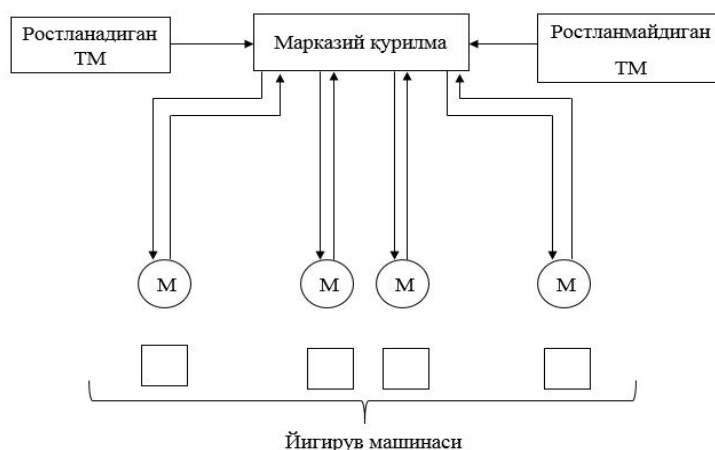


2. Асос тўлиши бароварида тезликни базавий ва қатламли ростлашларини таъминлаш.

Хозирда, йигирув машиналари учун тиристорли частота ўзгартиргичга эга ростланадиган асинхрон электр юритмалар ишлаб чиқарилган. Ушбу электр юритмалар ҳам якка холдаги ҳам марказлаштирилган бошқариш усулида кенг қўллаш мумкин.

Марказлаштирилган бошқариш усули машиналар гуруҳини битта ўзгар-тиргичга улашни амалга оширади. Кўп холларда ортирилган узилишлар йигириш циклининг кичик қисмини эгаллайди, шунинг учун, асоснинг тўли-ши бароварида ўзилишларни тенглаштириш имкониятини берувчи базавий ростлашни ҳам йигириш циклининг кичик қисмида амалга оширилади. Қол-ган вақт давомида веретеналарнинг айланиш тезлиги ўзгармасдир. Бу тезлик ростлагичидан кам фойдаланишга олиб келади.

Ростлагичнинг фойдаланиш коэффициентини ортириш, ва шу орқали бир йигирув машинасига нисбатан олиннадиган электр юритмага капитал сарфларни камайтириш учун, битта частота ўзгарткични қўллаган тарзда ҳалқали йигирув машиналари гуруҳининг айланиш тезлигини марказлаштирилган базавий ростлаш усули таклиф этилган (1.1-расм).



**1.1-расм. Йигирув машиналари гуруҳининг айланиш тезлигини марказлаштирилган бошқариш**

Бу усулда, ўрашнинг бошида, навбатдаги йигирув машинаси ишга туширилганда, унинг двигатели  $M$  ростланадиган таъминлаш манбаси (РТМ-РИП) га, мисол учун, тиристорли частота ўзгартиргичга уланади. Частота ўзгартиргич, ушбу машинанинг базавий датчиги томонидан бериладиган базавий дастур асосида веретеналарнинг айланиш тезлигини ўзгартиради. Ростлаш тугаллангандан сўнг, двигател автоматик тарзда ростланмайдиган таъминлаш манбаси (НИП) га уланади ва кейинчалик ўраш тугагунча ўзгармас айланиш тезлиги билан ишлайди. РИП бунда узилган ва навбатдаги йигирув машинаси ишга туширишга тайёр бўлади.

## **1.2. Муаммонинг бугунги кундаги ҳолати ва мавжуд аналоглар тўғрисида маълумотлар**

Ҳозирда саноат корхоналари учун бир қатор, қуввати 50 кВт ортик бўлган частота ўзгарткич ЧЎ ларни ишлаб чиқармоқда. Кенг тарқалган электр юритмалар учун ЧЎ ларни ишлаб чиқариш кичик хажмларда бажрилмоқда. Ушбу ўзгарткичлар ўзининг нархи бўйича хорижий ЧЎ ларнинг нархларига мос бўлсада, техник-иктисодий ҳамда эксплуатацион характеристикалар бўйича фарқларга эгадир. Ўзгарткичларнинг кучли токли қисми паст сифатли ярим ўтказгичлар асосида бажарилиб, бошқариш тизими эса рақамли-аналог дискрет компонентлардан тузилган. Шу сабабдан, куйида намуна сифатида хорижий ЧЎ ларни тахлили олиб борилган [11,12,15, 25,41,43,44].

Ростланадиган юритмалар учун ЧЎ ларни ишлаб чиқувчи машхур фирмалардан: ABB, SEWEURODRIUE, BOSCH, SIEMENS, TOSCHIBA кабилар ҳозирда муҳим ўрин эгаллаган. Фирмалар тавсия этаётган ўзгарткичлар ўзининг функционал хусусиятлари, нархи бўйича бир-бирига яқин бўлиб, ростланадиган электр юритмаларнинг ривожлантириш стратегиясида янги турдаги ярим ўтказгичли компонентлар қўлланилган. Хар йили, ташқи бозорда электр юритмалар учун турли фирмалар ишлаб чиққан янги тузилишдаги ўзгарткичлар пайдо бўлмоқда. Куйида ABB (Asea Broueri) халқаро электротехник уюшмасига кирган ABB Driues

фирмаси яратган SAMI турдаги частота ўзгарткичларининг тузилиши ва имкониятлари кўриб чиқилган.

SAMI турдаги ўзгарткичлар қисқа туташув роторли АД нинг тезлигини ровон ростлаш учун қўлланилади ва қуйидаги ЧЎ лар турини ўз ичига олади: SAMI MS, SAMI GS, SAMI STAR, SAMI MEGASTAR. Бу ўзгарткичлар микропроцессорли бошқарув ва диагностикасига эгадир. Бундан ташқари, улар клавиатура ва саккиз тилдаги маълумотни узатиб берувчи суюқ кристалли алфавит-рақамли дисплейга ҳам эга. Ушбу ўзгарткичларнинг кучли токли занжирида бошқарилмайдиган тўғрилагич ва импульс кенглиги бўйича модуляция ШИМ ли кучланиш инвертори ишлатилади. Бунда, тўғрилагич ҳамда кучланиш инвертори ўзаро кучли токли LC-фильтри орқали уланиб, силтаниш массаларининг энергияси шу филтлда тарқалади. Номинал ишчи режимда, ўзгармас ток бўғинидаги кучланиш ўзгармайди ва у SAMI нинг чиқишидаги частотасига боғлиқ бўлмайди. Кучли токли занжирнинг уланишига кўра, ўзгарткичнинг қувват коэффициенти 0,98...0,99 га тенг бўлган холда сақланиб турилади. ЧЎ ларнинг кучланиш инверторларида МОП-транзисторлар ва биполяр транзисторлар қўлланилган. Транзистор-ларнинг бошқарилиши махсус (ASIC) интеграл схемалар ёрдамида бажа-рилиб, у хавфсиз иш зонасида коммутацияни бажарилишига имкон беради. Импульс кенглиги бўйича ростланадиган модуляциянинг йўналтирувчи частотаси 3,0 дан 12,0 кГц гача бўлиб, двигателнинг 100% ли фойдали юкланишини ҳамда двигателни танлашда қувват бўйича минимал захирага келтиради.

SAMI MS турдаги ўзгарткичлар, қуввати 0,75 дан 3,0 кВт гача бўлган АД лар учун мосланган бўлиб,  $U/f = \text{const}$  бошқариш қонунини таъминлайди. Чиқишдаги частотанинг ростлаш диапазони 0,5...400,0 Гц га тенг. SAMI GS турдаги ўзгарткичлар қуввати 2,2 дан 315,0 кВт гача бўлган АД ларнинг тезлигини ростлашда ишлатилади. Чиқишдаги частотанинг ростланиш диапазони бунда 0 дан 120 Гц га тенгдир. Контроллернинг хотирасида бир қатор амалий макродастурлар мавжуд бўлиб, бунда кириш

ва чиқиш сигналлари белгиланиб, хар қайси амалий масала учун кўрсаткичнинг бошланғич қиймати берилган. Масалан, макродастур ПИ-ростлашнинг ўзгармас момент режимида амалга оширишни таъминловчи операцияларини кетма-кет бошқаради. Ўзгарткичларнинг конструктив тузилиши куйидагилардан иборат: P21 (истеъмолчи қурилмага киритилаётган махсус модул) ва IPOO (қуввати 37,0 кВт дан ортиқ бўлганлар истеъмолчилар учун шкаф). Бу турдаги ўзгарткичлар кенг тарқалган датчиксиз ЭЮ ларда ишлатилади ва қўлланишда бир қатор чегараларга эга. Булар, юклама моментининг юргизиш жадаллиги ва динамикаси бўйича чегаралар ҳамда ўзгарткичнинг фақат ўзгармас ёки квадрат даржадаги юклама момент учун ишлатиш мумкинлигидир [47,48].

Хозирда АВВ фирмасидан ташқари SEW-EURODRIVE фирмаси ҳам ўз махсулотини тавсия этмоқда, хусусан, ушбу фирма АД ларнинг тезлигини ростлаш учун MOVITRAC турдаги ўзгарткичларни ишлаб чиқмоқда.

SEW-EURODRIVE фирмаси MOVITRAC 4000 турдаги ўзгарткични қуввати 22, 30, 45 ва 55 кВт тенг бўлган АД лар учун ишлаб чиқармоқда. Бундай ўзгарткичлар микропроцессорли бошқарувига асосланган. Кучланиш инверторида IGBT транзистори қўлланилган. MOVITRAC 4000 турдаги ўзгарткич ўзининг тузилиши, сервис функциялари ва кўрсаткичлари бўйича АВВ Driues фирмаси чиқарган SAMI GS сериясига ўхшашдир. Бугунги кунда MOVITRAC 3000 ва MOVITRAC 31В деб номланган янги сериялар ишлаб чиқилиб, улар SIEMENS фирмаси тайёрлаган янги 80 С166 микроконтроллер ёрдамида бошқарилади [41,44].

Кўриниб турибдики, юқори кучланишли МОП ёки биполяр транзистор-лари ўзгарткичларнинг янги серияларда ишлатилмайди. Буларда юқори кучланишли IGBT транзисторларидан фойдаланилган. Биполяр транзисторларга кўра ўзининг тезкорлиги, ишончилиги, иқтисодий тежамлилиги ва схематик соддалиги IGBT транзисторларнинг кенг тарқалишига олиб бўлган. IGBT асосида бошқарилаётган кучли токли

транзисторли калитларда стандарт сигнални процессор оркали бошқариш қулайдир [30,31,33].

ЭЮ ларда кенг ишлатилиши мумкин бўлган ўзгарткичларнинг функционал схемаси ва элемент базасининг тахлили қуйидаги хулосаларни беради:

1. АД ли ЭЮ ларнинг бошқариш схемаси асосан оддий қонун:  $U/f = \text{const}$  бўйича олиб борилади. Бундай бошқаришнинг қўлланиши, микроконтроллерларнинг қуввати етишмаслиги билан боғлиқдир (бошқариш алгоритми, назорат, диагностика ва бирданига бир неча мураккаб бошқариш усуллари қўллашга қувватни етишмаслиги).

Электромеханик тескари боғланишларни мавжудлиги, векторли бошқарувни амалга ошириш имкониятини беради. Мисол учун, SAMI STAR ва MOVIDYN, тизимлари бундай бошқарувни таъминлай олади. Лекин, бугунги кунда ЭЮ тизимларининг микропроцессорли бошқарилишида сигналларни рақамли қайта ишловчи процессор DSP лар кенг ривож топган. ANALOG DEVICES ва MOTOROLA, фирмалари ЭЮ ларни бошқарадиган махсус DSP лар ишлаб чиқаргани тўғрисида эълон қилган. Бундай процессорларнинг самарадорлиги бир даража юқори бўлиб, уларни ростлаш имкониятлари сифатли ва кенгдир.

Шундай қилиб, хорижий фирмалар ишлаб чиққан ЧЎ лар умумсаноат ЭЮ тизимларида ишлатилиб, нисбатан содда бошқариш алогритми ёрдамида фақат статик ёки вентилятор юкламаси остида двигател тезлигини ростлаш имконини беради. Бундай юритмаларни эксплуатация қилиш мураккаблиги эса, уларга бўлган сарф-харажатларнинг ошишини тақозо этади.

2. Йиғма биполяр транзисторлар янги ЧЎ ларда ишлатилмаган. Ўзгарткичларнинг кучли токли занжирларида фақат MOSFET ва IGBT транзисторлари ўрнатилиб, уларни бошқариш махсус (ASIC) интеграл схемалар ёрдамида бажарилган. Кичик қувватли тизимларда

SMARTMOSFET модуллари қўлланилиб, уларда 1, 2 ёки 6 та MOSFET транзисторлар битта корпусда ўрнатилган.

Республика саноат корхоналари бундай ярим ўтказгичларни ишлаб чиқармайди. Шу сабабдан, яратилаётган ўзгарткичлар TOSHIBA, INTERNATIONAL, RECTIFAIR, SIEMENES, SIMECRON каби фирмаларининг ярим ўтказгичларидан фойдаланган ҳолда бажарилиши зарур.

3. Ўзгарткичларнинг ҳар бир тури, маълум бир электр машина турига мосланган. Баъзида, ўзгарткичлар электр машиналар билан бирга яхлит комплект кўринишида истеъмолчига етказилади. Республика истеъмолчилари учун бундай ҳолат тўғри келмайди, чунки, ҳозирда фойдаланилаётган электр машиналари хорижий фирмаларнинг электр машиналаридан арзон бўлиб, ўз характеристикаларига кўра уларнинг даражасидадир.

Қўйилаётган вазифа, ўзгарувчан ток электр юритмаси тизимларини ҳосил қилувчи универсал частота ўзгарткичини ва унинг бошқариш схемаси ҳамда диагностикасини ишлаб чиқишни ўз ичига олган. Лойихалаштирилаётган ЧЎ функционал жихатдан мукамал бўлиб, қуйидаги талабларга жавоб бериши зарур:

- кенг тарқалган ЭЮ ларда қўлланиши;
- юқори эксплуатацион характеристика (ишончлилиқ, ривожланган диагностика, хизмат кўрсатиш, ишлатилишдаги қулайлик ва бошқалар) ларга эгаллиги;
- умумсаноат турдаги синхрон (ДВУ, ДВМ ва бошқалар) ва асинхрон (4 А, АИР, 5А ва бошқа) машиналар бирикмасида ишлаш имконияти;
- сифатли ЭЮ лар тизимини қуришдаги юқори техник кўрсаткичларига эгаллиги;
- хорижий аналогларга рақобатбардошлиги.

ЭЮ нинг техник характеристикалари ва унинг кучли токли занжирларидаги электромагнит жараёнлар, нафақат электр машинанинг тури, унинг валидаги юкламага боғлиқ бўлиб, балки ЧЎ нинг схемаси ҳамда

бошқарув тизимининг алгоритми ва бошқариш қонунларига ҳам боғлиқ бўлади.

Шу сабабдан, ЭЮ ни лойихалаштиришдан олдин, дастлаб, электр машинанинг турига кўра, унинг юкламаси тахлил қилинади. Бошқариш қонуни белгиланиб, ахборотли боғланишларнинг тузилиши ҳам аниқланади. Олинган тахлилий натижалар асосида, ЧЎ нинг схемаси ҳамда бошқариш алгоритми аниқланиб, ЭЮ нинг талаб қилинаётган характеристикалари қурилади.

Ушбу лойихада эса тесқари масалани ечиш олиб борилади. Бунда мавжуд ЧЎ нинг универсал схемасига кўра, ЭЮ ни тузиш амалга оширилади. Масаланинг бундай қўйилиши, нисбатан мураккаб ва қиммат турадиган қурилмани яратишни талаб қилади.

Лекин, электромеханик ва энергетик жихатдан афзалроқ характеристикаларга эга бўлган ҳамда содда кўринишдаги ЧЎ ларнинг ишлатилиши датчиксиз ЭЮ ларни яратишга ва уларнинг харидорлари сонини ошишига олиб келади. Қўйилган масаланинг ечими қуйидаги тахлил ва ишламаларга асосланади:

1) ЭЮ тизимида юқори энергетик характеристикаларни таъминловчи ва ярим ўтказгичли элементлар базасининг хусусиятини ҳисобга олувчи ўзгарткичнинг кучли токли қисмини оптимал тузилиши, схематик жихатдан ишончилиги, диагностика жихатдан содда ва қулайлиги;

2) Саноат электр тармоғи билан осон бириктириш имконини берувчи ЭЮ нинг юқори ростлаш ва энергетик характеристикаларни таъминловчи ЧЎ нинг бошқариш алгоритми;

3) АД лар асосида ва электромеханик датчикларсиз қурилган ЭЮ ларни талаб қилинадиган механик ва энергетик характеристикаларни амалга оширувчи частота-токли бошқариш усули;

4) Юқори ишончилик ва маълумотлиликни таъминловчи системанинг диагностикаси ва ҳимоясининг тузилиши ва ишлаш алгоритми;

5) Контроллернинг оптимал архитектураси ва дастурий таъминланиши.

Амалий жихатдан бунда қуйидагиларни бажариш лозим:

- 1) Чиқишдаги қуввати 1 дан 10 кВт гача бўлган ЭЮ лар учун кучли токли ўзгарткичларни ишлаб чиқиш;
- 2) Ўзгарткичнинг макет нусхасини тайёрлаш ва уни АД билан биргалликда хар томонлама тажриба синовидан ўтказиш.

### **1.3. Частота ўзгарткичини ишлаб чиқиш учун асосий техник маълумотлар**

Частота ўзгарткичларнинг хорижий аналоглари бўлган MOVITRAC 31B, MOVITRAC-3000 ва SAMI GS ларнинг характеристикаларидан келиб чиққан ҳолда рақобатбардош электр юритма тизимини ишлаб чиқиш учун қуйидаги талабларни белгилаш мумкин [6,7]:

1. *Таъминлаш тармоғининг характеристикалари:* 380 В + 10% ли 3 фазали кучланиш; 48 - 63 Гц ли частота; >0,95 дан катта қувват коэффициенти.

2. *Ўзгарткичнинг чиқиш характеристикалари:* 0 дан тармоқ кучланишигача ростланадиган 3 фазали; 0 дан 400 Гц гача частота; 0,01 Гц ли частотанинг ўрнатиш дискрети; 20 А ли узоқ муддатли юклама токи ( $I_{ном}$ ); такрорланувчи-қисқа ишчи режимдаги хар 10 минутдаги 1 минут давомида 30 А ли максимал юклама токи; 3 кГц ли импульс кенглиги бўйича ўзгарткичнинг коммутация частотаси.

3. *Бошқариш сигналларининг тизими:* кириш ва чиқишнинг кетма-кет интерфейси; кириш ва чиқишдаги дастурланадиган аналог интерфейс; электромеханик қисм датчиклари билан боғловчи параллел интерфейс.

4. *Ҳимоялар:*

- токи  $3,75 I_{ном}$  бўлган ҳимоянинг ишлаш чегараси; кучли токли манбанинг 1,3 номинал кучланига тенг ўта кучланиш бўйича ишга тушиш вақти; кучли токли манбанинг кучланиши номинал қийматга нисбатан



0,65 га камайишидаги ишга тушиш чегараси; кучли токли элементларнинг радиаторларини 20<sup>0</sup>С дан кичик ва 75<sup>0</sup>С дан юқориқроқ бўлганда қизиш бўйича химоясини ишга тушиш чегараси; двигателнинг қизиш бўйича химоясини ишга тушиш чегараси – дастурланувчи; двигател фазасининг узилишидан химоя.

#### *5. Ишлатиш шароитлари:*

- 10<sup>0</sup>С дан +45<sup>0</sup>С гача бўлган атроф муҳит ҳарорати; совутиш усули – ўрнатилган ўзини-ўзи вентиляциялаш қурилмаси; 95% дан кам бўлган нисбий намлик.

Яратилаётган ўзгарткичларнинг йирик истеъмолчилари бўлиб ёқилғи-энергетика комплекси ва сувоқава ташкилотлари, тўқимачилик, енгил ва озиқ-овқат корхоналари, шунингдек, қишлоқ хўжалик, айниқса, қишлоқ хўжалиги маҳсулотларини қайта ишловчи кўп тармоқли корхоналар ҳисобланади. Қишлоқ хўжалиги маҳсулотларини қайта ишлаш узлуксиз технологик жараёнда олиб борилади. Шу сабабдан, ягона автоматлаштирилган оқимли линияларни ростландиган АЭЮ асосида тузиш қуйидаги имкониятларни яратиш беради:

- машина ва агрегатларда хом ашёни қайта ишлашнинг тезлик бўйича режимини оптималлаштириш ҳисобига тайёр маҳсулотнинг сифатини 1,7... 2,0 % гача ошириш билан бир вақтнинг ўзида маҳсулотнинг таннархини 1,5...1,8 % гача пасайтириш;

- операциялараро узилишларни йўқотиш ва тўхташларни камайиши ҳисобига маҳсулот сифатини пасайтирмасдан машиналарнинг самарадорлигини 2,0... 2,5 % гача ошириш, бунда назорат ҳамда транспорт операцияларига бўладиган вақт сарфларини смена давомийлигининг 5,5...8,0 % гача камайтириш имконияти ҳам яратилади;

- технологик жараённинг кечишини масофадан бошқариш ва диспечерли назоратини амалга ошириш, бунда, қурилмаларни оптимал иш режимини танлаш операцияларини бошқарувчи ЭХМ ёрдамида амалга ошириш.

## II. ЭЛЕКТР ЮРИТМАНИНГ БОШҚАРИШ АЛГОРИТМИНИ ТУЗИШ ВА ТУЗИЛМАСИНИ АНИҚЛАШ

### 2.1. Асинхрон двигателларнинг бошқариш схемалари ва бошқаришнинг асосий усуллари

Электр машиналар (ЭМ) ҳамда автоном кучланиш инверторларни (АКИ) турли усуллар билан бошқаришни таъминлаш, электр ва магнит қийматларнинг натижавий (умумлаштирувчи) вектор усули асосида амалга оширилади [10,18,27,28].

Умумлашган электр машиналарнинг электромагнит жараёнлари, натижавий векторлар орқали Горев - Парк тенгламалар тизими билан ифодалади [19]:

$$\begin{aligned}\bar{u}_s &= R_s \bar{i}_s + d\bar{\Psi}_s / dt + j\omega\bar{\Psi}_s; \\ \bar{u}_r &= R_r \bar{i}_r + d\bar{\Psi}_r / dt + j(\omega_k - \omega)\bar{\Psi}_r; \\ \bar{\Psi}_s &= L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r; \\ \bar{\Psi}_r &= L_m \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r\end{aligned}\tag{2.1}$$

Бунда  $\bar{u}_s, \bar{u}_r, \bar{i}_s, \bar{i}_r, \bar{\Psi}_s, \bar{\Psi}_r$  - кучланиш, ток, статор ва роторнинг оқим илашишларини натижавий векторлари;

$R_s, R_r, L_r, L_s, L_m$  – ЭМ нинг кўрсаткичлари бўлиб, паспорт қийматлари ёки тажрибавий йўл орқали аниқланади;

$\omega_k$  – координаталар тизимининг айланиш тезлиги,  $\omega$  – роторнинг айланиш тезлиги.

(2.1) тенгламаларда статор ва роторлардаги электромагнит жараёнлар  $\omega_k$  тезлик билан айланадиган ягона координаталар тизимида ёзилган. Натижада ЭМ нинг кўрсаткичлари ўзгармас қийматлар бўлиб, тургун режимда ток ва оқим илашишларининг натижавий векторлари бир-бирига нисбатан кўзгалмас бўлади.

Агар, (2.1) тенгламаларга ҳаво бўшлиғининг натижавий оқим илашиши  $\Psi_k$  киритилса, унда бу ифоданинг кўриниши қуйидагича ўзгаради:

$$\begin{aligned}
\bar{u}_s &= R_s \bar{i}_s + L_s \bar{i}_s / dt + d\bar{\Psi}_m / dt + j\omega_k \bar{\Psi}_m; \\
\bar{u}_r &= R_r \bar{i}_r + L_r \bar{i}_r / dt + d\bar{\Psi}_m / dt + j(\omega_k - \omega) \bar{\Psi}_m; \\
\bar{\Psi}_m &= L_m (\bar{i}_s + \bar{i}_r),
\end{aligned}
\tag{2.2}$$

бунда  $L_s = L_s - L_m$  и  $L_r = L_r - L_m$  – мос равишда, статор ва роторнинг тарқатма индуктивлиги.

Асинхрон машиналарнинг тахлили олиб борилаётганда, таянч векторга эга бўлаган  $x$ - $y$  координата тизими ишлатилади. Тизимни танлаш лойихалаштирилаётган бошқариш тизимининг тузилмасини белгилайди. Синхрон тезлик билан айланаётган ( $\omega_k = \omega_1$ ) кучланиш вектори  $\bar{u}_s$  бўйича  $x$ - $y$  координаталар системаси ўрнатилганда, қисқа туташув роторли АД лар учун (2.1) тенглама қуйидагича кўринишга эга бўлади

$$\begin{aligned}
\bar{u}_s &= R_s \bar{i}_s + d\bar{\Psi}_s / dt + j\omega_1 \bar{\Psi}_s; \\
0 &= R_r \bar{i}_r + d\bar{\Psi}_r / dt + js\omega_1 \bar{\Psi}_r; \\
\bar{\Psi}_s &= L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r; \\
\bar{\Psi}_r &= L_m \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r
\end{aligned}
\tag{2.3}$$

бунда  $s = (\omega_1 - \omega) / \omega_1$  - сирпаниш.

Уч фазали АД нинг электромагнит моменти оқим ишланиши ва статор токининг векторли кўпайтмаси орқали аниқланади:

$$\begin{aligned}
\bar{M} &= \frac{3}{2} \bar{\Psi}_s \bar{i}_s; \\
M &= \frac{3}{2} p_{\Pi} \text{Im} (\bar{\Psi}_s^* \bar{I}_s),
\end{aligned}
\tag{2.4}$$

бунда  $p_{\Pi}$  - АД нинг жуфт кутблар сони.

АД ни тўла ифодаланиши учун, чиқиш валидаги моментларнинг мувозанат тенграмасини қўшиш керак бўлади

$$\bar{M} - \bar{M}_n = J \frac{d\bar{\omega}}{dt},
\tag{2.5}$$

бунда  $\bar{M}_n$ ,  $J$  – мос равишда юклама ва инерция моментлари.

Шундай қилиб, умумлаштирилган ЭМ нинг математик идентификацияси комплекс коэффициентли ночизикли дифференциал тенгламалар (2.3) (2.4) ва (2.5) кўринишига эга бўлиб, унинг ечими ўзига хос хусусиятга эгадир. Лекин, кўпчилик амалий ҳолатларда, АД ва “ЧЎ - АД” тизимидаги электромагнит жараёнларни таҳлил қилиш учун квазитурғун ( $d\omega/dt = 0$ ) ёки турғун ( $d\omega/dt = 0$ ) ва ( $di/dt = 0$ ) жараёнларни кўриб чиқиш етарли бўлади. АД нинг турғун режимда ишлашида (2.3) ва (2.4) тенгламалар системаси тизикли бўлиб,  $\omega_k = \omega_1$  ҳолат учун қуйидагича кўринишга эга:

$$\begin{aligned} \bar{U}_s &= R_s \bar{I}_s + j\omega_1 \bar{\Psi}_s; \\ 0 &= \bar{R}_2 \bar{I}_2 + j\beta \bar{\Psi}_r; \\ \bar{\Psi}_s &= L_s \bar{I}_s + L_m \bar{I}_r; \\ \bar{\Psi}_r &= L_m \bar{I}_s + L_r \bar{I}_r \\ \bar{M} &= \frac{3}{2} \text{Im}(\bar{\Psi}_s^*, \bar{I}_s), \end{aligned} \tag{2.6}$$

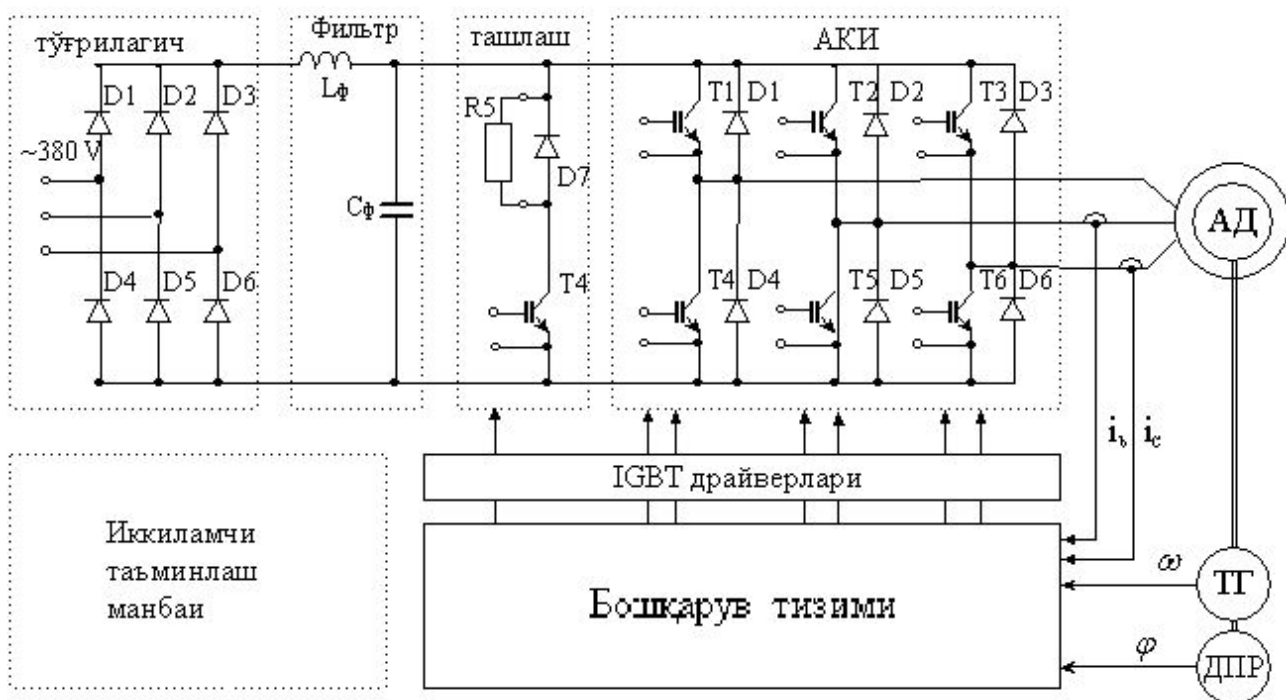
бунда  $\beta = (\omega_1 - \omega)$  - ротор токи частотасини белгиловчи абсолют сирпаниш.

Ушбу тенгламаларнинг ҳар бир ташкил қилувчиси, аниқ физикавий маънога эга ва ундаги қандайдир коэффициентларни ёки ўзгарувчиларни ўзгариши двигателининг электромагнит ва электромеханик характеристикаларига таъсир қилади. Бунга АД нинг тезлигини диссипатив ва частотавий ростлаш асосланган. Одатда, кўрсаткич башқариладиган ЭЮ лар частотавий башқариш усуллари асосланган тизимларига нисбатан паст кўрсаткичли энергетик ва ростлаш характеристикаларига эгадир.

Умумлашган ЭЮ нинг частотавий башқаришнинг асосий қонунлари қуйидагилардир:  $U_s/\omega_1 = \text{const}$ ,  $\Psi_o = \text{const}$ ,  $\Psi_r = \text{const}$ ,  $U_r/\beta = \text{const}$ . Ушбу қонунлар шуни ўрнатадики, двигателнинг тезлиги (моменти) ни частотавий ростланганда таъминловчи кучланишнинг амплитудаси ва частотасининг нисбати ўзгармас ҳолатда ушлаб турилиши ёки оқим ишлаши барқарорлашган бўлиши зарур.

Кўрсатилган ифодаларни амалга оширилиши ЭМ нинг тури ва конструктив бажарилишига боғлиқ.  $U_r/\beta = \text{const}$  нисбати фақат фаза роторли машиналарга тўғри бўлиб, улар хозирда юқори қувватли, аммо кўрсаткич бошқариладиган электр юритмаларда кенг қўлланилади [42,43].

2.1-расмда замонавий ўзгарувчан ток электр юритмаларининг таркибига кирувчи асосий функционал блоklar келтирилган. Кучли токли ўзгарткич, бошқарилмайдиган тўғрилагич  $D1...D6$  дан, филтър  $L_\phi - C_\phi$  дан, балласт резистори  $R_6$  га рекуператив энергияни қабул қилувчи занжирдан ва уч фазали автоном кучланиш инвертори АКИ дан иборат. Ўзгарткичнинг кучли токли каскадлари бошқариш тизими билан драйвер орқали боғланган бўлиб, у транзисторларнинг хавфсиз коммутациясини ҳамда ўта юкланишдан сақловчи алгоритмни таъминлайди.



**2.1- расм. Частота ўзгарткичлари янги элемент базаси асосида тузилган асинхрон электр юритманинг функционал схемаси**

Ўзгарткичнинг мазкур схемаси универсал бўлиб, қисқа туташув роторли АД га эга бўлган электр юритмаларни юқорида кўрсатилган частотавий бошқариш қонунлари асосида амалга ошириш имкониятини беради. ЭМ нинг тури, унинг частотавий бошқариш усули ва бунинг учун

керакли бўлган тескари алоқаларнинг тузилиши бошқариш тизимининг функционал жихатдан қурилишини аниқлайди. Электр юритманинг датчиксиз бошқарув тизимини тузишда, тахогенератор ТГ ёки роторнинг ўрин жойи датчиги ЎЖД ни мавжудлиги шарт бўлмайди. Ўзгарувчан ток электр юритмасининг умумий тузиш принциплари ва бошқариш тизимининг асосий функционал блокларини кўриб чиқамиз.

Ростланадиган ЭЮ ни қуришдаги муҳим масалалардан бири – АКИ нинг кучли токли калитларини коммутациялаш алгоритмининг танлашдир. Чунки, ушбу танлаш оқибатида, қўлланиладиган кучли токли элемент базаси белгиланиб, ўзгарткичнинг ростлаш ва энергетик характеристикалари аниқланади. Кўриб чиқиладиган транзисторли кучли токли ўзгарткичда импульс кенглиги бўйича модуляциялаш ШИМ алгоритми мавжуд бўлиб, у чиқишдаги кучланишни модули ва фазаси бўйича кенг диапазонда ростланишни таъминлайди. Бу эса, электр юритма тизимининг тезлик бўйича кенг диапазонда ростланганда зарур бўлади. Шунингдек, симметрик импульс кенглиги бўйича модуляция ШИМ ўзгарткичнинг чиқишидаги токини пульсациясини камайишига, яъни юкларнинг қувват йўқотишларини ҳамда электромагнит халақитларини пасайишига олиб келади. Шу сабабдан, бошқариш тизимининг чиқиш блоклари симметрик ШИМ билан жихозланади.

Хар қандай ўзгарувчан ток электр юритмаларининг бошқариш тизимида координата ўзгарткич КЎ лар мавжуд бўлиб, у ростланувчи ўзгарувчилар ўртасидаги турли координаталар тизими бўйича боғланишларни ўрнатади. Юқорида кўрсатилганидек, ЭМ нинг математик ифодаси ҳамда бошқариш тизимидаги ростлагичларнинг синтези, таянч векторлари билан боғлиқ бўлган айланадиган координата тизими орқали амалга оширилади. Лекин, АКИ ёрдамида АД ни бошқариш ва фазалардаги токни ўлчаш, уч фазали қўзғалмас координаталар тизими  $a-b-c$  да бажарилади ва статор чўлғамлари билан боғлиқ бўлади.

Шу сабабдан, умумий холатда координата ростлагич КР ларининг сигналлари тўғри ва тескари трансляциясини, айланадиган  $x$ - $y$  (ёки  $d$ - $q$ ) ҳамда айланмайдиган икки фазали  $a$ - $b$  ва уч фазали  $a$ - $b$ - $c$  координаталар тизимларида Кларк тенгламасига кўра амалга оширилади [34]:

-бошқаришнинг тўғри канали -ток бўйича тескари алоқа канали

$$\begin{aligned}
 u_{s\alpha} &= u_{sx} \cos \omega t = u_{sy} \sin \omega t, & i_{s\alpha} &= i_{sa}, \\
 u_{s\beta} &= u_{sx} \sin \omega t + u_{sy} \cos \omega t, & i_{s\beta} &= -(i_{sb} + i_{sc}) / 0.86, \\
 u_{sa} &= u_{s\alpha}, & i_{sx} &= i_{s\alpha} \cos \omega t + u_{s\beta} \sin \omega t, \\
 u_{sb} &= 0.5 u_{s\alpha} - 0.86 u_{s\beta}, & i_{sy} &= -i_{s\alpha} \sin \omega t + u_{s\beta} \cos \omega t \quad (2.7) \\
 u_{sc} &= -0.5 u_{s\alpha} - 0.86 u_{s\beta}.
 \end{aligned}$$

Ушбу тенгламаларда ток ва кучланиш векторларининг проекцияси координата тизимига мос холдаги индекслар билан белгиланади ( $x, y$  – индекслари  $d, q$  –индексларига мос холда).

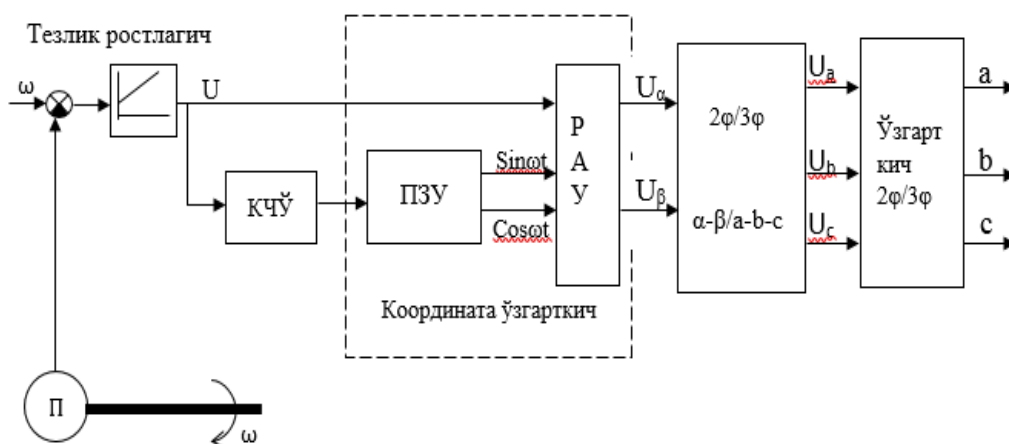
Рақамли-аналог бошқариш схемаларда бу тенгламаларни амалга ошириш мураккабдир, чунки у кўп сонли микросхемалар тўпламини ҳамда аналог кўпайтиргичларни талаб қилади. Бошқариш тизимида микроконтроллерларни қўллаш, координата ўзгарткичларини қуриш масаласини осонлаштиради, лекин кўпайтириш операцияларни катта сони, ростлаш циклининг частотасини камайтиради, бу эса баъзи талабларга жавоб бермайди.

Электр юритманинг анаънавий бошқариш тизими, ўзгарувчиларни бўйсундирилган холда ростлиниш принципига кўра қурилади. Бунда, токнинг ички контури тезликни ростлаш контури ва керак бўлганда эса ўрин жойи контури билан ҳам қамраб олинади. Ток контурини қўзғалмас координаталар  $a$ - $b$ - $c$  тизимида тузиш, координата ўзгарувчилари сонини камайтиради, бу ўз навбатида бошқариш тизимини соддалаштиради.

Маълумки, қисқа туташув роторли АД, унинг атрофидаги “сирпанадиган” статор майдони ёрдамида қўзғалади. Двигателни бошқариш жараёнида, ротор майдони ўзгармас бўлиши зарур. Натижада, магнит тизимини тўйиниши камайиб, АД нинг механик характеристикаси

чизиқли бўлиб қолади ва ЭЮ нинг динамик кўрсаткичлари яхшиланади. Ушбу масаланинг ечими анча мураккабдир. Шу сабабдан, АД ни бошқариш қонуни ва услубини танлаш электр юритмага қўйилган талаблардан келиб чиқади.

АД учун  $U_s/\omega_1 = \text{const}$  бошқариш қонунини амалга оширилиши 2.2-расмда келтирилган функционал схема бўйича олиб борилади. Бунда “кучланиш-частота” ўзгарткичи (КЧЎ) ёрдамида манбаловчи кучланиш амплитудаси ва инвертор коммутациясининг асосий частотасини нисбати ўзгармас ушлаб турилади. Координата ўзгарткич (КЎ) Sin ва Cos функциялари жадваллари ҳамда рақамли-аналог ўзгарткичлар асосида бажарилган. Бундай частотавий бошқариш кенг тарқалган бўлиб, бунда юритманинг тезлигини ростлаш диапазони кичик ва тизимга динамик жараёнлар бўйича юқори талаблар қўйилмаган.



**2.2- расм.  $U_s/\omega_1 = \text{const}$  бошқариш қонунига мос ЭЮ нинг функционал схемаси**

Токни ростлаш контурнинг мавжудлиги ток амплитудасини частотага бўлган нисбатини ўзгармас қилиб ушлаб туришга имконият яратади. Натижада механик характеристикани қаттиқлиги ортади, лекин ЭЮ ни асосий характеристикалари яхшиланмайди. Ушбу АД нинг тезлигини ростлаш принципи частотали-токли бошқариш усулига таълуқлидир.

АД ни частотали-токли принципи бўйича бошқаришнинг бошқа усули абсолют сирпаниш бўйича ростлаш деб аталади ва у  $\Psi_m = \text{const}$  ҳамда



$\Psi_r = \text{const}$  қонунларини амалга оширади. Бунда,  $\Psi_r = \text{const}$  қонуни анча афзалроқдир, чунки бир хил амалга оширилганда, электр юритмаларнинг характеристикаларини яхшироқ қийматларини таъминлайди.

Абсолют сирпаниш бўйича тузилган ЭЮ ни бошқаришда  $\Psi_r = \text{const}$  қонунини таъминлайдиган учта асосий усулни кўрсатиш мумкин [10], булар: скаляр, поляр ва векторли усуллар. Ушбу усуллар қуйидаги тенгламаларни бажаришга асосланган:

- вектор кўринишида

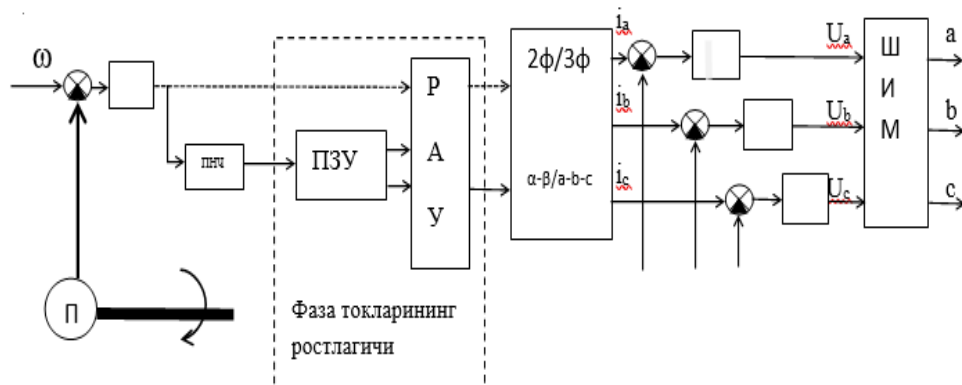
$$I_s = \Psi_r (1 + j\beta L_r / R_r) / L_m, \quad (2.8)$$

- поляр кўринишида

$$I_s = \Psi_r / L_m \cdot \sqrt{1 + (\beta L_r / R_r)^2}, \quad \delta = \text{arctg}(\beta L_r / R_r) \quad (2.9)$$

бунда  $\delta$  - роторнинг оқим илашиши,  $\Psi_r$  ва статор токи,  $i_s$  векторлари орасидаги бурчак,  $\beta$  - абсолют сирпаниш.

Ростланишни *скаляр усули* ток  $i_s$  нинг модулини  $\Psi_r$  га боғлиқ ўзгариши бўйича (2.8) тенглама асосида бажарилади. Ушбу усул 2.3-расмда келтирилган функционал схема орқали амалга оширилади, бунда токни ростлаш контурининг тўғри каналига таълуқли ночизикли блок киритилади. 2.4-расмда келтирилган функционал схема ток  $i_s$  ни оқим илашиши  $\Psi_r$  билан боғлиқ бўлган *поляр бошқариш усули* ни ифодалайди, бунда, токнинг модули  $I_s$  ҳамда фазаси  $\delta$  бир вақтнинг ўзида ростланади.



**2.3- расм. Скаляр бошқарув усули амалга оширувчи ЭЮ ни функционал схемаси**

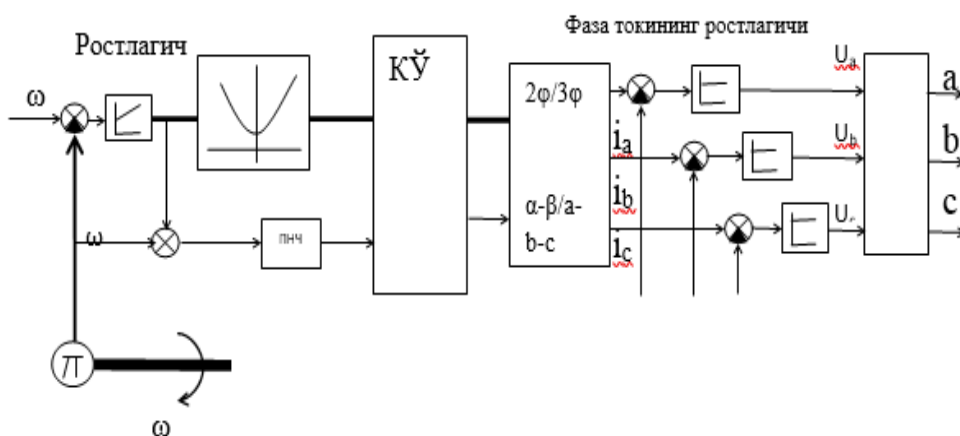
Векторли бошқариш усули сирпаниш бўйича олиб борилади ва бунда  $x$ - $y$  координаталар тизимига проекциялари тақсимланган (1) тенглама ишлатилади. Бундай ҳолатда, токни икки канал бўйича ростлаш олиб борилади ва роторнинг оқим илашишини вектори  $\Psi_r$  га мос тушган айланувчан координаталар тизимини вектори проекциясига мос бўлади. Ҳақиқий ўққа бўлган ток  $I_{ds}$  нинг проекцияси ўзгармас қилиб ушлаб турилади ёки АД ни икки фазали ростлинишини таъминлаш учун айланиш тезлигига мос ҳолда ростланади.

Мавҳум ўққа бўлган ток  $I_{qs}$  нинг проекцияси абсолют сирпанишга нисбатан пропорционал ўзгаради:

$$\beta = I_{qs} / (C_m I_{m\max}), \quad (2.10)$$

бунда  $C_m = L_r \omega_1 / R_r$ ,  $I_{m\max}$  – роторнинг берилган токи.

Кўриб чиқилган АД нинг бошқариш тизимлари, қўзғалмас координата тизимидаги ток бўйича ростлаш контурларига эга. АД асосида тузилган ростланадиган электр юритмаларни яратишда айланувчан  $x$ - $y$  тизимида токни ростлашни амалга оширувчи ПИ-ростлагичларни қўллаш мақсадга мувофиқ.



**2.4- расм. Поляр бошқариш усулини таъминловчи электр юритманинг функционал схемаси**

АД нинг статикада ишлаши нуқтаи назаридан, абсолют сирпаниш бўйича бошқарув усуллари бир-бирига тенг бўлиб, барча ҳолатларда

механик характеристикалар тўғри чизик кўринишда бўлади (ЎТД характеристикаларига ўхшаш). Динамик режимларда ва тезлик диапазоли кенг бўлганда эса векторли бошқарув афзалдир.

ЭМ ни бошқариш усули ҳамда қонунини танлашда нафақат ижро этувчи двигателни тури, балки электр юритманинг характеристикасига бўлган талабларни ҳисобга олиш зарур. Масалан, АД асосида қурилган тезкор, кенг диапазонда ростланадиган ЭЮ импульс кенглиги бўйича модуляция ШИМ билан жихозланган инвертор асосида ҳамда абсолют сирпаниш бўйича вектор бошқарувига кўра тузилади. АД асосида қурилган оддийроқ ЭЮ ларнинг тизимларида эса скаляр ва поляр бошқарув қўлланилади.

Шундай қилиб, юқорида кўриб чиқилган ЭЮ ларни яратишда, тезлик бўйича диапазоли, тезликни ростлашни аниқлиги, инверторнинг манбаловчи кучланиш, максимал момент каби кўрсаткичларга мос миқдорда танланади, натижада оптимал энергетик характеристикалар олиниши кўзда тутилади.

## **2.2. Электр юритма тизимининг микропроцессорли бошқариш схемасига қўядиган асосий талаблари**

У ёки бу двигателни бошқариш тизимини тузилиши ҳамда ишлатиш алгоритми ҳар бир аниқ ҳолатда электр машинанинг тури, бошқариш усули ва қонуни, ЭЮ ни ишлатиш бўйича қўйиладиган талаблардан келиб чиқади. ЭЮ нинг универсал бошқариш тизимига қайта тузилиш хусусияти киритилиб, унинг ички архитектураси конкрет двигател турига ҳамда бошқариш усулига мос бўлиши керак. Тизимнинг динамик хусусиятларига юқори талаблар қўйилганда ҳамда айланадиган координаталар тизимидаги ростлаш талаб қилинса, тизимнинг аппаратли қисми анча мураккабланиши. Агар қисқа туташув роторли АД ли ЭЮ нинг бошқаруви частотавий усул билан амалга оширилса, тизимнинг мураккабланиши қўшимча чизикли ва нозикли бўғинларни кириши ҳисобига ошади. ЭЮ ни универсал

бошқариш тизимининг тузилиши ва кўрсаткичлари ростлашнинг энг мураккаб қонунларини таъминлаши зарур [13,17,23,45].

Шу сабабдан, универсал бошқариш тизимининг асосий бўғини сифатида микропроцессорни қўллаш мақсадга мувофиқдир. Унга қатор функцияларни бажаришни амалга оширувчи дастурларни киритиш мумкин. Одатда, бундай масалани амалга ошириш, мураккаб аппаратура орқали (масалан, аналог кўпайтиргичлар, аналог бўлувчилар ва хоказолар) амалга оширилади. Ускунанинг умумий интеграциясини ошириш билан бир қаторда микропроцессорни қўлланиши, бошқарув тизимини турли двигателлар ҳамда бошқарув усулларига мосланиш жараёнини енгиллаштиради, чунки дастурларни ўзгартиришларни амалга ошириш, аппаратларнинг қайта тузишдан анча осондир. Бошқариш қонунининг рақамли таъминланиши, тизим аниқлигини анча оширади, чунки, аналог бошқарув схемаси учун сигналларнинг ҳар бир босқичда ишлов бериш, унинг табиатига мос келади. Алгоритмик рақамли ишлов бериш бундай камчиликдан холидир.

Замонавий микропроцессорларни тезкорлиги схеманинг динамик хусусиятларини амалга оширишда яхши омил бўлади. Микропроцессорлар асосий ростлаш функциялардан ташқари, химоя, диагностика ва ЭЮ нинг мониторингини амалга оширади. Бундан ташқари, бир неча электр юритма глобал кўп қатламли тизимга бирлаштирилиши мумкин бўлиб, марказлашган ҳамда тақсимланган бошқарувни амалга ошириш имконини беради. Бундай электр юритмаларнинг турлари ҳозирда SEW – EURODRIVE фирмаси томонидан ишлаб чиқилмоқда.

Лекин ЭЮ ларни универсал бошқариш тизимларининг аниқлик бўйича ва динамик кўрсаткичлари ҳамда тузилишининг мураккаблиги микропроцессорлар элемент базасининг техникавий характеристикаларига юқори талаблар қўяди. Бундай характеристикалардан асосийлари – микропроцессорнинг тезлиги, ҳисоблар разряди ҳамда асосий ҳисоблаш ядросининг турли ташқи қурилмалари билан бўлган интеграцияси ва

тизимнинг қолган қисмини амалга оширувчи интерфейси бўлади. Бу характеристикаларни таъминлаш микропроцессорнинг элемент базасини танлашда ва таҳлил қилишда тизимли кўриб чиқишни талаб қилади.

Векторли бошқарувига эга бўлган тизимлар кўп каналли бўлиб, айланадиган координаталар тизимида ўзгарувчиларнинг ростлаш контурини ўз ичига олади. Бундай схемани тузилиши ПИ ва ПИД – ростлагичларни токни ростлаш контурида қўлланишини таъминлайди. Бундай контурлар ўтказувчанлик қобилияти бўйича қўзғалмас координаталар тизимидаги контурларга нисбатан юқори кўрсаткичларга эга.

Келтирилган функционал схемаларга кўра шундай хулосаларни қилиш мумкин: электр юритмани бошқариш тизимининг микропроцессорли қисми қуйидаги функцияларни бажариши керак: тескари боғланиш датчикларидан аналог сигналларини киритиш ва уларни синхрон тарзда аналог – рақамли ўзгартириш; ЭЮ нинг белгиланган режимининг кўрсаткичларини киритиш; талаб қилинаётган двигател тури ва унинг бошқарувига кўра тизимни қайта тузиш; тизим ростлагичлари ва бошқарув қонунни алгоритмик амалга ошириш; частота ўзгарткичига импульс кенлиги бўйича модуллаштирилган сигналларни чиқариш тизимнинг жорий ҳолатини тезкор қайд қилиш; тизимни диагностикаси ва химоялаш функцияларини амалга ошириш; юқори қатламдаги ЭХМ билан боғланиш.

Одатда, электр юритмаларнинг юқори аниқликка эга бўлган тизимларида ҳолатни ростлаш контури 30 Гц ли бўлган ўтказиш оралиғи мавжуд. Тезликни ростлаш контурининг ўтказиш оралиғи – 300 Гц ҳамда ток контуриники эса 3...5 кГц. Бунда импульс кенлиги бўйича модуляциянинг ташувчи частотаси 6...12 кГц ни ташкил этади. Шундай қилиб, микропроцессор бошқариш тизимининг ростлаш вақти 80 ... 170 мкс га тенгдир. Юқори аниқликка эга бўлган ростлаш тизимини қўллашда, статик аниқлик -1 ни таъминлаш учун микропроцессор бошқарув тизими аниқ ҳисобларда 16 та разрядли чиқишдаги ўзгарувчилар кодида берилиши

зарур. Бундай аниқлик тезликлар бўйича ростлаш диапазонини 1:10000 ораликда таъминлайди.

Бугунги кунда, корхоналари томонидан юқорида келтирилган микро-процессор бошқарув тизимлари ишлаб чиқилмайди. ABB SEW EURO-DRIVE, TOSHIBA, SIEMENS фирмалари томонидан бир қатор микропроцессорли электр юритмалар ишлаб чиқарилмоқда. Асосий бўғин сифатида микропроцессорлар таркибида SIEMENS фирмасининг SAB 80C166 турдаги ANALOG DEVICES фирмасининг ADSP – 21XX турдаги ва бошқалар қўлланилмоқда. Бир хил фирмалар бозор талабига кўра, элементлар базасини ташқи микросхема кўринишида ишлаб чиқиб, электр юритмаларни махсус бошқариш масаласини хал қилади. Мисол учун ANALOG DEVICES фирмаси чиқарган векторли AD2S100, ADMC200 сопроцессорларни келтириш мумкин. Булар синхрон ва асинхрон машиналарни векторли бошқарувини амалга оширади

ЭЮ ни бошқариш хусусияти *микроконтроллернинг* келтирилишига мос келади. Микроконтроллерлар микропроцессорлар билан таққосланганда, улар катта қувватли ҳисоблаш ядросидан ташқари периферия қурилмасидан иборат бўлиб, кириш – чиқиш порти, таймер, счётчиги, аналог – рақамли ўзгарткичлар, импульс кенглиги бўйича модуляторлар, кетма-кет портлар ва шунга ўхшашлар микроконтроллернинг ички қисмини интеграциялашга имкон беради. Лекин микроконтроллернинг ҳисоблаш ядроси тезлиги чек-ланган ва сигналларнинг реал вақт режимида адаптивлаш имконини ҳамда уларни тез ишлаб кетувчи бошқариш тизимларда қўллашга рухсат бермайди. Масалан, бир каналли рекуррент ПИД – ростлагичнинг дастурлаш алгоритми микроконтроллерда жойлашган бўлиб, у INTEL фирмаси томонидан MCS96 тури сифатида ишлаб чиқилган. Ҳисоблаш аниқлигига мос ҳолда 30-50 микросекунд вақтида ўтказувчанлик интервалини таъминлайди ва уч контурли икки каналли ростлаш тизимида бу интервал 10 Гц га тенг.

Замонавий тез ишлаб кетувчи микроконтроллерлар ўз таркибида периферия қурилмаларидан ташкил топади. Бугунги кунда тавсия этилаётган микроконтроллерлар ишлаб кетиш тезлиги, разряди ва ичида ўрнатилган периферия қурилмаси бўйича бир неча тури тезкорлик хусусиятига эга, масалан, SAB SIEMENS фирмаси чиқарган 80C166 микроконтроллери NATIONAL SEMICONDUCTOR–фирмаси чиқарган HPC46100 контроллери. SIEMENS фирмаси чиқарган SAB 80C167 микроконтроллери бир каналли рекуррент ПИД – ростлагичдан иборат бўлиб, алгоритмни амалга оширилиши 5 микросекунд давомида бажарилади.

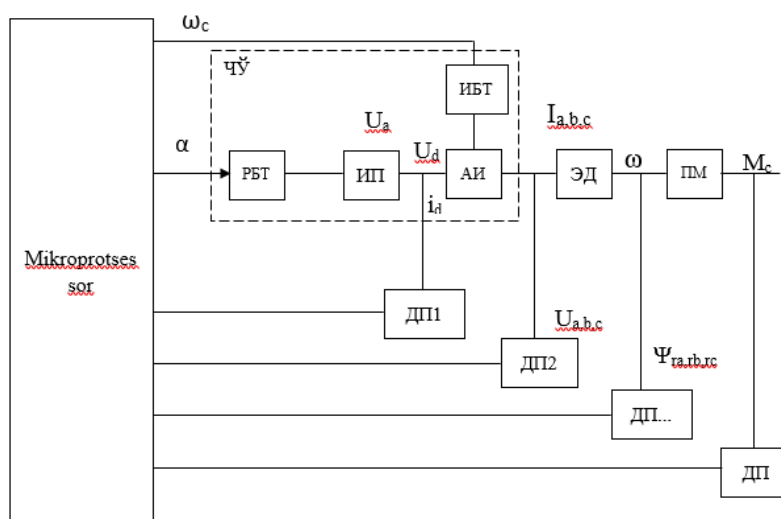
Периферия қурилмаси таркибида ўрнатилган ва тез ишлаб кетувчи микроконтроллерларнинг турларини бозорда камлиги, ЭЮ ларни тез ишлаб кетувчи турини яратувчи лойихачилар бундай тизимларда сигнал ишловини *рақамли процессор* ёрдамида олиб борувчи мосламани қўллашмоқда. Бундай микросхемалар мураккаб ҳисоблаш алгоритми орқали реал вақт режимида сигналларни ишловини олиб боради. Уларнинг ички тузилиши ва ташқи интерфейси жуда кичик вақт интервалида тесқари боғланишли датчиклардан олинган кириш сигналларга ишлов беришини амалга оширади. Бундан ташқари, тизимнинг чиқишдаги бошқарув сигналларни ишлаб чиқиб, жуда мураккаб бўлган бошқарув қонуни алгоритминини амалга оширади.

Сигналларга рақамли ишлов бериш, процессорининг махсус периферия микросхемалари билан қўлланилиши тизимни керакли даражада интеграцияланишига олиб келади ва ишлаб кетиш жихатдан тезлаштишни таъминлайди. Бундай тезлигини кўпайиши нисбатан тизимнинг нархини сезиларсиз ортиши ҳисобига олиниши мумкин. Ишлаб кетиш тезлиги бўйича катта имкониятли ЭЮ нинг химояси, диагностикаси ва мониторинги сигналларни рақамли ишлов бериш процессорига юклатилади. Бундай процессорлар турли кўринишдаги периферия қурилмалари билан жихозланиб, ўзининг тузилиши бўйича микрокон-

троллерларга яқинлашади ва уларни электр юритмаларнинг бошқарув тизимига киритилиши енгиллашади.

### 2.3. Частотавий бошқариладиган электр юритмаларнинг тузилиши ва унинг рақамли бошқариш алгоритмини тузиш

Частотавий бошқариладиган электр юритма умумий ҳолда учта асосий элементдан иборат (2.5-расм): частота ўзгартгичи (ЧЎ), электр двигатели (ЭД) ва белгиланган технологик жараённи таъминловчи ишлаб чиқариш механизми (ИЧМ). Частота ўзгартгич двигателни манбалайди ва унга мос келувчи бошқариш таъсирини шакллантиради. Ўзгартгичнинг бошқарув тизимига таъсир этувчиларни ўзгартириб, электр энергия кўрсаткичлари (частота, кучланиш амплитудаси ва ток) ўзгартирилади ҳамда двигател томон узатилади [14,27,40].



2.5-расм. Частотавий бошқариладиган электр юритмаларнинг умумлашган тузилиши

Ушбу кўрсаткичлар двигател учун бошқарувчи таъсирлардир. Уларни ўзгартириш йўли билан двигателнинг тезлиги ўзгартирилади ва шу сабабли унинг валидаги айланиш момнти ҳам ўзгаради. Ишлаб чиқариш механизми электр юритманинг юклагасидир.

Частота ўзгартгичларининг кўп сонли схематик кўринишлари мавжуд. 2.5-расмда келтирилган схемада ўзгартгич қурилмаси ўзгармас бўғинга эга. Ушбу бўғин транзисторли калитлар бўлиб, улар ҳозирда частота



Ўзгарткичларда кенг қўлланади. Ушбу ўзгаргич импульс ростлагич (ИР), автоном инвертор (АИ), инверторнинг (ИБТ) ва ростлагичнинг бошқарув тизими (РБТ) дан иборат.

ИБТ га бериладиган сигнал бошқарувчи таъсир бўлиб, двигател статор токининг частотаси  $\omega_c$  ни керакли миқдорда ўзгартириб, электр юритманинг частотавий бошқаришни амалга оширади. РБТ га бериладиган  $\alpha$  сигнали бошқарувчи таъсир сифатида автоматлаштирилган ЭЮ да кучланишнинг амплитуда қийматини ростлаш контурида фойдаланилади.

Асосий халақит берувчи таъсирлар:

1) Қаршилик моменти  $M_c$  - ишлаб чиқариш механизмлари томонидан двигател валига келтирилган куч;

2) Ўзгарткичининг манабаловчи тармоқ кучланиш  $U_n$  ни ўзгариши.

Электр юритманинг автоматлаштирилган бошқариш тизими тузилишидаги тескари алоқаларни ташкил этиш датчик-ўзгарткичлар ДПП, ..., АПН ёрдамида амалга оширилади. Уларнинг ёрдамида бошқарувчи объект (рақамли ёки аналогли процессор) қулай бўлган кўринишда куйидаги бошқариладиган кўрсаткичларни ўзгартириши ва ўлчаши мумкин:

1) ўзгарткичнинг ўзгармас ток томонидаги ток ва кучланишни ( $i_d, u_d$ );

2) двигател ва частота ўзгарткични фаза токи ва кучланишини (ЭЮК)

$i_a, i_b, i_c, u_a, u_b, c_{ur}$ ;

3) ротор ва статорни оқим илашишини  $\Psi_{rap}, \Psi_{rb}, \Psi_{rc}, \Psi_{sa}, \Psi_{sb}, \Psi_{sc}$ ;

4) двигател валидаги моментларни ( $M_{дв}, M_c$  ва бошқаларни);

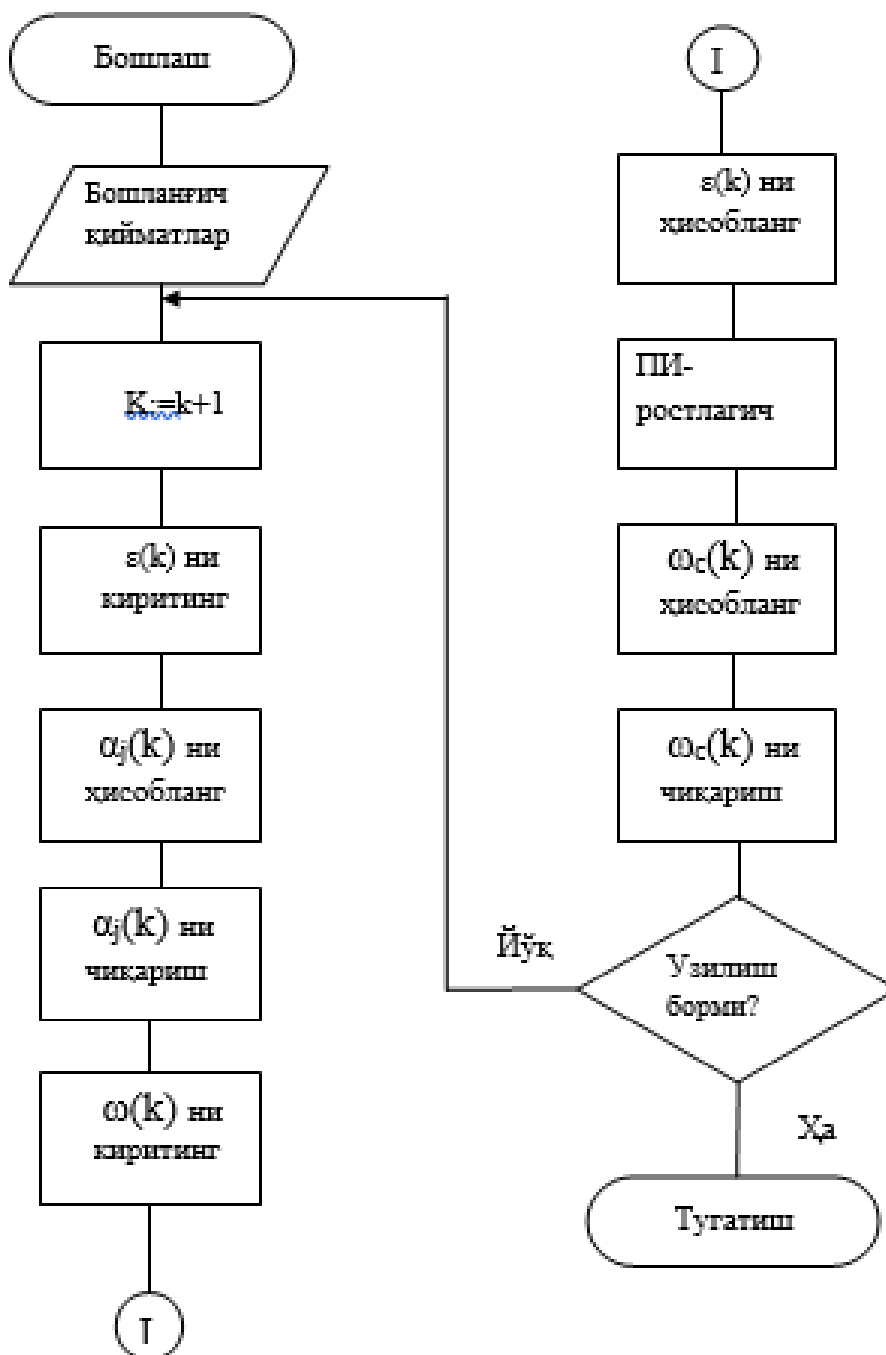
5) роторнинг айланиш частотаси  $\omega$ , механизмнинг айланиш тезлиги  $n$ , сирпанишнинг частотаси  $\beta$  ни ва бошқаларни.

Микропроцессорли бошқариш тизимини яратишда ишлаб чиқиладиган бошқариш алгоритми ЭХМ да қўлланиши қулай бўлиши лозим. Мисол кўринишда, асинхрон электр юритманинг частотавий бошқариш алгоритмини кўриб чиқилган.

2.6-расмда ЭЮ нинг рақамли бошқариш алгоритмининг схемаси келтирилган.

2.1-жадвалда эса бошқариш алгоритми блокларининг бажараётган функциялари кўрсатилган.

Хисобли боғланишлар умумий холда келтирилган.



2.6-расм. Электр юритманинг рақамли бошқаруви алгоритми схемаси

**ЭЮ ни рақамли бошқарув алгоритмининг блоклари бажараётган функциялар**

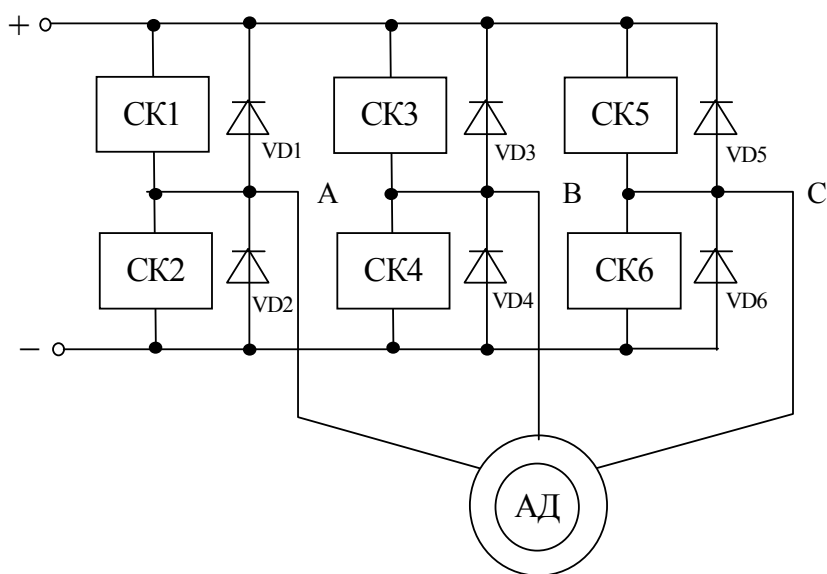
| Г/р | Бажарилаётган функция  | Эслатма   |
|-----|--|---|
| 1   | Берилган қийматларни киритиш (роторнинг айланиш частотаси белгиланган қиймати $\omega_3, \omega$ кўрсаткичлари, ўзгармас коэффициентлар) $k = 0$ га.   |   |
| 2   | Цикл ҳисоблагичининг ўсиш кўрсаткичи $k$ ни киритиш  |   |
| 3   | Инверторнинг ЭЮК сини микропроцессорга датчикдан ва аналог-рақамли ўзгарткичдан (АЦП) киритиш, бошқарув тизимни динамик характеристикаларини яхшилаш учун унинг таъсирини қоплаш   | ЭЮК ни таъсирини қоплаш усулидан бири мусбат тескари боғланишни киритиш                 |
| 4   | $\alpha_3(k) = f(E(k)), y(k), k_n$ нисбатлар бўйича ростлагичнинг бошқарув тизими (РБТ) да $\alpha_3(k)$ берилган жорий таъсири қийматини ҳисоби, бунда $k$ РБТ нинг таянч сигнали бўлиб чизиқли ўзгаради. $k_n$ узатиш коэффициенти | Аналог ўзгарувчилари микропроцессорларга киритилишидан олдин филтер орқали силлиқланади |
| 5   | Рақамли аналог ўзгарткичдан (РАЎ) $\alpha_3(k)$ нимдастурини ростлагичнинг бошқарув тизими (РБТ) га чиқариш  |   |
| 6   | Аналог-рақамли ўзгарткич (АЦП) орқали частота $\omega(k)$ нинг жорий қийматини киритиш   |   |
| 7   | Бошқаришнинг ёпиқ контурида фарқ сигналини аниқлаш   |   |
| 8   | П, ПИ ёки ПИД – ростлагичлари учун маълум бўлган нисбатлар бўйича бошқариш таъсири орқали фарқ сигнали $\beta(k)$ ни ўзгартириш нимдастури   |   |
| 9   | Аён бўлган боғланишлар орқали $\alpha_3(k)$ ни ҳисоблаш  |   |
| 10  | ЦАП орқали инверторни бошқарув тизимига инвертор частотасини $\omega_c(k)$ чиқариш нимдастури  |   |

### III. "ЧАСТОТА ҶЗГАРТКИЧ – АСИНХРОН ДВИГАТЕЛ" ТИЗИМИДА ДВИГАТЕЛНИНГ СТАТОР ТОКИНИ МОДУЛИ БЎЙИЧА БОШҚАРИШ УСУЛИНИ ТАДҚИҚОТ ҚИЛИШ

#### 3.1. Частота ўзгарткичларни бошқариш усуллари ва тузилмалари

Частота ўзгарткичларнинг асосий вазифаси – двигателни электромеханик кўрсаткичларини ростлашдир. Асинхрон ЭЮ ларда бунини амалга ошириш учун кучланиш ёки ток ҳамда ўзгарткич чиқишидаги частота ростланади [10].

3.1- расмда келтирилган АКИ нинг функционал схемаси, уч фаза АД ни частотавий бошқариш учун қўлланади. Ушбу схема олти калит (СК1-СК6) дан иборат бўлиб, у тескари диодлар билан (VD1-VD6) жихозланган ва бу диодлар АКИ нинг реверсив энергетик хоссага эга бўлишини таъминлайди.



3.1-расм. Уч фаза қўприкли инверторнинг функционал схемаси

Двигател АКИ дан манбаланганда, унинг статор чўлғамлари юлдузча ёки учбурчакка уланади. Бу икки турдаги уланишлар хар бир фаза жуфтлиги учун кучли ток калитларнинг қайта уланиш кучланишини двигател чўлғамларида ўзгартириб кетишига сабабчи бўлади. Инверторни бошқариш кучли ток занжир орқали ёки калит СК ларни қайта улаш алгоритми ёрдамида амалга оширилади.

АД ни частотавий бошқаришда чўлғамларнинг кучланиши, яъни ‘Чў-АД’ тизимидаги электромагнит жараёнлар АКИ нинг бошқариш усулига боғлиқ бўлади (бунда калит СК ларнинг қайта уланиш алгоритми ва инверторнинг манба кучланишини шакллантириш принципи назарда тутилади). Инверторларни бошқариш усуллари ва улар асосида қурилган турли схема-ларни қиёсий баҳолаш олдидан. уларни гурухларга ажратиш лозим. Бундай гурухланиш электр машина билан манба ораларидаги энергетик боғланиши ҳамда кучланиш ва токнинг инвертор чиқишидаги натижавий векторларини кўрсаткичлари асосий мезонлар бўлиб қолади (3.1-жадвал). Инверторлар энергетик боғланиш хусусиятларига кўра икки синфга ажралади:

- Икки томонлама энергетик боғланишли инверторлар. Бунда схема-лардаги бошқарув сигналлари учта кучли токли калитга ҳар доим узатилган ва бу билан кучли токли қисмнинг тузилишини ўзгармаслиги таъминланади;

- Бир томонлама энергетик боғланишли инверторлар. Бунда схема-лардаги бошқарув сигналлари узатиладиган калитлар сони маълум вақт интервалида уч донадан кам бўлиши мумкин.

Энергетик боғланишнинг хусусияти инверторнинг тузилишини ифодалайди. Икки томонлама энергетик боғланишда тузилиш ўзгармайди (ўзгармас тузилишли инверторлар), бир томонлама энергетик боғланишли тузилишида эса, унинг шакли ўзгаради (ўзгарувчан тузилишли инверторлар). Ростланадиган кўрсаткични – натижавий векторни ўзгариши нуқтаи назаридан биринчи синф инверторларини бошқариш усуллари ва схемалари тўртта гурухга ажратилиши мумкин [39,42] (3.1-жадвалда кўрсатилгандек):

1.  $\Theta = 180^\circ$  қайта улаш қонуни бўйича натижавий векторни қийматини ростлаш инверторлари.

2. Нативавий векторни ўртача қийматини ростлаш инверторлари. Бундай гуруҳга импульс кенглиги бўйича ростлаш ШИР ли схемалар оид бўлиб, улар асосий ва ташувчи частота орқали ростланади.

3. Нативавий векторни ўртача фазасини ва қийматини ростлаш инверторлари. Бундай гуруҳларга инвертор киришидаги кучланиши ростландиган схемалар оид бўлиб, улар махсус бошқаришни талаб қилади (махсус бошқариш чиқиш кучланишини гармоник таркибини яхшилади).

4. Ўртача модул ва нативавий векторнинг ўртача фазаси ростланган инверторлар. Бундай схемалар ШИМ билан жихозланиб, синусоидал, трапециадал, учбурчак ва бошқа қонунлар бўйича чиқишдани кучланиш таркибини гармоник ташкил этувчиларини яхшилаш имконини беради.

### 3.1-жадвал

#### Автоном кучланиш инверторларни тузилиши ва бошқариш усуллари

| Манбаа ва юкламанинг энергетик боғланишини хусусиятлари                         | Нативавий векторнинг харакати  |   |  |  |
|---|--|---|--|--|
|   | Ростланувчи инверторлар  |   |  |  |
|   | 1. Нативавий векторнинг (модулнинг қиймати)                                  | 2. Нативавий векторнинг ўртача қиймати                  | 3. Нативавий векторнинг қиймати ва ўртача фазаси   | 4. Нативавий векторнинг ўртача қиймати ва ўртача фазаси          |
| I. Икки томонлама энергетик боғланишли АКИ (куч занжири ўзгармас тузилишли АКИ) | 1.1 Ўзгармас ток бўғинида кучланишни ростловчи схема ва $\Theta = 180^\circ$ | 1.2. Импульсда ва паузада ШИР схемаси учта СКлар уланса | 1.3 Ўзгармас ток бўғинида кучланиши ростландиган схемалар ва импульсда ва паузада ШИР таркибида учта СК уланса | 1.4 Импульсда ва паузада учта калитли ростландиган ШИР схемалари |

|   |   |  |  |  |
|---|---|--|--|--|
| II. Бир томонлама энергетик боғланишли АКИ (куч занжири шщгарувчан АКИ) | 2.1 ўзгармас ток бўғинида кучланишни ростлаш схемаси $\Theta = 120^\circ$ ва $\Theta = 150^\circ$ | 2.2. Пауза пайтидаги бир ё иккита калитни ШИР билан узиш схемаси | 2.3 пауза пайтидаги бир ёки иккита калитни 1,3 да кўрсатилагн сингари узиш | 2.4. Пауза пайтидаги бир ёки иккита калитни 1,4 да кўрсатилган сингари узиш. |
|---|---|--|--|--|

Бошқариладиган тўғрилагичга эга бўлган схема инверторнинг кучланишини ростлайди, унинг таркибида тўғриланган кучланишни пульсация-ларини силликловчи филтёр мавжуд бўлади. Бошқариладиган тўғрилагич манбадан саноат частотаси билан таъминланганда, филтёрнинг ўлчамлари ва вазни жуда кичик бўлиб, электр машинанинг бошқариш занжирида тебранувчи бўғин сифатида номоён бўлади. Бу эса автоматик ростланиш тизимида кераксиз бўлади.

Бундан ташқари, бошқариладиган ўзгартичнинг камчилиги – ўзгарувчан ток занжирида актив ва реактив қувватларни қониқарсиз балансидир.

Кенг ростланадиган электр юритмалар учун АКИ нинг чиқишдаги векторни ростлаш модулига эга бўлган схема қулай бўлиб, ташувчи частотада ишловчи импульс кенглиги бўйича ростлагич ШИР ни ёрдамида калитларининг юқори частота билан қайта уланиши оқибатида, бундай ЧЎ ўзгармас ток занжирида филтёрсиз ишлаши мумкин].

Ушбу тизимнинг камчилиги – АД истеъмол этаётган тўлиқ қувват кенг ростланадиган ростлагич ва АКИ орқали ўтади. Бундай электромагнит энергиянинг икки поғонали ўзгартирилиши, ф.и.к. нинг пасайишига олиб келиб, юритманинг габритларини катталаштиради. Бундан ташқари, электр юритма ижро двигтелини генератор режимига ўтказилиши, махсус чораларни ташкил этишни талаб қилади (бундай чоралар манба ва АКИ ни икки томонлама энергетик боғланиши орқали таъминланади).

Чиқишдаги кучланишнинг ростлаш диапазониға юқори талаблар кўйилмаса, ўзгармас ток бўғиндаги ШИР ни қўллаш қулай бўлиб, у инверторнинг тиристорли схемасида коммутация тугунларини қўлламасликка сабаб бўлади.

АКИ даги асосий ва йўналтирувчи частотаға асосланган ШИР мавжуд ҳамда у ШИМ камчиликлардан холи бўлса, битта инверторнинг ўзида инверторлаштириш ва кучланишни импульс кенглиги орқали бошқариш функциялари бирлаштирилади. АКИ чиқишдаги кучланишнинг эгри чизиғини импульс кенглиги усули бўйича шакллантириб, уни ростлаш учун қайта улаш алгоритми киритилиб,  $180^0$  – режими бўйича амалга оширилади.

Уч фазали АКИ нинг чиқишдаги кучланишни ШИР ёрдамида қайта улаш учун турли алгоритмлар мавжуд бўлиб, уларни танлашда кучли токли схемасининг тузилиши маълум интервалларда ўзгармасдан ушлаб туриш амалга оширилади ҳамда бунда кучланишг эгри чизиғининг шакли юкламанинг қиймати ва хусусиятиға боғлиқ бўлмайди.

Алгоритмларнинг турли-туманлиги чиқишдаги кучланишни гармоник таркибини яхшилаб, электр юритмани турли бошқариш схемаларини таъминлайди. Шундай қилиб, ЭЮ ларни электромагнит ва энергетик характеристикаларини АКИ ни бошқариш усули аниқлаб беради ва булар хисоб ва тахлилларда инобатға олиниши зарур. Бунинг учун АКИ нинг ишчи жараёни батафсил кўриб чиқилиб, қуйидаги ўзгарувчилар аниқланиши зарур. Кучланишнинг натижавий векторини ўртача модули қуйидагича аниқланади:

$$|\bar{u}_s|_{cp} = \gamma \bar{U}_s \quad (3.1)$$

бунда  $\gamma = t_1 / T_0$  - АКИ нинг уланиш холатини нисбий давомийлиги бўлиб, бунда двигателнинг статори чўлғами манбаға уланган;  $1-\gamma = t_2 / T_0$  – узил холатнинг нисбий давомийлиги бўлиб, бунда кучли токли калитини анод ёки катод гурухлари чўлғам орқали туташтирилган бўлади;  $t_1, t_2$  - импульс ва паузанинг нисбий давомийлиги;  $T_0$  - йўналтирувчи частотанинг даври.

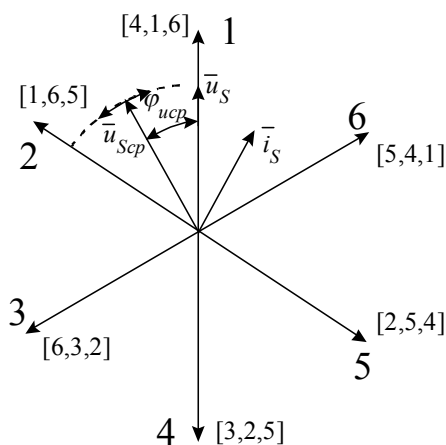


Натижавий векторларнинг нисбий ҳолатига (3.2- расм) кўра, ШИМ ростланадиган бўлганда, АКИ даги электромагнит жараёнларини таҳлил қилиш мумкин. (3.2- расм) да квадрат қовуслар ичида очиқ берувчи сигнал узатилган кучли токли калитларнинг номери берилган.

Хар қайси натижавий векторнинг аниқ ҳолати 1-6 рақамлар билан белгиланади. Ростланадиган ШИМ учун вектор  $\bar{u}_s$  кўп маротаба иккита ёндош ҳолатлар орасида ҳаракатланади (1-2, 2-3, ..., 4-1). Буни амалга ошириш кучли токли калитининг фаза гуруҳи орқали бажарилади, масалан, СК1 ва СК2 (3.2 - расм).  $T_0$  вақт давомида кучланишнинг натижавий векторини ўртача фаза қиймати ўрнатилиб, у қуйидаги тенглама орқали аниқланиши мумкин

$$\varphi_{u-p} = \arctg \frac{\sqrt{3} t_{n+1}}{2t_n + t_{n+1}} + \frac{\pi}{3} (n-1) \cong \frac{\omega_0}{k} t, \quad (3.2)$$

бунда  $n = 1 \dots 6$  –асосий ҳолатини номери;  $t_n$  -  $n$  ҳолатидаги вектор  $\bar{u}_s$  нинг вақт давомийлиги;  $t_{n+1}$  -  $n+1$  ҳолатидаги вектор  $\bar{u}_s$  нинг вақт давомийлиги;  $k = \omega_0 / \omega_1$  частота ўзгарткичини йўналтирувчи частотасини чиқишдаги частотага нисбати.



**3.2- расм. Инвертор чиқишидаги натижавий векторлар**

$\bar{u}_s$  векторнинг модулини ўзгариши 1-γ интервалида калитнинг анод ёки катод гуруҳини бирданига очилиши ҳисобига амалга ошади. Инверторнинг чиқишидаги калитларда амалга ошираётган қайта улашлар оқибатида

кучланишнинг ўртача натижавий вектори ҳосил бўлиб, қуйидагича аниқланади:

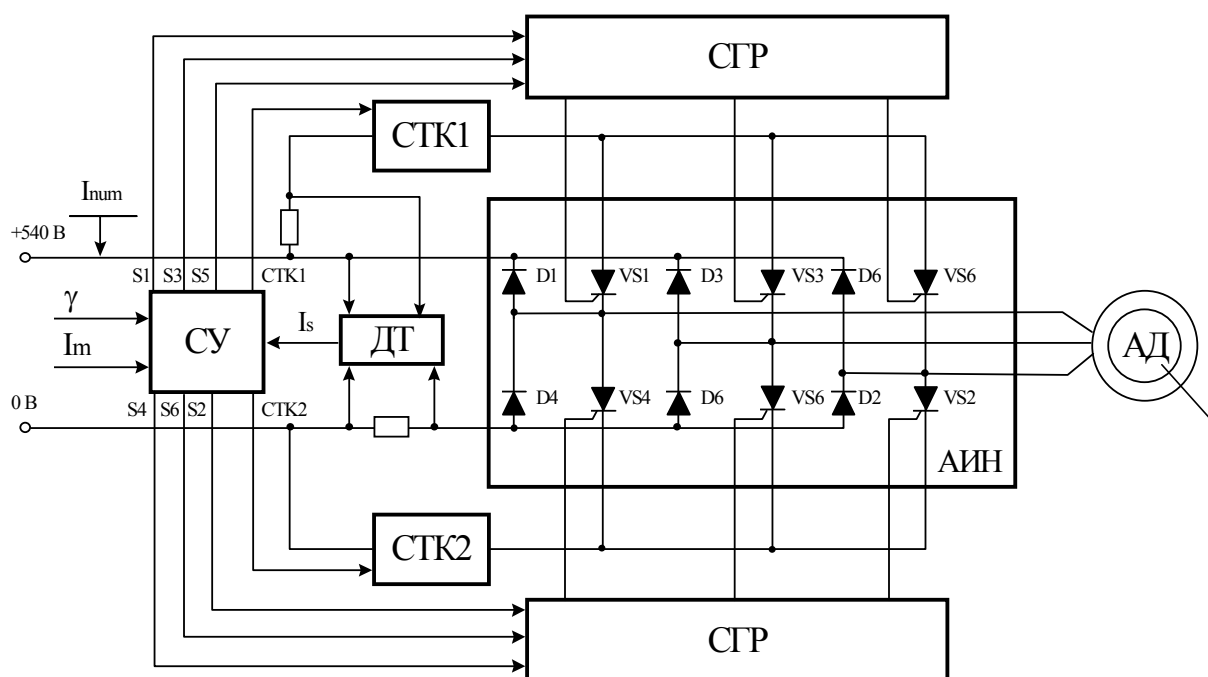
$$\bar{U}_s = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \bar{u}_s dt = \gamma U_s e^{j\varphi_{иср}} \quad (3.3)$$

Агар АКИ нинг чиқишдаги зажирларида вақт бўйича доимийси катта бўлган актив индуктив юкламага уланса ва ШИМ нинг йўналтирувчи частотасининг даври  $T_0$  дан каттароқ бўлса, юклама фазаларидаги ток ШИМ ни таркибида бўлиб, унинг узликсиз фойдали ташкил этувчиси айланади. Шундай қилиб, инверторнинг бошқариш схемаси, ”ЧЎ – АД” нинг иккита талаблари орқали амалга оширилади: биринчи ва олий гармоникаларнинг майдони таъсирида АД да йўқотишлари ва моментнинг пульсациялари минимал бўлади; ўзгарткичнинг элементларида ҳам минимал йўқотишлар бўлади; Бундай талаблар ўзаро мос тушмаслиги мумкин, чунки, АД ишини-нинг яхшилаш мақсадида йўналтирувчи частотани ошириш, ўзгарткичнинг йўқотишларни камайтиришда эса частотани пасайтириш зарурдир.

Иккала талабни қондириш учун, “ЧЎ – АД” тизимини электромагнит жараёнлари таҳлил қилиниб, керакли тадбир қабул қилиниши зарур.

### **3.2. Асинхрон двигателнинг статор токини модуль бўйича бошқариш усули**

Статор токининг модули бўйича бошқариш усулининг мазмуни шундаки, бунда ШИР чиқишидаги кучланиш, ростлангангаётган АКИ коммутацияси  $\Theta = 180^\circ$  қонуни бўйича компаратордан олинаётган сигналга кўра амалга оширилади ҳамда у статорнинг токи модулини белгиланган қийматига эришиш моментларини белгилайди [8,9]. Ушбу бошқарув усулида, АКИ чиқишидаги кучланиш частотаси, тизимдаги электромагнит жараёнлар билан аниқланади ва ШИР чиқишидаги белгиланган кучланишида статор токининг модули чекланади.

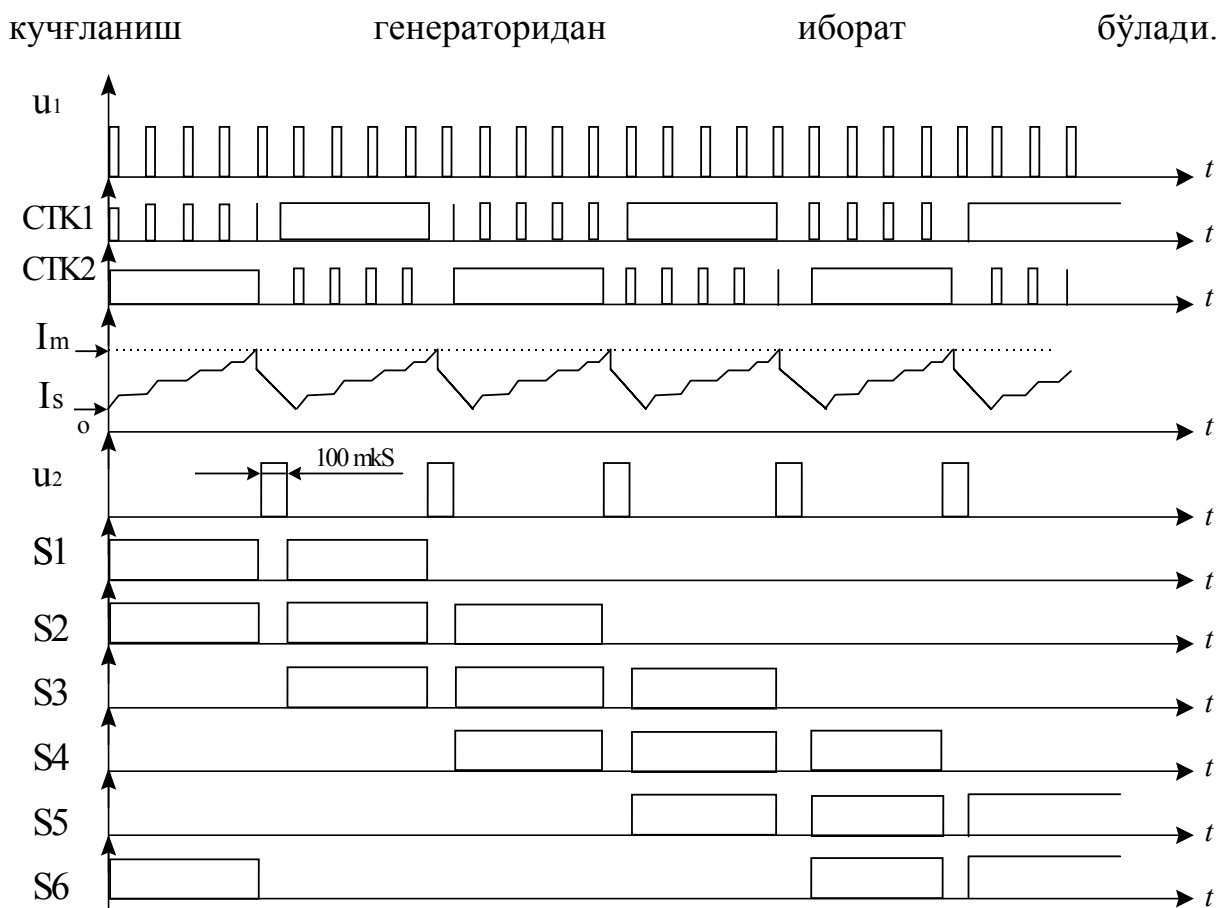


**3.3- расм. Тезлик бўйича датчиксиз асинхрон ЭЮ нинг функционал схемаси**

“СУ – АД” тизими асосида статор токининг модули бўйича бошқариладиган электр юритмани схемаси 3.3 – расмда келтирилган.

АКИ уч фазали кўприкли схема бўйича бажарилиб, тиристорларини коммутацияси  $\Theta=180^0$  ли қайта улаш алгоритмига асосланган. ТК1 ва ТК2 ёрдамида ўзгармас ток бўғинида йўналтирувчи частота асосида ШИР амалга оширилади. ТК ларнинг коммутация кетма–кетлиги ҳамда S1...S6 тиристорларини қайта улаш алгоритми бошқариш схемаси томонидан шакллантирилиб, 3.4-расмда кўрсатилган диаграммаларга мос ҳолда бажарилади.

Бошқариш схемасининг асосий функционал тугунлари 3.5–расмда келтирилган. Бошқариш сигнали  $\gamma$  жаддалик топшириқгичи ЖТ дан келиб, бунда вазиятга кўра, АД нинг тезланиш ва тўхтатиш вақтлари 0 дан 30 сек. гача ўрнатиб белгиланиши мумкин. ЖТ чиқишдаги сигнал ШИР га берилади. Ушбу ростлагич компаратор К ҳамда арра тишисимон

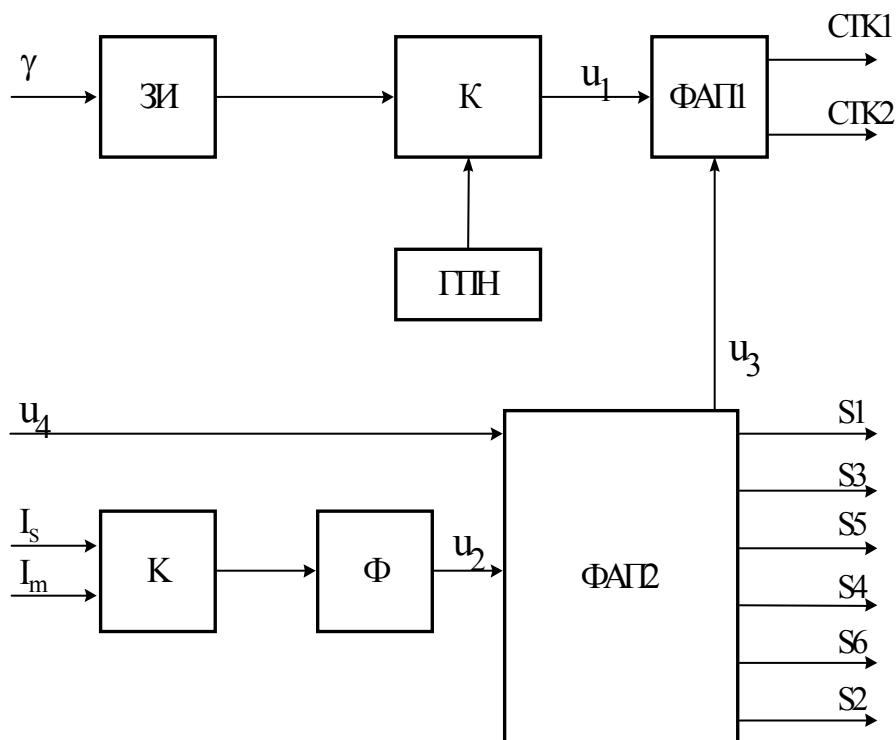


**3.4- расм. Чў нинг бошқариш тизими ишини тушунтирувчи сигналлар диаграммаси**

TK1 ва TK2 нинг коммутация кетма-кетлиги 3.4-расмда берилган  $K$  чиқишида  $U_1$  сигнали асосида транзисторларни қайта улаш алгоритмини шакллантиргич КУАШ1 нинг схемаси ҳамда тиристорларни қайта улаш алгоритмини белгиловчи КУАШ2 нинг схемаси чиқишидаги  $U_3$  сигнали томонидан ўрнатилади. Бунда импульс кенглиги бўйича ростлаш битта транзисторнинг коммутацияси орқали бажарилади, бунда иккинчиси эса доимо узилган ҳолатда бўлади. Ишлашнинг бундай алгоритми ТК ларни коммутацияси пайтида динамик йўқотишларни камайтиради.

КУАШ2 схемаси тиристорларни ҳолатини улаш кетма-кетлигини қуйидагича шакллантиради: S1-S2-S3, S2-S3-S4, S3-S4-S5, S4-S5-S6, S5-S6-S1, S6-S1-S2 в.х. S1...S6 сигналлари КУАШ2 схемаси чиқишидан гальваник жихатдан узиш ГЖУ схемасига ўтиб (3.3-расм), тегишли тиристорларнинг бошқарув электроддига келади. Тиристорларни тўғри ёки

тескари улаш кетма-кетлигини аниқлаш айланиш йўналишини белгиловчи  $U_4$  сигнал билан белгиланади.



### 3.5 - расм. Датчиксиз асинхрон ЭЮ частота ўзгарткичининг бошқариш тизимини функционал схемаси

Киришдаги сигнал  $I_m$  ток бўйича уставкасини белгилайди ва у ўзгарткич чиқишидаги максимал токни аниқлайди. Ток датчиги ТД да олинган сигнал ва компаратор К нинг ток бўйича  $I_s$  уставкаси ҳамда вибратор В ёрдамида  $U_2$  сигнали шакллантирилиб, улар тиристорларни қайта улаш учун берилади.  $U_2$  сигнали ўтаётган вақтда иккала ТК узилади ва тиристорлардан бошқариш кучланиши олинади АД нинг тезлигини ростлаш  $\gamma$  сигнали билан белгиланади ва бунда АКИ нинг чиқишдаги кучланишининг ўртача модули ўрнатилади. Коммутация частотаси автоматик равишда ўрнатилиб, у АД валидаги юкламага ва  $I_m$  сигналига боғлиқ бўлади.

### 3.3. Двигател статор токининг модули бўйича бошқариладиган ЭЮ лардаги электромагнит жараёнларини тадқиқот этиш

“Чў - АД” тизимидаги электромагнит жараёнларнинг тахлили, АКИ ва АД нинг бошқариш усулларига асосланган. Шу сабабдан, АКИ ни

асосий ва йўналтирувчи частота асосида импульс кенглиги бўйича ростлаш пайтида бошқарилганда силжимас координаталар тизимидаги статорнинг натижавий кучланиш вектори олтига аниқ холатни олади (3.2 - расм).

АКИ нинг чиқишидаги кучланишни ўртача натижавий вектори (3.3) тенглама орқали аниқланади:

$$\bar{u}_s = \gamma U_s \cdot e^{k\pi/3}, \quad (3.4)$$

Бунда:  $k = 0, 1, 2, \dots, 5$ .

Бундай холат учун, масаланинг ечими АКИ ни ўзгармас тузилиши бўлган  $\pi/3$  интервалида олиб борилиб, электромагнит ўзгарувчиларнинг оний қийматини аниқлаш мумкин. ЭЮ нинг квазитурғун режимининг тенгламали ифодаси (2.3), (2.4) тенгламалар орқали чиқарилади ва бунда [22]

$$\omega_k = 0:$$

$$\bar{u}_s = R_s \bar{i}_s + d\bar{\Psi}_s / dt,$$

$$0 = R_r \bar{i}_r + d\bar{\Psi}_r / dt - j\omega \bar{\Psi}_r,$$

$$\bar{\Psi}_s = L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r, \quad (3.5)$$

$$\bar{\Psi}_r = L_m \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r,$$

$$\bar{M} = \frac{3}{2} \bar{\Psi}_s \bar{i}_s.$$

бунда  $\bar{u}_s, \bar{i}_s, \bar{i}_r, \bar{\Psi}_s, \bar{\Psi}_r$  - статор ва ротор ўзгарувчиларини ўртача натижавий векторлари.

Алгебраик ҳисобларни осонлаштириш учун нисбий бирликлар киритилади. АД нинг кўрсаткичлари нисбий бирликда берилиб, улар кичик ораликда ўзгаради, бундай ҳисобларнинг натижалари кўпчилик амалий холатларда қўлланиши мумкин. Қуйидаги асосий кўрсаткичлар базавий сифатида қабул қилинади:

- $I_{\neq} = \sqrt{2} I_{ном}$  - номинал фаза токининг максимал қиймати;

- $U_{\dot{z}} = \sqrt{2/3} U_{\text{ном}}$  - номинал фаза кучланишининг максимал қиймати (номинал берилганларда чизиқли кучланиш кўрсатилади);

- $Z_{\dot{z}} = U_{\dot{z}} / I_{\dot{z}}$  - қаршилик;

- $\Psi_{\dot{z}} = U_{\dot{z}} / \omega_{\text{ном}}$  - оқим илашиши ( $\omega_{\text{ном}}$  - манбаловчи тармоғнинг номинал айланма частотаси);

- $P_{\dot{z}} = 3U_{\dot{z}}I_{\dot{z}} / 2$  - қувват;

- $M_{\dot{z}} = p_{\Pi}P_{\dot{z}} / \omega_{\text{ном}}$  - момент.

Тенгламалар нисбий бирликда ёзилганда, хақиқий қийматлар билан кўрсатилгандаги белгилар ишлатилади,  $\alpha = \omega_1 / \omega_{\dot{z}}, \nu = p_{\Pi} \omega / \omega_{\dot{z}}$  лардан ташқари.

Бундан ташқари, сирпанишнинг нисбий бирлигидаги қиймати ўзгармайди, чунки абсолют сирпаниш  $\beta$  нисбий бирлигида қуйидагича наикланади:

$$\beta = (\omega_1 - \omega) / \omega_{\dot{z}} = \alpha - \nu,$$

бунда сирпаниш эса:  $s = \beta / \alpha$  (3.6)

Вақт ва дифференциялаш оператор белгилари ўзгармасдан қолади ва  $t_{\dot{z}} = 1 / \omega_{\dot{z}}$  бўлганда  $p^{\odot} = p / \omega_{\dot{z}}$  қабул қилинади. (3.2) тенгламалар тизимини нисбий бирликларда қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\bar{U}_s = R_s \bar{i}_s + p \bar{\Psi}_s,$$

$$0 = R_r \bar{i}_r + (p - j\alpha) \bar{\Psi}_r,$$

$$\bar{\Psi}_s = X_s \bar{i}_s + X_m \bar{i}_r, \quad (3.7)$$

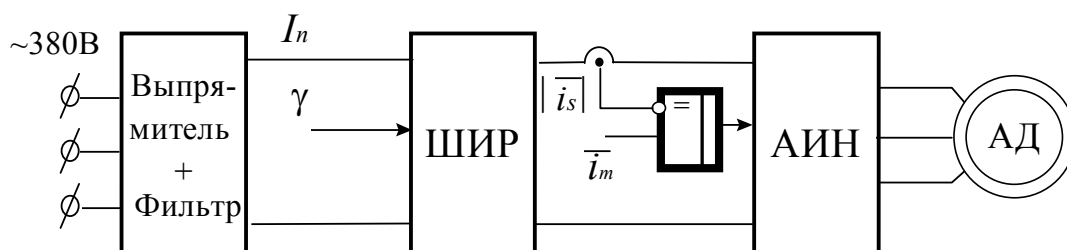
$$\bar{\Psi}_r = X_m \bar{i}_s + X_r \bar{i}_r,$$

$$\bar{M} = \bar{\Psi}_s \bar{i}_s.$$

бунда:  $p$  - дифференциялаш оператори.  $d / dt; X = \omega_{\dot{z}} L / Z_{\dot{z}}$ .

3.6-расмда АД ли универсал ЭЮ нинг функционал схемаси келтирилган бўлиб, бунда бошқариш статор токининг модули бўйича амалга

оширилади. Ушбу тизимдаги электромагнит жараёнларини тахлили анча мураккаб АКИ нинг қайта улаш ҳолатида моментларни ноаниқлиги сабабли, такрорланиш интервали чегарасини бошланғич шартларини аниқлаш мумкин бўлмайди. Лекин масалани ечиш учун (2.1) ва (2.5) тенгламалар асосида бошланғич нул қийматларни аниқлаш мумкин.



**3.6-расм. АД статор токи бўйича бошқариладиган ЭЮ нинг функционал схемаси**

АКИ нинг ўзгармас тузилишида ЭЮ ни квазитурғун ишчи режимида (2.1) тенгламалари нисбий бирликларда қуйидаги кўринишга келтирилиб, бунда квазитурғун режим учун  $\omega_k=0$  бўлганда қуйидаги кўринишни олади.

$$\bar{U}_s = R_s \bar{i}_s + p \bar{\Psi}_s,$$

$$0 = R_r \bar{i}_r + (p - j\alpha) \bar{\Psi}_r,$$

$$\bar{\Psi}_s = X_s \bar{i}_s + X_m \bar{i}_r,$$

$$\bar{\Psi}_r = X_m \bar{i}_s + X_r \bar{i}_r, \quad (3.8)$$

$$\bar{M} = \bar{\Psi}_s \bar{i}_s.$$

бунда  $p$  - дифференциялаш оператори.  $d/dt; X = \omega_{\ddagger} L / Z_{\ddagger}$ .

Натижавий векторни ҳақиқий ва мавҳум силжимас ўқлар бўйича комплекс юзасида тақсимлаб, (3.8) тенгламани фазовий ҳолатлар шаклида келтирамиз. Бундай ҳолатларнинг ўзгарувчилари сифатида оқим илашишларни проекцияси ёки ҳақиқий ва мавҳум ўқларига токнинг проекцияси орқали танланиши мумкин. (3.8) тенгламалар тизимига кўра:

$$p\mathbf{i} = \mathbf{A}\mathbf{i} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad (3.9)$$



бунда  $\mathbf{A}$  - ўлчами  $[4 \times 4]$  бўлган ҳолатларнинг квадратик матрицаси,  $\mathbf{B}$  - ўлчами  $[4 \times 2]$  бўлган бошқариш матрицаси,  $\mathbf{i}$  - ўлчами  $[4 \times 1]$  бўлган ҳолатнинг ўзгарувчи вектори,  $\mathbf{u}$  - ўлчами  $[2 \times 1]$  бўлган бошқариладиган таъсирлар вектори. Матрицанинг элементлари қуйидаги нисбатлар билан белгиланган

$$\mathbf{A} = \frac{1}{\sigma} \begin{bmatrix} -R_s / X_s & vK & K_s R_r / X_r & vK_s \\ -vK & -R_s / X_s & -vK_s & K_s R_r / X_r \\ K_r R_s / X_s & -vK_r & -R_r / X_r & -v \\ vK_r & K_r R_s / X_s & v & -R_r / X_r \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{\sigma X_s} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -K_r & 0 \\ 0 & -K_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{\alpha s} \\ u_{\beta s} \end{bmatrix}$$

бунда  $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$  - тарқалишнинг натижавий коэффиценти,  $K = L_m^2 / (L_s L_r)$  - боғланишнинг натижавий коэффиценти,  $K_s = L_m / L_s$ ;  $K_r = L_m / L_r$  - статор ва роторнинг боғланиш коэффиценти. (3.9) ҳолат тенгламаларининг ечими қуйидагича ифодаланади:

$$\mathbf{i}(t) = e^{\mathbf{A}t} \mathbf{i}(0) + (e^{\mathbf{A}t} - 1) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (3.11)$$

Нисбий бирликда (2.5) тенгламасини ечими қуйидагича бўлади:

$$v(t) = v(0) + (M - M_c) t / H. \quad (3.12)$$

бунда  $H = J \omega_c \omega_{\dot{\varphi}} / M_{\dot{\varphi}}$ ,  $\omega_c$  - синхрон тезлик. ШИР нинг йўналтирувчи частотаси даврида электромагнит жараёнлари кўриб чиқилса, бунда, уларни тахлилини олиб бориш, ўзгарувчи кўрсаткичли тенгламалар тизимини рекуррент ечими асосида бажарилади:

$$\begin{aligned} \mathbf{i}(m+1) &= e^{\mathbf{A}(v(m))T_0} \mathbf{i}(m) + [e^{\mathbf{A}(v(m))T_0} - 1] \mathbf{A}^{-1} (v(m)) \mathbf{B} \mathbf{u}(k), \\ v(m+1) &= v(m) + T_0 [M(\mathbf{i}(m)) - M_H] / H, \\ \mathbf{u}(k+1) &= \mathbf{T} \mathbf{u}(k) \end{aligned} \quad (3.13)$$

бунда  $t = mT_0$ ,  $T$  - симметрия матрицаси

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0,5 & -0,86 \\ 0,86 & 0,5 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

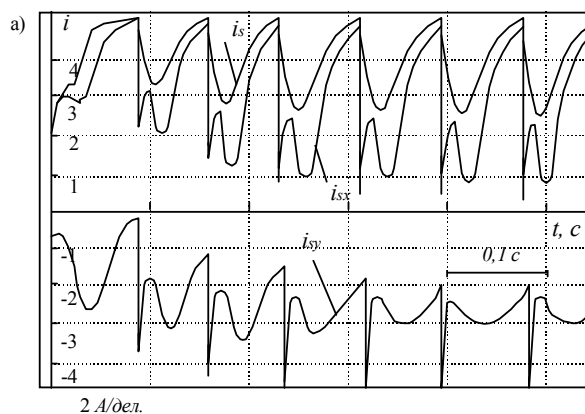
Бошланғич шартлари

$$i(0) = 0, v(0) = 0, u(0) = [\gamma U_\epsilon, 0]. \quad (3.15)$$

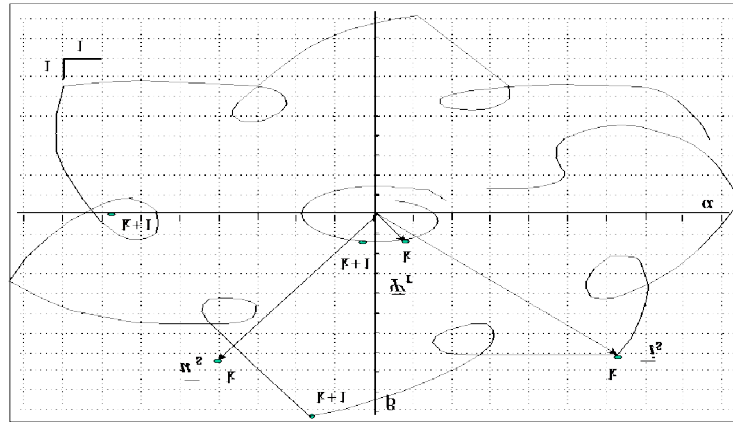
$A$  матрицаси ва  $M$  моментнинг ўзгарувчан элементларини рекуррент процедураси ҳар қайси қадамида ўзгармас бўлади ва кейинги қадамга ўтганда ўзгаради. Бунда статор токини модули ҳам ҳисобланади:

$$|\bar{i}_s| = \sqrt{i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2} \quad (3.16)$$

ва агар олинган натижа  $I_m$  уставкаси билан тенг бўлса,  $k$  бўйича рекуррент процедура  $k + 1$  қадамга ўтади. Юқорида келтирилган ҳисоблар кетма-кетлиги реал электр юритмадаги электромагнит жараёнларини моделлаштириш имконини беради. Бунда ҳисобнинг қуйидаги алгоритми қўлланилади. Дстлабки қийматлар сифатида АД нинг кўрсаткичлари ҳамда (3.15) бошланғич шартлар қабул қилинади. Бундан кейин  $\gamma$  ва  $I_m$  бошқариш таъсири қийматлари киритилиб, юклама моменти  $M_H$  ҳам киритилади. (3.12), (3.15) тенгламалар орқали ҳисобларни рекуррент цикллари олиб борилади ва электромагнит ҳамда электромеханик жараёнларининг графиги чиқарилади. Ишлаб чиқилган дастур ёрдамида ЭЮ нинг ўтиш ва турғун ишчи режимларида электромагнит жараёнларини аниқлаш турли бошқарувчи ва тўлқинлантирувчи таъсирларида бажарилган. Ҳисоблар натижалари 3.7 ва 3.8 – расмларда келтирилган ва бунда қуйидагилар ифодаланган:

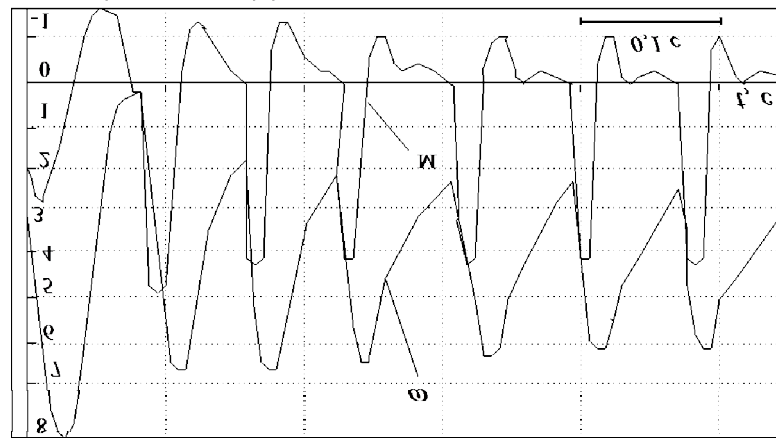


2 В\96я I \96я I В\96я



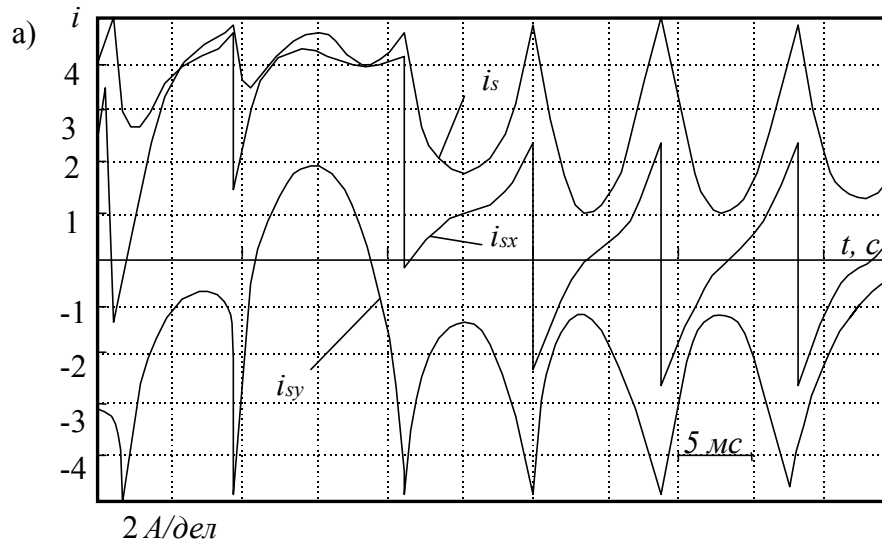
e)

3 И\96я I'2 В\96я\96я

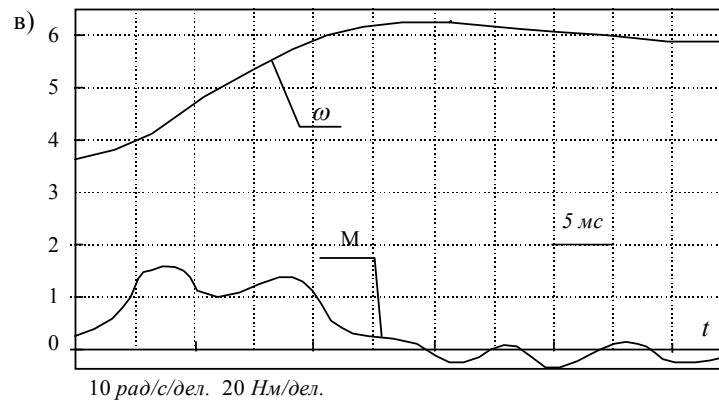
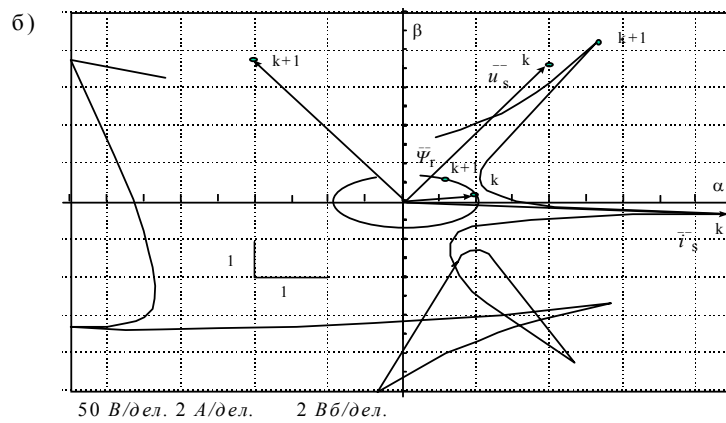


в)

3.7- расм. (3.9) тенгламалар бўйича олиб борилган ҳисоблар натижаси, бунда  $\lambda=0,1$ ;  $I_m=10$  А,  $M_H=1$  Нм



2 А/дел



**3.8-расм. (3.9) тенгламалар бўйича олиб борилган ҳисоблар  
 натижаси,  
 бунда  $\lambda=0,45$ ;  $I_m=10$  А,  $M_n=1$ Нм**

$a$  – статор  $\bar{i}_s$  токининг вектори модули ва унинг координаталар ўқиға проекцияси кучланиш вектори билан мослаштирилган. Бунда токнинг актив ташкил этувчиси -  $\bar{i}_{sx}$ ,  $\bar{i}_{sy}$  - эса реактив ташкил этувчиси ( $\bar{i}_{sx}$  проекцияси АКИ нинг манба занжиридаги ток).  $b$  - ток векторини годографи  $\bar{i}_s$  ва роторнинг оқим илашиши -  $\bar{\Psi}_r$ ,  $\omega$  – роторнинг айланиш тезлиги  $\omega$  ва электромагнит моменти  $M$ .

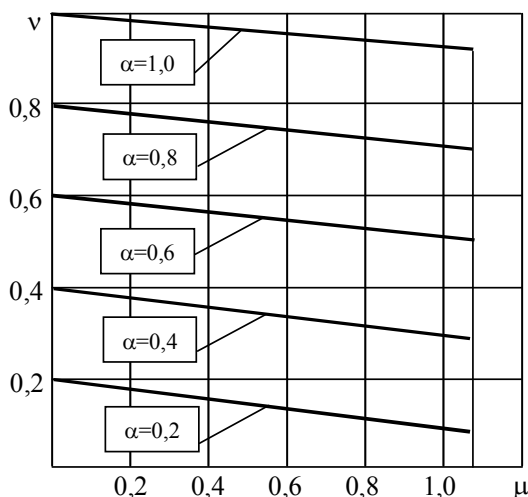
$\gamma=0,04$ ,  $M_n=1$ Нм,  $I_m=4$ А бўлгандаги турғун режимнинг ҳисобларини натижалари (бу тезликлар бўйича ростлашнинг пастки диапазони) кўрсатишича тезликлар бўйича пульсациялар 20 % ни, моментлар бўйича пульсациялари эса 100% ни ташкил этади. Лекин роторнинг оқим илашиши ўзгар-мас бўлиб қолади. ШИР нинг чиқишидаги кучланишнинг

ортирилиши ва токнинг модули 2,5 баравар ортиб кетиши (3.7-расм). Тезликнинг ўртача қиймати ва momenti ўзгармас бўлиб қолади ( $\lambda=0,1$ ;  $I_m=10$  А), лекин роторнинг оқим илашиши ортиб боради. Агар фақат кучланиш ортирилса, ( $\omega_{cp}=6,0$  с<sup>-1</sup>;  $M_{cp}=1$  Нм)  $\overline{\Psi}_r$  қиймати ўзгармасдан қолади, лекин, тезликнинг ўртача қиймати ортади.

Бунда ток проекциясининг эпюрасига эътибор бериш зарур. чунки улар АКИ нинг манбалаш занжиридаги энергиянинг қайтиш хусусиятини белгилайди. АД нинг бундай ишчи режими салт режимига яқин бўлади.

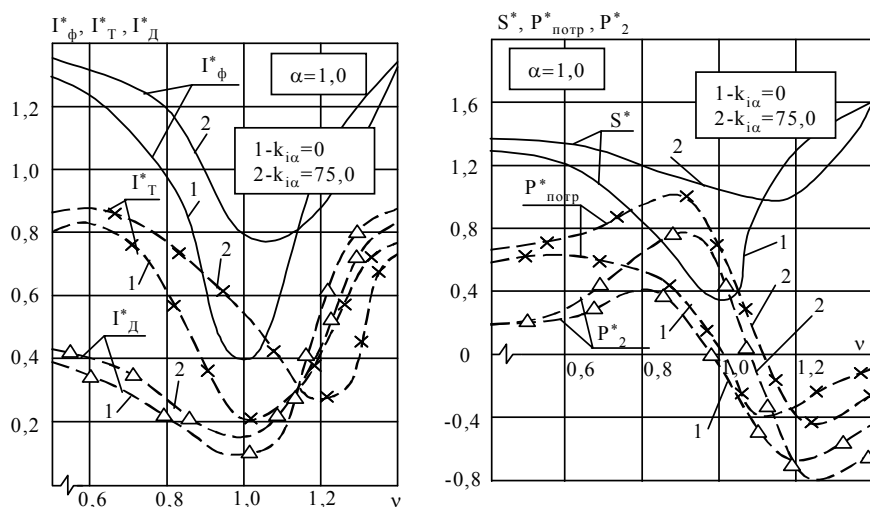
ЭЮ нинг турли ишчи режимлари учун келтирилган ток эпюралари, электромагнит юкламаларини аниқлашида ёрдам беради, ЧЎ нинг ярим ўтказгичли элементларини тўғри танлашда иштирок этади. Шундай қилиб, универсал датчиксиз тезлик бўйича ростланадиган ЭЮ ни ишлаб чиқишда, ярим ўтказгичли элементларни танлашда статорнинг максимал токини таъминлаш ҳисобга олинди. Кўриб чиқилган тизимда айтиб юқоридагилар статор токининг максимал модули билан характерланади.

3.9-расмда АД нинг, статор токининг модули бўйича ростланадиган ЭЮ нинг ҳисоби асосида чиқарилган, механик характеристикалари келтирилган. Номинал момент ( $M_n=16,7$  Нм) га яқин бўлганда, механик характеристикасини оғиши, двигателнинг статор токининг модули  $I_m=10$  А билан чекланади. Отсечка зонасида двигателнинг momenti ўзгармайди, чунки кўриб чиқилаётган усулга кўра. икки кўрсаткич ( $\overline{\Psi}_r = \text{const}$ ) ва ( $\beta = \text{const}$ ) барқарорлашган бўлиб, уларнинг қийматлари статор токининг модули  $I_m$  билан аниқланади.  $\beta = \text{const}$  бўлганда момент статор токининг квадратига пропорционалдир.  $\beta$  ни барқарорлаштириш даражаси асосан иш режими ва ЭЮ нинг тузилишига боғлиқ.



**3.9-расм. Двигателнинг статор токи бўйича бошқариладиган ЭЮ нинг механик характеристикалари**

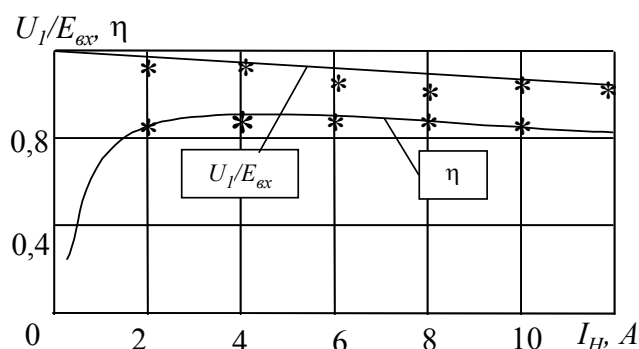
ЭХМ да ҳисобланган ЭЮ нинг электромагнит характеристикалари 3.10 – расмда келтирилган. Ушбу характеристикаларга кўра, юклама токнинг минимуми ва кучли токли транзисторининг минимум токи ишлаб чиқилган усулда АД нинг генератор режимида ҳосил бўлади.



**3.10-расм. Статор токи модули бўйича бошқариладиган ЭЮ нинг электр магнит характеристикалари**

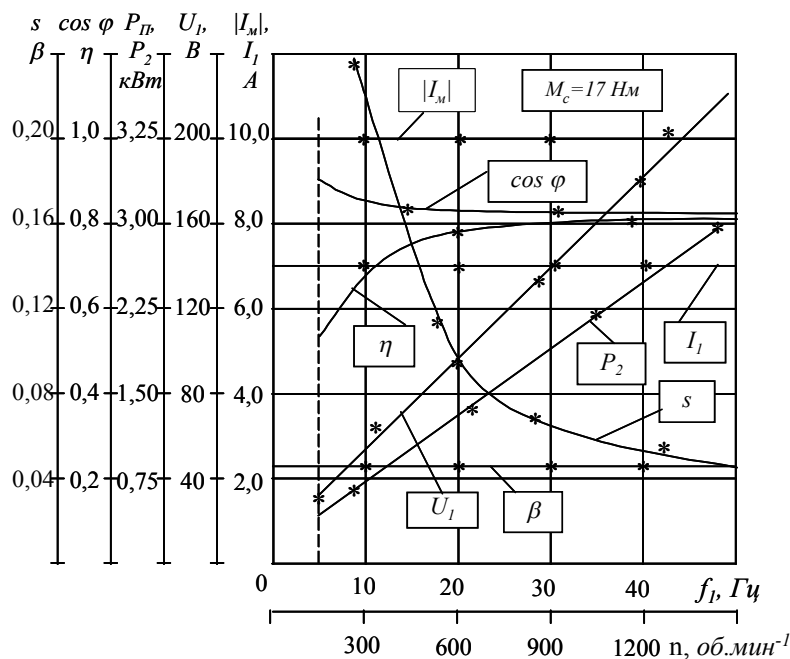
3.11-расмда ўзгарткич учун тажрибавий ташқи тавсифлар  $U_1/E_k = f(I_n)$  ва  $\eta = f(I_n)$  боғлиқлиги келтирилган. Кўриниб турубдики, АД нинг номинал токлар диапозонида ( $I_n=5,0...10,0$  А), кучланиш тушуви 7,5...10,0% ни ташкил қилади. Ташқи тавсифнинг бикирлиги частота-ўзгарткич схемасида транзисторли ростлагич ва коммутация узерига эга бўлмаган теристорли

инвертордан фойдаланиш, шунингдек теристорларни токсиз коммутация қилишни таъминлаш билан шуғулланади.



**3.11-расм. ЭЮ нинг тажрибавий ташқи тавсифи ва юритма Ф.И.К ини юклама токига боғлиқлиги**

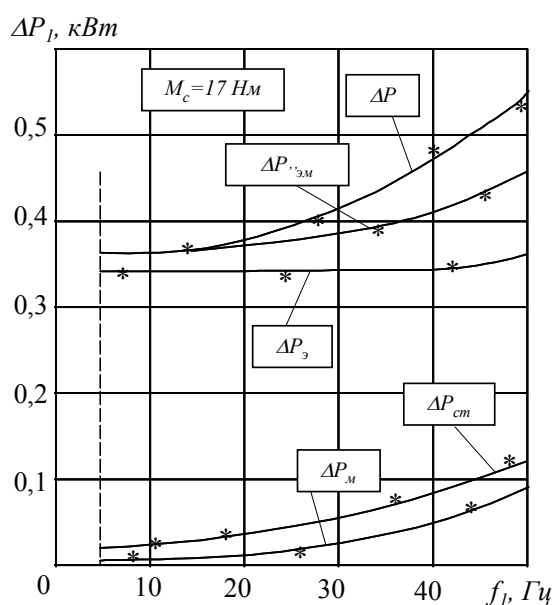
3.12-расмда ЭЮ нинг 4A100 двигателга улангандаги тажрибавий рост-лаш тавсифи кўрсатилган. Бунда тавсиф двигател статор токи модулини  $|I_M| = 10$  А га тенг чегаралангандаги ўзгармас юклама моменти  $M_H = 17,0$  Нм да олинган. Абсолют сирпаниш  $\beta_c = S_H = 0,043$  қийматда ўзгармасдан ушлаб турилади. Эгри чизиклардан кўриниб турубдики, двигател кучланиши нол частота ( $\alpha = 0$ ) да ҳам нолга тенг бўлмайди. Бундай ортиқчалиги двигател оқимини кўзгатиш учун керак бўлади.



**3.12-расм. Ўзгармас юкламадаги ЭЮ ни тажрибавий ростлаш тавсифлари**

Статор токи  $I_1$  частота  $f_1$  ортиши билан бир мунча ортади, бу ортиш двигател пўлатидаги исрофларнинг ортиши ҳисобига ҳосил бўлади. Частота  $f_1$  нинг ортиши билан АД тезлигининг ортганлиги сабабли худди шу йўналишда двигател валидаги қувват  $P_2$ , шунингдек истеъмол қилинаётган қувват  $P_{\text{п}}$  ўзгаради, сирпаниш  $S$  эса гиперболик қонун бўйича камаяди. Қувват коэффициентсенти  $\cos\phi$  частота  $f_1$  нинг камайиши билан бироз ортади, чунки двигател кучланиши амалий жиҳатдан частота  $f_1$  га пропорционал тарзда ўзгаради, истеъмол қилинаётган  $P_{\text{п}}$  эса жуда кам ўзгаради. Ф.И.К  $\eta$  частотанинг ортиши билан ортади, чунки двигателнинг фойдали қуввати  $P_2, M_{\text{н}} = \text{const}$  бўлганда ( $P_{\text{п}}$  қувватдан фарқли равишда), частота  $f_1$  нинг ўзгаришига нисбатан амалий жиҳатдан пропорционал ўзгаради.

3.13-расмда частотани механик исрофлар  $\Delta P_{\text{м}}$ , электрик исрофлар  $\Delta P_{\text{е}}$  (статор ва ротор чўлғамидаги исрофлар),  $\Delta P_{\text{ст}}$  – пўлатдаги исрофлар, шунингдек йиғма электр магнит исрофлар  $\Delta P_{\text{эм}} = \Delta P_{\text{е}} + \Delta P_{\text{ст}}$  ва двигателдаги йиғма исрофлар (бунда механик исрофлар  $\Delta P_{\text{м}}$  ҳам ҳисобга олинади). Тавсифлар ростлаш диапазони  $D=10:1, M_{\text{н}}=17 \text{ Нм}$  бўлганда олинган. Йиғма исрофлар  $\Delta P$  нинг асосий қисмини электрик исрофлар ташкил қилади, улар частотага амалий жиҳатдан боғлиқ бўлмайди.

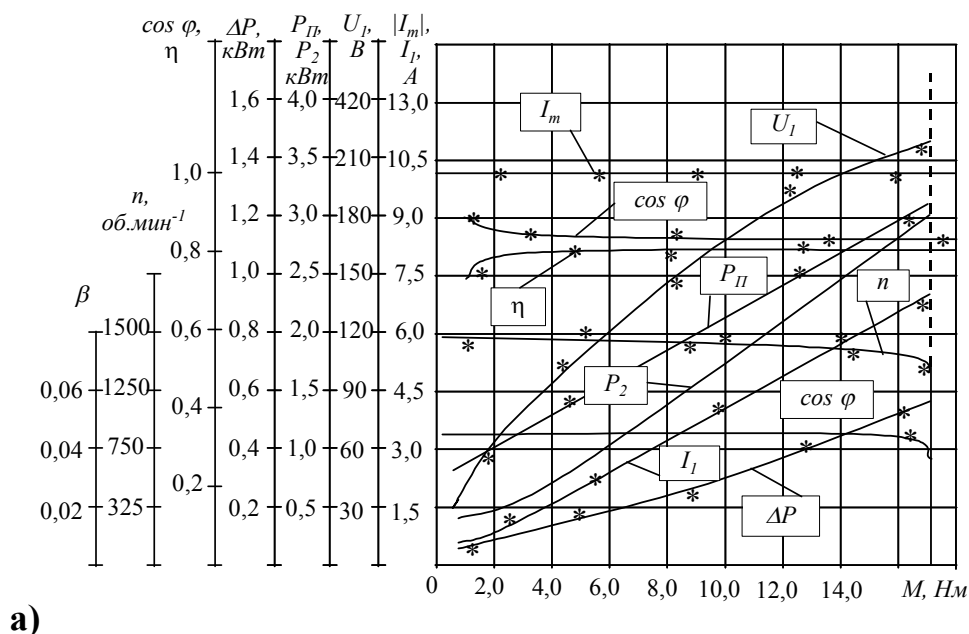


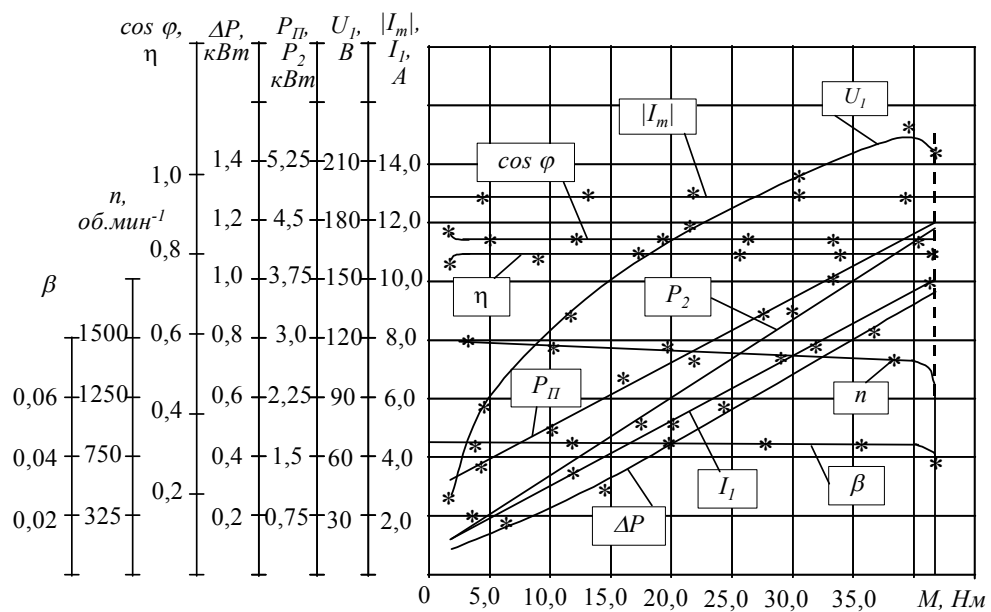
3.13-расм. Ўзгармас юкламадаги қувват исрофларини частотага боғлиқлигини эгри чизиқлари



4A100 турдаги АД учун номинал юкламада импульс ростлагичдан носинусоидал кучланишдан манбаланганда ҳосил бўладиган олий гармоникадаги исрофларнинг солиштирма ўлчови шуни кўрсатадики, пўлатдаги исрофлар  $\Delta P_{ст}$  тахминан 2 % га кўп, статор чўлғамидаги исрофлар эса 7 % га, ротор чўлғамидаги исрофлар 13 % га ортади. Бунда умумий электр магнит исрофлар, 12,5 % га кўпаяди. Шунинг учун Ф.И.К 1,6 % га камаяди, қувват коеффитсиенти 1,2 % га камаяди.

3.14, а,б расмларда ЭЮ нинг ишчи тавсифлари келтирилган. Улар мос равишда статор токи модулини  $|I_m|=10,0$  А ва  $|I_m|=13,0$  А қийматида чегаралангандаги юкламага боғлиқлиги келтирилган. Бунда юкламанинг ортиши билан двигателнинг статор токи амалий жиҳатдан чизиқли қонун бўйича ортади, бунга унинг ташкил қилувчиларини худди шундай ортиши сабаб бўлади. Двигател токининг ортиши сабабли тармоқдан олинаётган қувват  $P_{II}$  ва йиғма қувват  $\Delta P$  нинг ортиши ҳам кузатилади. Кичик юкламалар соҳасида қувват коеффициенти  $\cos\varphi$  ҳам ортади, бунга сабаб токнинг актив қувватининг ортишидир. Юклама ортиши билан  $\cos\varphi$  ўзгармасдан қолади. Кичик юкламаларда фойдали қувват ҳам амалий жиҳатдан чизиқли ўзгаради. Ф.И.К маълум бир юкламада ўзининг махимумига ( $\eta = \eta_n$ ) ва у юкламанинг ортиши билан ўзгармасдан қолади.





b)

**3.14-расм. ЭЮ нинг тажрибавий ишчи тавсифлари:**

**а) статор токининг модули  $|I_m|=10,0$  А;**

**б) статор токининг модули  $|I_m|=13,0$  А**

## Х У Л О С А

Ушбу ишда частотали ўзгарткичнинг универсал тузилишини ишлаб чиқиш масаласи кўриб чиқилган. Унинг бошқариш схемаси ва диагностикаси турли ўзгарувчан ток ЭЮ ларда қўлланиши назарда тутилган. Лойихалаштирилган частотали ўзгарткич функционал қурилма бўлиб, кўйидаги талабларга жавоб беради: энергия ва ресурсларни тежаш нуқтаи назаридан ростлнадиган электр юритмаларда ишлатилишга мосланган; юқори эксплуатацион характеристикаларга эга; умумсаноат серияли асинхрон ва синхрон машиналар бирикмасида ишлаш имкони яратилган, юқори техник кўрсаткичларга эга; сифатли ЭЮ лар тизимини қуриш мумкинлиги, хорижий мамлакатларда ишлаб чиқилган аналогларга рақобатбардошлиги.

Муаммони замонавий ҳолатини ўрганиб чиқиш ва мавжуд бўлган аналогларни таҳлил қилиш асосида масалани қўйиш ва асосий техник талабларни белгилаш амалга оширилган. ЭЮ нинг рақамли бошқарувида оптимал алгоритмни тузиш учун ЭЮ ларни бошқариш усуллари ва схемалари кўриб чиқилиб, асосий талаблар белгиланган ва микропроцес-сорли бошқарув тизими вазифаси аниқланган. ЭЮ учун двигател статор токининг модули бўйича бошқариш усули “Т-ШИР-АКИ-АД” структурасига кўра ишлаб чиқилган. Бунда ШИР чиқишидаги кучланиш ростланганда АКИ нинг коммутацияси статор токининг модули белгиланган қийматига  $I_m$  етганда амалга ошади, яъни АКИ нинг чиқишидаги кучланиш частотаси ШИР чиқишидаги белгиланган кучланишлар ҳамда статор токининг маълум модулида кечаётган тизимдаги электромагнит жараёнлар билан белгиланади.

Асинхрон ЭЮ лардаги электромагнит жараёнларининг таҳлили натижавий вектор усули асосида бажарилиб, тизимли ёндашув қўлланган. Бунда ЭЮ нинг математик идентификацияси, ҳар бир ихтиёрий ҳолат учун АД кўрсаткичлари ва характеристикаларини инобатга олинган. Бундан ташқари, ЭЮ ва ЧЎ нинг бошқариш усуллари ҳисобга олинган. Статор токининг модули бўйича бошқариладиган ЭЮ да кечадиган электр магнит

ва электр механик жараёнларнинг тахлили ҳамда услуби яратилган. Натижада қуйидагилар аниқланган: абсолют сирпаниш  $\beta$  ва роторнинг оқим илашиши  $\psi_r$  ўзгармас ушлаб турилиб, статор токининг модули билан  $I_m$  модули билан белгиланиши ҳамда ўзгармас бошқарувчи таъсир остида (ШИР чиқишидаги кучланиш  $\gamma = \text{const}$ ) АКИ нинг комутациясининг асосий частотаси АД валидаги юклама моменти ( $M_H$ ) билан аниқланади; поғонали бошқарувчи ( $\gamma$ ) ва таъсир қилувчиларда ( $M_H$ ) тизимнинг турғунлиги кўрсатилган.

ЭЮ нинг ва частота ўзгарткичини химоя ҳамда диагностика тизмлар тузилиши аниқланган бўлиб, бунда эслаб қолувчи қурилма микропроцессорли тизимнинг ихтиёрий танлаш имконига эга бўлиб, қуйидаги функцияларни амалга оширади: авария токидан, ўта кучланишдан, тезликнинг ошиб кетишидан, ўта юкланишдан, ўзгарувчан ток манбасининг узилишидан, тескари боғланишни узилишидан сақлайди; тизимнинг ишидаги хатоларини аниқловчи тахлиллар ва назоратланаётган қийматларни аниқлаб беради. ЭЮ ва ЧЎ ларни диагностика ҳамда химоя тизимларининг ишчи алгоритмлари тузилган. Асинхрон ЭЮ нинг ЧЎ билан бошқариладиган тизимнинг дастурли контроллерининг оптимал архитектураси ишлаб чиқилди. Контроллернинг дастури таъминоти TRACE MODE дастурлари асосида Техно FBD тилини қўллаб яратилган. Ушбу тилдаги алгоритмлар функционал блоklarнинг дияграммалари кўринишида ишлаб чиқилиб, яратилган тадбиқий дастурлар каналларнинг процедураларидан чақириб олиниши мумкиндир.

Асинхрон ЭЮ нинг кучли токли частота ўзгарткичи макет кўринишида ва технологик жараёни автоматлаштириш учун микропроцессорлик бошқаруви бажарилган. Тезлик бўйича датчиксиз бошқариладиган асинхрон ЭЮ статор токи модули бошқаруви усули асосида ишлаб чиқилган. Ўзгарткич тузилиши транзистор-тиристорли бажарилиб, бу ўзгарткичнинг куч токли қисмининг нархини пасайишига олиб келган. Бунда янги турдаги ярим ўтказгичли элементлар қўлланган.

АД нинг тезлигини ростлаш АКИ ни чиқишидаги ўртача модул билан белгиланган сигнал бўйича аниқланади. Коммутациянинг частотаси автоматик равишда ўрнатилиб, двигател валидаги юклама ва киришдаги сигналнинг ток бўйича берилган уставкасига кўра бажарилган. Чиқишдаги қувват 10 кВт, чиқишдаги кучланиш диапазони ва тезликни ростлаш диапазони 20:1 га тенгдир.

## Фойдаланилган адабиётлар

1. Мирзиёев Ш.М. Эркин ва фаровон демократик Ўзбекистон давлатини биргаликда барпо этамиз. Тошкент, "Ўзбекистон" НМИУ, 2017.
2. Мирзиёев Ш.М. Буюк келажакимизни мард ва олижаноб халқимиз билан бирга қурамиз. "Ўзбекистон" НМИУ, 2017. - 485 б.
3. Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги "Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида" ги ПФ-4947-сонли Фармони. Ўзбекистон Республикаси қонун ҳужжатлари тўплами, 2017 й., 6-сон, 70-модда.
4. Аксенов В.Е.и др. IGBT модули производства ОАО "Электровыпрямитель" / Электротехника. 2001. №12. с.12-16.
5. Арипов Н.М. Способ управления асинхронным электроприводом и устройство для его осуществления / Патент IAP 2002 0797, кл. 7H 02 P 532. опубл. 25.11.2004 г.
6. Арипов Н.М. Разработка функциональных схем систем управления частотно-регулируемых асинхронных электроприводов /Научно-техн. журнал ФерПИ. 2005. №3.
7. Арипов Н.М. Факторы определяющий выбор типа полупроводникового преобразователя и структуры силовых цепей перспективных систем электроприводов / НТЖ ФерПИ. Фергана. 1997. N1. с. 63-68.
8. Арипов Н.М. Анализ и реализации способа управления по модулю тока статора двигателя в асинхронном электроприводе/Проблемы информатики и энергетики. 2000.№6.с. 26.
9. Арипов Н. М. Анализ электромагнитных процессов в асинхронном электроприводе питающегося от преобразователя широтно-импульсным регулированием в инверторе. /Научно-технический журнал ФерПИ. Фергана. 1998. N1.
10. Арипов Н.М. Выбор законов частотного регулирования скорости двигателя и способов их реализации для асинхронных электроприводов шелкомотания /Научно-технический журнал ФерПИ. Фергана. 1998.

11. Асинхронный электропривод малой мощности с частотным управлением. / сост. Брейтер Б. З. Аналит. справка. Информэлектро. М. 1990.
12. Асинхронные электроприводы массовых серий за рубежом /сост. Д. Б. Белодедова. Аналит. справка. Информэлектро. М. 1991
13. Артющев В.В., Горячев О.В Микропроцессорная система управления на базе отечественного высоко производительного микроконтроллера для привода оптико-электронно системы. Тулгу 2016. N12 152-154 с
14. Барский В.А. и др. Создание серии IGBT преобразователей частоты для регулируемых асинхронных электроприводов /Электротехника. 1999. №7. с.38-41.
15. Брейтер Б.З., Размаш Я.Б. Некоторые тенденции развития зарубежных электроприводов / Электротехника. 1993. №6. с.42-44.
16. Бухаров Р.А Микропроцессорная система управления скоростью движения ленты конвейера. 2011. С 346-349
17. Буканова Т.С Микропроцессорная система управления электроприводом двумя степенями свободы. 2016. с 53-65
18. Дацковский Л.Х., Роговой В.И. и др. Современное состояние и тенденции в асинхронного частотно-регулируемого электропривода /Электро-техника, 1996. №10.с.18-28.
19. Иванов - Смоленский А.В. и др. Перспективы развития электромеханики в XX веке // Электротехника. 2000. №8.
20. Каракулов А.С Дементьев Ю.Н Микропроцессорная система прямого управления момента электроприводов на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами. Электромеханика. 2011. с 62-66
21. Кочетков В.Д. и др. Системы регулирования электропривода переменного тока с микропроцессорным управлением / Электротехн. пром-сть. Сер. 08. Электропривод: Обзор. информ. 1998. Вып. 26. 80с.
22. Ковач К.П., Рац Н. Переходные процессы в машинах переменного тока. Перев. С нем. М Госэнергоиздат. 2003. с 344

23. Козаченко В., Соловьев А. Новые DSP-микроконтроллеры фирмы Analog Devices ADMC300/330 для высокопроизводительных систем векторного управления электроприводами переменного тока// CHIP NEWS.1998.№ 5.С.16.
24. В.В.Корнеев А.В.Киселев Современные микропроцессоры – М.: 2000. 320 с.
25. Лоренц Л. Состояния и направления дальнейшего развития в сфере разработки, производства и применения силовых полупроводниковых приборов /Электротехника. 2001. №12. с.2-12.
26. Макаров И.М, Лохин В.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. 2001
27. Мищенко А.В., Масленникова И.С., Лобада В.Д., Фадеев А.Ф. Преобразователь частоты для энергосберегающих электроприводов массового применения /Электротехника, 1996. №12. с.39-40.
28. Новиков В.А., Рассудов Л.И. Тенденция развития электроприводов, систем автоматизации промышленных установок и технических комплексов /Электротехника.1996. №7.
29. Осипов О.И., Усынин Ю.С. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
30. Пелли Б.Р. IGBT-биполярные транзисторы с изолированным затвором / Электротехника. 1993. №6. с.42-44.
31. Разанов Ю.К., Флоренцев С.И. Электропривод и силовая электроника /Электротехника. 1997. № 11. с.7-12.
32. Силовые транзисторы в преобразовательной технике за рубежом /Аналит. справка. Информэлектро. М. 1990.
33. Силовые полупроводниковые модули (состояние и тенденции развития за рубежом) /Аналит. справка. Информэлектро. М. 1990.
34. Терехов В.М. Современные способы управления и их применение в электроприводе /Электротехника. 2000. №2. с.25-28.



35. Техническое обеспечение цифровой обработки сигналов. Справочник /Куприянов М.С., Матюшин Б.Д., Иванова В.Е. – СПб. “Форт”, 2000.
36. Флоренцов С.Н., Ковалев Ф.И. Современная элементная база силовой электроники /Электротехника. 1994. №4. с.2-7.
37. Хашимов А.А., Арипов Н.М. Исследование частотно – регулируемого асинхронного электропривода с реализацией способа управления по модулю тока статора двигателя / Электротехника. 2002, №1. с.14-19.
38. Шахнов В.А., Власов А.И., Кузнецов А.С., Поляков Ю.А. Нейрокомпьютеры – архитектура и схемотехника. – М.: Машиностроение. 2000. – 64 с. (Библиотечка журнала информационные технологии №9).
39. Юньков М.Г., Изосимов Д.Б., Москаленко В.В и др. Состояние и перспективы развития регулируемых электроприводов /Электротехника. 1994. №7.
40. ADSP-2100 Family User’s Manual. Third Edition.
41. *Gabriel R.* Mikrorechnergeregelte Asynchronmaschine, ein Antrieb für hohe dynamische Anforderungen // Regelungstechnik 32, 1994. H. 1. S. 18.
42. Leohard W. Adjustable - Speed AC Drives / IEEE Trans. Ind. Electron. V. 76. 1998. N 76. N 4. C. 171-183.
43. Siemens installierte Antriebe in nur 18 Tagen *Stahlmarkt* 2004
44. *Yochida Y., Ueda R. and Sonoda T.* A new inverter-fed induction motor drive with a function of correcting rotor circuit time constant // Proc. Int. Power Electr. Conf. – Tokyo. 1993. P. 672.
45. [www.gaw.ru](http://www.gaw.ru)
46. <http://ebus.mot-sps.com/ProdCat/sg/0,1251,M959617836292,00.html>
47. [www.cec-mc.ru](http://www.cec-mc.ru)