

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ  
ХУЗУРИДАГИ ИЛМий ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.03/10.12.2019.Т.03.03 РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**ХАМЗАЕВ АКБАР АБДАЛИМОВИЧ**

**ИССИҚЛИК ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСИНинГ ХУСУСИЙ ЭХТИЁЖ  
АГРЕГАТЛАРИНИ АСИНХРОН ЮРИТМАСИНИ ИШГА  
ТУШИРИЛИШИНИ МИКРОПРОЦЕССОР ЁРДАМИДА БОШҚАРИШ**

**05.05.02 – Электротехника. Электр энергетик станциялари, тизимлари.  
Электротехник мажмуалар ва қурилмалар**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**ТОШКЕНТ – 2021**

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси  
автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)  
по техническим наукам**

**Content of the dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)  
on technical sciences**

**Хамзаев Акбар Абдалимович**

Иссиқлик электр станциясининг хусусий эҳтиёж агрегатларини асинхрон юритмасини ишга туширилишини микропроцессор ёрдамида бошқариш. 3

**Хамзаев Акбар Абдалимович**

Управление пуском асинхронного электропривода агрегатов собственных нужд ТЭС с помощью микропроцессора ..... 23

**Khamzaev Akbar Abdalimovich**

Microprocessor control of asynchronous electric drive startup of TDV units of own needs..... 43

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ

List of published works ..... 47

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/10.12.2019.Т.03.03 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**ХАМЗАЕВ АКБАР АБДАЛИМОВИЧ**

**ИССИҚЛИК ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСИНING ХУСУСИЙ ЭҲТИЁЖ  
АГРЕГАТЛАРИНИ АСИНХРОН ЮРИТМАСИНИ ИШГА  
ТУШИРИЛИШИНИ МИКРОПРОЦЕССОР ЁРДАМИДА БОШҚАРИШ**

**05.05.02 – Электротехника. Электрэнергетик станциялари, тизимлари.  
Электротехник мажмуалар ва қурилмалар.**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**ТОШКЕНТ – 2021**

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2020.4.PhD/Г767 рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация иши Ислон Каримов номидаги Ташкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) ва “ZiyoNet” Ахборот таълим порталида ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)) жойлаштирилган.

**Илмий раҳбар:**

**Алимходжаев Камалиддин Тиллаходжаевич**

техника фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:**

**Камалов Толяган Сиражиддинович**

техника фанлари доктори, профессор

**Арипов Назиржон Мукарамович**

техника фанлари доктори, профессор

**Етакчи ташкилот:**

**Бухоро муҳандислик-технология институти**

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника университети ҳузуридаги DSc.03/10.12.2019.T.03.03 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил “10” сентябрь соат 11<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100095, Тошкент ш., Университет кўчаси, 2-уй. Тел./ факс: (99871) 227-10-32, e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz))

Диссертация билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (212 рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100095, Тошкент ш., Университет кўча, 2 уй. Тел./ факс: (99871) 227-03-41.

Диссертация автореферати 2021 йил «26» сентябрь куни тарқатилди. (2021 йил «25» сентябрь, 4 рақамли реестр баённомаси).



**Қ.Р. Аллаев**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш раиси  
техника фанлари доктори, профессор, академик

**О.Х.Ишназаров**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш илмий котиби,  
техника фанлари доктори, профессор

**Т.Ш.Ғойибов**  
Илмий даражалар берувчи илмий  
кенгаш қоғозидаги илмий семинар раиси,  
техника фанлари доктори, профессор

## КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳонда иссиқлик электр станцияларидаги катта қувватли ва юқори кучланишли асинхрон моторларни равон ишга туширилишига ҳамда улардаги энергия исрофларини камайтириш усуллари ва техник ечимларни аниқлашга алоҳида аҳамият берилмоқда. Ҳозирги кунда ривожланган мамлакатларда «... микропроцессор асосида транзистор ва тиристорли кучланиш ўзгартиркичи бошқарилмоқда. Мазкур тизимдан фойдаланиш юқори даражадаги ҳимояни таъминлайдиган ва ишлашини доимий равишда баҳолаш учун мониторингини ташкил этиш ҳамда қувватни ростлаш бўйича турли ёндошувлар мавжуд»<sup>1</sup>. Бу борада, жумладан энергетика саноатидаги мавжуд ва янги қурилаётган электр станцияларда энергия ва ресурсларни тежаш ҳамда улардан самарали фойдаланиш, катта қувватли юқори кучланишли асинхрон моторларни равон ишга туширишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда иссиқлик электр станциялари томонидан электр энергияни самарали ишлаб чиқаришни ривожлантиришнинг муҳим йўналишларидан бири – корхонанинг хусусий эҳтиёжларини катта қувватли ва юқори кучланишли асинхрон электр юритмаларини равон ишга тушириш, ишга тушириш тоқларини камайтириш, электр моторларни таъмирлашсиз хизмат муддатини ошириш, электр энергия ва ресурс сарфларини камайтиришга алоҳида эътибор қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, жумладан электр станцияларнинг хусусий эҳтиёж агрегатларининг катта қувватли юқори кучланишли асинхрон моторларини ишга туширилишини микропроцессорли бошқаришда ишга тушириш тоқини камайтириш бўйича тадқиқотлар устивор ҳисобланади. Шу билан бирга, иссиқлик электр станцияларида электр энергиядан фойдаланишни комплекс таҳлил қилиш асосида қўшимча энергия тежаш имкониятларини аниқлаш долзарб вазифалардан ҳисобланади.

Мамлакатимизда иқтисодиётнинг муҳим тармоқларидан бири ҳисобланган ишлаб чиқариш корхоналарида электр энергия ва бошқа ресурсларнинг сарфини камайтириш усуллари ишлаб чиқиш ҳамда ресурсларни тежайдиган қурилмалар ва технологияларни яратиш бўйича тадқиқотлар ўтказиш ва уларни амалда қўллаш бўйича кенг қўламли чоратадбирлар амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар Стратегиясида, жумладан, «...иқтисодиётнинг энергия ва ресурс сифимларини камайтириш, ишлаб чиқаришда энергия тежовчи технологияларни жорий этиш, қайта тикланадиган энергия манбаларидан фойдаланиш...»<sup>2</sup> каби вазифалар белгиланган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда иссиқлик электр станциясининг хусусий эҳтиёж агрегатлари асинхрон электр юритмаларини

<sup>1</sup> <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207218808945305?journalCode=tetn20>

<sup>2</sup> Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947 сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги Фармони.

ишга тушириш тоқларини камайтириш, таъмирлашсиз хизмат муддатларини ошириш мақсадида равон ишга туширишнинг янги усулларини ишлаб чиқиш ва уларни тадқиқ қилиш муҳим ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 23 августдаги ПҚ-3238-сон «Замонавий энергия самарадор ва энергия тежайдиган технологияларни янада жорий этиш чора-тадбирлари тўғрисида», 2017 йил 8 ноябрдаги ПҚ-3379-сон «Энергия ресурсларидан оқилона фойдаланишни таъминлаш чора-тадбирлари тўғрисида» ва 2019 йил 22 августдаги ПҚ-4422-сон «Иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳанинг энергия самарадорлигини ошириш, энергия тежовчи технологияларни жорий этиш ва қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланиш тўғрисида»ги қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларини амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республикада фан ва технологияларни ривожлантириш устивор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурс-тежамкорлик» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Жаҳоннинг етакчи илмий марказларида ва олий таълим муассасаларида, жумладан, Technische Universität Dresden, RWTH Aachen University, (Германия), Cambridge University (Буюк Британия), Москва миллий тадқиқот университети, Санкт-Петербург политехника университети (Россия Федерацияси), Украина Миллий техника университети (Украина), Тошкент давлат техника университети, «Илмий-техника маркази» МЧЖда (Ўзбекистон) асинхрон моторларни ишга тушириш ва частотавий ростлаш, технологик жараёнларни микропроцессор орқали бошқариш алгоритм ва схемаларини ишлаб чиқиш ва тадқиқ қилиш бўйича долзарб масалаларни ечишга қаратилган кенг қамровли илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Асинхрон моторларнинг бошланғич режимлари хоссаларини ўрганишга ва ўзгарувчан ток моторларини математик моделларини ишлаб чиқиш ва тадқиқ қилишдаги илмий муаммоларни ҳал қилишда бир қатор таниқли хорижий олимлар, жумладан Костенко М.П., Копылов И.П., Токарев Б.Ф., Соколов М.М., Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хамудханов М.З. и другие. Свой существенный вклад в создание и усовершенствование асинхронных электроприводов с тиристорным регулятором напряжения внесли многие ученые: Браславский И.Я., Нестеров К.Е., Зюзев А.М., Андрющенко О.А., Бойко А.А., Островлянчик Ю.В., Сарваров А.С., Петрушин В.С., Глазырин А.С., Cadirci M. Ermis M. Rahman (Турция), Saqib M.A. (Пакистан), Коваль А.С., Скарыно Б.Б. ва бошқалар ўз ҳиссасини қўшишган.

Республикамыз саноат корхоналарида кичик ва ўрта қувватли ўзгарувчан ток моторларини «тиристорли кучланиш ўзгартиркич-асинхрон мотор»,

«тиристорли частота ўзгартиркич-асинхрон мотор» тизимини яратиш бўйича қуйидаги олимлар Хамудханов М.З., Базаров Н.Х., Каримов Х.Г., Камалов Т.С., Хашимов А.А., Алимходжаев К.Т., Арипов Н.М., Ишназаров О.Х., Тоиров О.З. ва бошқалар томонидан илмий изланишлар олиб борилган ва кўплаб ижобий натижаларга эришилган.

Сезиларли муваффақиятларга қарамасдан, юқори кучланишли «тиристор кучланиш ўзгартиркич-асинхрон мотор» тизимини микропроцессор асосида бошқариш усули етарли даражада ўрганилмаган. Мазкур диссертация ишида микропроцессорли бошқарув ёрдамида катта қувватли асинхрон моторларни ишга тушириш режими учун тиристор кучланиш ўзгартиркич схемасини ишлаб чиқилган ҳамда агрегатларни равон ишга туширилиши ва унинг ечимлари таклиф этилган.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университети илмий тадқиқот ишлари режасининг ОТ-ЁАҲ-0301 рақамли «Ёш олимлар академик ҳаракатчанлиги» номли «Асинхрон электр юритмаларни бошқаришнинг замонавий усуллари тадқиқ этиш» (2017) мавзусидаги амалий лойиҳа доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** микропроцессор бошқарувидан фойдаланган ҳолда иссиқлик электр станциясининг хусусий эҳтиёж агрегатларини асинхрон электр юритмасини «тиристор кучланиш ўзгартиркич-асинхрон мотор» тизимли ишга тушириш схемасини такомиллаштиришдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

мавжуд ишга тушириш усуллариининг таҳлили ва юқори кучланишли катта қувватли асинхрон моторларни равон ишга туширилишининг ўзига хос хусусиятларини аниқлаш;

микропроцессорли бошқарув ёрдамида юқори қувватли асинхрон моторларни ишга тушириш режими учун тиристор кучланиш ўзгартиркич схемасини ишлаб чиқиш;

равон ишга тушириш режимида тиристор кучланиш ўзгартиркич асосида асинхрон моторнинг математик моделини ишлаб чиқиш ва уни ечиш алгоритмининг тузиш;

амплитудаларнинг нозичиқли гармоникаларини ҳисоблаш алгоритмининг ишлаб чиқиш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида иссиқлик электр станцияларининг хусусий эҳтиёж агрегатларини қисқа туташган роторли асинхрон моторлари ва тиристор кучланиш ўзгартиркич олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** иссиқлик электр станциялари хусусий эҳтиёж агрегатларининг юқори кучланишли ва катта қувватли асинхрон моторларини микропроцессор асосида тиристор кучланиш ўзгартиркичли бошқариш математик модели ташкил этади.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Тадқиқот жараёнида электр машиналар назарияси, электр юритмалар, автоматлаштирилган электр юритмалар,

автоматик бошқаришлар назарияси, чизикли электр занжирлар, ярим ўтказгичли техника, математик таҳлил қилиш усуллари қўлланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

тиристор кучланиш ўзгартиркичнинг параллел ва кетма-кет уланган тиристорлар гуруҳининг импульсларини микропроцессорли бошқариш асосида ишга тушириш усули такомиллаштирилган;

тиристор кучланиш ўзгарткичнинг ночизикли актив қаршилиқ асосида математик модели ишлаб чиқилган;

юқори кучланишли асинхрон моторни микропроцессорли тиристорли кучланиш ўзгарткичи асосида бошқариш усули такомиллаштирилган;

юклама ўзгаришини компенсациялаш асосида юқори кучланишли асинхрон моторни раван ишга тушириш схемаси ишлаб чиқилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

«тиристор кучланиш ўзгартиркич-асинхрон мотор – насос ускунаси» тизимининг энергия тежамкор иш режими ишлаб чиқилган;

микропроцессорли бошқариладиган «тиристор кучланиш ўзгартиркич-асинхрон мотор» тизимининг математик модели яратилган;

«тиристор кучланиш ўзгартиркич-асинхрон мотор» тизимининг имитацион модели ишлаб чиқилган;

микропроцессорли кичик қувватли «тиристор кучланиш ўзгартиркич-асинхрон мотор» тизимининг тажриба нусхаси ишлаб чиқилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** электр машиналари ва ярим ўтказгичли техника қонунларига асосланган математик моделнинг қиёсий таҳлили, аналитик ифодалар билан тасдиқланган назарий ва экспериментал натижаларининг ўзаро мос келиши билан асосланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти иссиқлик электр станциясининг хусусий эҳтиёж агрегатларини катта қувватли ва юқори кучланишли асинхрон моторларини микропроцессорли бошқариш ва тиристорли кучланиш ўзгартиркичи асосида раван ишга тушириш усули такомиллаштириш, микропроцессор қурилмаси ёрдамида ишга туширишнинг математик моделини ҳисоблаш алгоритмини ишлаб чиқиш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти тиристорли кучланиш ўзгартиркичнинг кучланиши ва қувватини оширишга имкон берувчи, кетма-кет ва параллел уланган тиристор гуруҳларидан иборат тиристорли кучланиш ўзгарткичи ёрдамида юқори кучланишли катта қувватли асинхрон моторни раван ишга тушириш усули ишлаб чиқилиши ва уни микропроцессорли бошқариш билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Юқори кучланишли катта қувватли асинхрон моторларни ишга тушириш учун «тиристор кучланиш ўзгартиркич-асинхрон мотор» тизимини қўллаш ҳамда микропроцессор ёрдамида уларни бошқариш имкониятлари ҳақидаги ахборотлар таҳлили бўйича олинган илмий натижалар асосида:

қуввати 5000 кВт таъминот насосининг ишга тушириш учун микропроцессор бошқарувли «тиристор кучланиш ўзгартиркич-асинхрон

мотор» тизими «Навоий иссиқлик электр станцияси» АЖДа жорий қилинган (Энергетика вазирлигининг 2020 йил 28 июлдаги 04-13-3946-сон маълумотномаси). Натижада, электр моторларнинг таъмирлашсиз хизмат муддатини 12 ойгача ошириш имконини берган;

қуввати 630 кВт сўрувчи вентиляторнинг ишга тушириш учун микропроцессор бошқарувли «тиристор кучланиш ўзгартиркич-асинхрон мотор» тизими «Навоий иссиқлик электр станцияси» АЖДа жорий қилинган (Энергетика вазирлигининг 2020 йил 28 июлдаги 04-13-3946-сон маълумотномаси). Натижада вентиляторнинг электр моторини иш режими оптималлаштирилган ва электр моторнинг таъмирлашсиз хизмат муддатини 19 ойгача ошириш имконини берган;

юқори кучланишли хусусий эҳтиёж агрегатларини равон ишга тушириш учун микропроцессор бошқарувли «тиристор кучланиш ўзгартиркич-асинхрон мотор» тизими «Навоий иссиқлик электр станцияси» АЖДа жорий қилинган (Энергетика вазирлигининг 2020 йил 28 июлдаги 04-13-3946-сон маълумотномаси). Натижада бир йилда 139 млн. сўм иқтисодий самарадорликка эришиш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Мазкур тадқиқот натижалари 2 та халқаро ва 1 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича жами 13 та илмий иш чоп этилган. Шулардан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг диссертациялар асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган республика журналларда 5 та, хорижий журналларда 3 та мақолалар чоп этирилган, ЭҲМ дастурий маҳсулот учун 2 та дастурий гувоҳнома олинган.

**Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши.** Диссертация кириш, тўрта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловадан иборат. Диссертация ҳажми 112 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида бажарилган тадқиқотларда амалга оширилган ишларнинг аҳамияти ва долзарблиги асослаб берилган, тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари келтирилган, объект ва предмет тавсифлари келтирилган, тадқиқотларнинг Республика фан ва технологиялар ривожланиш устувор йўналишларига мослиги, илмий янгиликлари ва амалий натижалари баён этилган, тадқиқотнинг илмий ва амалий аҳамиятилари очиб берилган, тадқиқот натижаларининг амалиётга татбиқ этиш, чоп этилган ишлар ва диссертациянинг структураси келтирилган.

Диссертациянинг «**Иссиқлик электр станцияларида юқори кучланишли асинхрон моторларни ишга тушириш муаммосининг жорий ҳолати**» деб номланган биринчи бобида мавжуд ишга тушириш усуллари ва юқори кучланишли катта қувватли асинхрон моторларни равон ишга тушириш усуллари хусусиятларининг таҳлили келтирилган.

Умумий ҳолда, электр юритмаларнинг ишга тушириш режимини яхшилаш учун тиристорли ўзгартгич-ўзгармас ток мотори (ТЎ-ЎТМ) тизимидан, бевосита боғланган частота ўзгартгич-асинхрон мотор (БЧЎ-АсМ) ёки/ва ўзгармас токли звеноси бўлган частота ўзгартгич-асинхрон мотор (ЎТЗЧЎ-АсМ) тизимлар ёрдамида тезликни равон бошқаришдан фойдаланиш мумкин эди. ТЎ-ЎТМ тизими электр юритма оғир иқлим шароитлари, шунингдек, техник хизмат кўрсатиш талаблари юқорилиги туфайли кенг қўлланилмайди.

Бирок, юқори кучланишли катта қувватли АсМларни бевосита ишга тушириш жиддий муаммоларга олиб келади, бунда асинхрон моторлар статор чўлғамида номинал токдан 5÷8 марта катта бўлган ишга тушириш токи пайдо бўлиши ва моторнинг қисқа мудатда ишдан чиқиши кузатилади.

Турли қурилмаларда ишлатиладиган юқори кучланишли катта қувватли АсМни ишга тушириш режимларининг таҳлили шуни кўрсатдики, ишга тушириш усуллари бир қатор камчиликларга эга ва янада такомиллаштиришни талаб қилади.

Диссертациянинг «**Юқори кучланишли катта қувватли асинхрон моторларни равон ишга тушириш муаммоларини микропроцессорли бошқариш орқали ечиш**» деб номланган иккинчи бобда ТКЎнинг кучланиш ва қувватини ошириш мақсадида, ТКЎ даги ҳар бир тиристор ўрнига кетма-кет-параллел уланган тиристор гуруҳлари (ТГ)ни киритиш орқали, муаммоларни ечиш йўллари кўриб чиқилган. Бундай ТКЎнинг ишончли ишлаши ТГдаги барча тиристорларнинг бир онда очилиши орқали амалга оширилади. Ушбу бобда тиристорлар очилишининг динамик жараёнлари тадқиқоти натижалари келтирилган бўлиб, тиристорларни бошқариш сигналига қўйиладиган талаблар ва тиристор коммутациясининг динамик жараёнига АсМ параметрларининг таъсир этиш даражаси кўрилган, ҳамда микропроцессорли бошқариш зарурати асослаб берилган.

Тиристорларни ишлаб чиқариш жараёнида вольт-ампер тавсифларининг технологиядан оғишлари, уларнинг кетма-кет ва/ёки параллел улаб ишлатиш жараёнининг оғир кечишига олиб келади. Бу ҳолат баъзи параллел ва кетма-кет уланган тиристорларнинг ток ва кучланиш бўйича ортиқча юкланишига ва натижада тиристорларнинг муддатидан илгари ишдан чиқишига олиб келади.

Ушбу камчиликларни бартараф этиш учун диссертация ишида параллел ва кетма-кет уланган тиристорлар очилишининг динамик режимлари танқидий таҳлиллари олиб борилди, шу билан бирга, мазкур моторни ТКЎ-АсМ тизимида ишлатиш нуқтаи назаридан, АсМни ишга тушириш динамик режимлари тиристорларнинг очилиш динамик кўрсаткичларига таъсири ҳам эътиборга олинди.

Вентиллар статик ва динамик режимларида тўғри йўналишдаги токнинг тиристорлар орасида равон тақсимланишини таъминлаш учун икки усулдан фойдаланиш мумкин: тавсифлари бир ҳил бўлган бир турдаги тиристорларни танлаш; қўшимча электр қурилмалари ёрдамида токларни мажбурий

тақсимлаш. Биринчи усул техник адабиётларда батафсил ўрганилган. Шу сабабли иккинчи усулни батафсил кўриб чиқамиз.

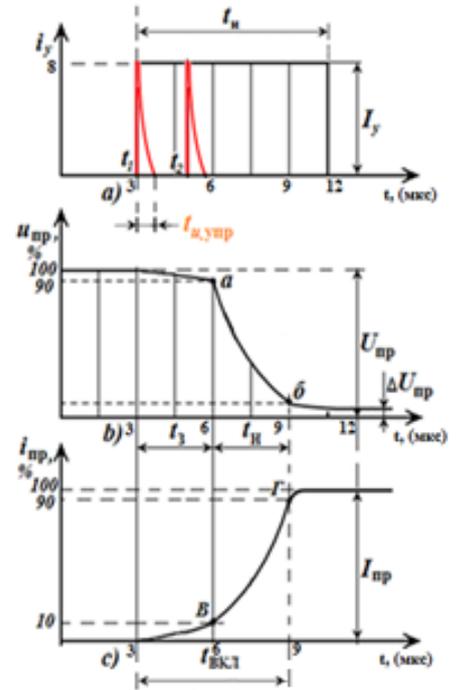
Агар тескари йўналиш токи ва уярма ток ўтказувчан ҳолатидаги тўғри йўналиш кучланишининг қиймати,  $p-n$  ўтиш сиғимлари, алоҳида тиристорлар очилиш ва ёпилиш вақтлари ўзаро мос бўлмаса, тиристорлар самарали ишлаш шартлари бажарилмайди - ТГ тиристорларнинг бир онда очилиш шартлари бажарилмайди.

Агар занжирда ягона тиристор бўлса, унга бошқариш импульси келиб, тиристор очилгандан кейин бошқарув токи  $I_y$  (1,а-расм) тиристор ишлашига бошқа таъсир этмайди. Шу сабабли ягона тиристорни бошқариш учун амалиётда давомийлиги  $t_{u. ynp.} = 1 \div 3$  мкс.дан ошмайдиган бошқариш импульси ишлатилади.

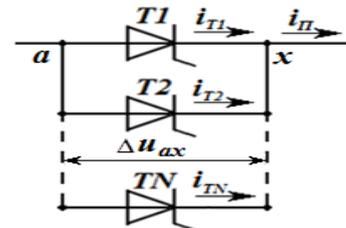
Тиристорлар кетма-кет уланганда, тиристорлардан бирига бошқариш импульси бирор кечикиш, масалан  $t_2 - t_1 > t_{u. ynp}$  билан келса (1,а-расм), унда занжир ёпиқ ҳолатда бўлади, чунки тиристорлар орқали  $I_{np}$  ток тўғри йўналишда (токнинг доимийлиги ҳақидаги қонун бажарилмаганлиги сабабли) оқиб ўтмайди, тиристорларнинг эмитер соҳасидан электронларни дастлабки ҳолатидагидек инжекция қилиш жараёни бошланмайди. Шундай қилиб, ягона тиристорнинг ишлаш жараёнидан фарқли равишда, кетма-кет уланган ТГнинг ишончли ишлаши учун қуйидагича таърифланадиган асосий талаблардан бири келиб чиқади. Кетма-кет уланган тиристорлар гуруҳидаги барча тиристорларга бошқарувчи сигнал бир онда (кечикмасдан) келиши шарт. Агар катта қувватли қисқа туташган роторли АСМларни ишга тушириш учун икки ва ундан ортиқ параллел уланган ( $N$ )та тиристорли ТКЎдан (2-расм) фойдалансак, у ҳолда АСМнинг катта ишга тушириш токи  $I_{иш} = (5 \div 8) \cdot I_n$  барча тиристорлар орасида равон тақсимланади. Бундай ҳолда, ҳар бир тиристор мотор ишга тушириш токининг бир қисми билан юкланади ва ток шу тиристор тури учун рухсат этилган миқдоридан кам  $I = I_{иш} / N$  бўлади.

Юқори қувватли АСМ бевосита ишга тушириш жараёнида параллел уланган тиристорлари бўлган ТКЎ ТГларининг очилиш динамикаси қўйидагича бўлади. Агар  $t_1$  вақт онда биринчи тиристор Т1нинг бошқарув электродига бошқариш сигнали узатилса, унда вақтнинг  $t_1 + t_{вкл}$  оралиғида (1,с-расм) у очилади ва Т1 тиристор орқали АСМ нинг тўлиқ ишга тушириш токи оқиб ўтиш жараёни бошланади (2-расм). Шундай вазиятда бошқарув

қийматлари, тиристор



1-расм. Электромагнит



2-расм. Тиристорларнинг параллел уланиши

электродига сигнал кечикиб келадиган (яъни,  $t_{1+} t_{\text{ВКЛ}}$  вақт оралиғида) иккинчи тиристор  $T2$  очилмайди, чунки шу онда  $T1$  орқали оқаетган ток миқдори ортишга улгуради ва кириш «а», чиқиш «х» нуқталар (2-расм) орасидаги потенциаллар фарқи  $\Delta u_{\text{ах}}$  жуда кичик бўлади (1,б-расм).  $T2$  тиристор бошқариш электроди сигналининг кечикиб келишининг жоиз қийматини аниқлаш учун, фараз қиламиз: сигнал  $t_{1+}\Delta t$  вақт онда келсин.

Агар  $t_3 \leq \Delta t \leq t_{\text{ВКЛ}}$  бўлса (1,с-расм), у ҳолда «а» ва «х» нуқталар (2-расм) орасидаги потенциаллар фарқи  $\Delta u_{\text{ах}} \approx (10 \div 90)\% \cdot U_{\text{пр}}$  га тенг бўлади,  $T1$  орқали ўтаётган ток тўлиқ ишга тушириш токи  $I_{\text{иш}}$  нинг (1,с-расм) 10% дан 90% гача жадал ортиб боради ва  $T2$  тиристорнинг очилиш эҳтимоли жуда кичик бўлади. Агар  $0 \leq \Delta t \leq t_3$  бўлса, «а» ва «х» нуқталар орасидаги потенциаллар фарқи  $\Delta u_{\text{ах}} \approx (100 \div 90)\% \cdot U_{\text{пр}}$  (1,б-расм) бўлиб,  $T1$  орқали ўтувчи тўлиқ ишга тушириш токининг  $I_{\text{иш}}$  қиймати 0% дан 10% гача секин ортади ва иккинчи  $T2$  тиристорнинг очилиш эҳтимоли юқори бўлади (2-расм). Бироқ, бу билан тиристор  $T2$  коммутация қобилятининг бузилиш эҳтимоли истисно этилмайди. Шу сабабли, ТГдаги параллел уланган тиристорларнинг, кетма-кет уланган тиристорлардаги каби, коммутация бузилишисиз ишлашининг биринчи ва зарурий шарти ТГдаги барча тиристорларга бошқариш сигналларининг бир онда узатилишидир.

Ушбу шартларни бажармаслик қуйидаги оқибатларга олиб келади.

Тиристор етарли даражада қисқа давомийликка эга бўлган бошқариш импульси ёрдамида очилгандан сўнг токнинг ўзгаришида - «кечкиш» вақт оралиғи  $t_3$  (1,с-расм) ва токнинг «ўсиш» вақт оралиғини  $t_{\text{н}}$  ни ўз ичига олган токнинг аста ортиб бориш жараёни келиши лозим.

Бунда, зарур бўлган тиристор коммутациясини таъминлашнинг асосий шарти - ҳар бир кетма-кет уланган тиристор орқали ўтаётган токнинг узлуксизлигини таъминлашдир. Тиристорлардан бирортаси очилиши кечикса ёки очилмаса ток узлуксизлиги принципининг бузилишига олиб келади. Демак, барча кетма-кет уланган тиристорлар берк ҳолатда бўлади ва электр занжири очилмайди. ТГдаги тиристорларнинг бир вақтда очилишини таъминлаш учун, тиристорларни бошқариш сигналлари  $u_{\text{и}}$  давомийлиги бир ҳил ва «кечкиш» вақт оралиғи  $t_3$  ва токнинг «ўсиш» вақт оралиғи  $t_{\text{н}}$  йиғиндисидан иборат бўлган очилиш вақт давомийлиги ( $t_{\text{ВКЛ}}$ )дан катта бўлиши шарт  $t_{\text{и}} > t_{\text{ВКЛ}} = t_3 + t_{\text{н}}$ .

Шундай қилиб, тиристорлардан фойдаланишнинг умумий қабул қилинган тавсияларида, бошқариш импульси давомийлигининг минимал миқдори кифоя, деб таъкидлангандан фарқли равишда, «ТКЎ-АсМ» тизимининг ТГ учун бошқариш импульсининг давомийлиги мазкур тиристорлар учун белгиланган «кечкиш» вақт оралиғидан катта бўлиши шарт.

Агар «кечкиш» вақт оралиғи  $t_3$  фақат тиристор турига боғлиқ бўлса, тиристорнинг очилиш вақт давомийлиги  $t_{\text{ВКЛ}}$  таркибига кирувчи токнинг «ўсиш» вақт оралиғи  $t_{\text{н}}$  юкланишнинг характериға ҳам боғлиқ (қуйида кўрилади).

Агар  $t_1$  вақт онда  $T1$  тиристорнинг бошқариш электродига бошқариш сигнали узатилса, у ҳолда  $t_1+t_{\text{ВКЛ}}$  вақт онда  $T1$  тиристор очилади ва у орқали ток АсМнинг тўла ишга тушириш токи оқабошлайди. Бошқариш электродига тиристорни очувчи сигнал ( $t_1+t_{\text{ВКЛ}}$  вақт онда) кечикиб келувчи тиристор  $T2$  очилмайди, чунки шу онда  $T1$  тиристор орқали оқайган ток сабабли, кириш «а» ва чиқиш «х» нуқталар (2-расм) орасидаги потенциаллар фарқи  $\Delta u_{ax}$  нолга тенг бўлади. Конденсаторли компенсатори (КК) бўлган АсМга мос келувчи ТКЎ юкланиши актив характерга эга, яъни  $\cos\varphi = 1,0$  бўлганда, тиристор очилгандаги токнинг шакли кучланиш шаклига ўхшаш бўлади.

Бунда тиристорнинг очилиш вақт давомийлиги  $t_{\text{ВКЛ}}$  минимал бўлади - тиристор коммутацияси бузилиш режимига яқин. Юкланиш актив-индуктив характерда бўлса, тиристордаги ток  $\cos\varphi$ га боғлиқ равишда кечикиш характерига эга бўлади. Юкланишнинг индуктив ташкил этувчиси ортиши билан тиристор очилиш вақтидаги токнинг ортиш суръати камаяди ва тиристор коммутацияси бузилиш кечикш эҳтимоли ортади.

Агар токнинг кечикиш вақти  $t_3$  тиристор турига боғлиқ бўлса, унда тиристорларнинг очилиш вақти  $t_{\text{ВКЛ}}$  таркибига кирувчи токнинг ўсиш  $t_H$  вақти юкланишнинг турига ҳам боғлиқ (қуйида кўрилади).

Агар  $t_1$  вақтда биринчи тиристорнинг бошқарув электродига бошқариш сигнали берилса, унда вақтнинг  $t_1+t_{\text{ВКЛ}}$  оралиғида (1,с-расм) у очилади  $T1$  тиристор орқали АсМнинг тўлиқ ишга тушириш токи оқиб ўта бошлайди (2-расм). Иккинчи  $T2$  тиристорнинг бошқарув электродига сигнал кечикиб тушгани (вақт  $t_1+t_{\text{ВКЛ}}$  оралиғида) сабабли у очилмайди, натижада  $T1$  тиристордан ток оқиб ўтиши сабабли ушбу онда кириш «а» ва чиқиш «х» нуқталар орасида потенциаллар фарқи  $\Delta u_{ax}$  нолга тенг бўлади. Актив юклама тавсифида, яъни КК билан АсМ режимига  $\cos\varphi = 1,0$  мос келганда, тиристор очик ҳолатида токнинг шакли кучланишнинг шаклини такрорлайди. Бундай ҳолда, тиристорнинг очилиш вақти  $t_{\text{ВКЛ}}$  нинг қиймати минимал бўлади. Бундай режим коммутациянинг бузилишига яқин режим ҳисобланади. Актив-индуктив юклама тавсифида тиристордаги ток  $\cos\varphi$  га боғлиқ бўлиб, шакли кучланишнинг шаклидан кечиккан ҳолатда бўлади. ТПН юкламасининг индуктив характери ортиши билан унинг очиш вақтида тиристорнинг ток кучи ортиши жадаллиги камаяди ва тиристорларнинг коммутация бузилишисиз очилиш эҳтимоли ортади.

Ҳисоблашлар шуни кўрсатдики, АсМнинг қисқа туташув қувват коэффиценти  $\cos\varphi = 0,45 \div 0,55$  бўлганда, параллел уланган ТГдан ташкил топган ТКЎнинг иши, тиристорларнинг бузилишларсиз коммутацияси нуқтаи назаридан, энг мақбул бўлади.

Агар АсМ қувват коэффиценти  $\cos\varphi$ нинг ўзгаришига сабаб бўлувчи омил мотор статор чулҳамига уланган КК эканлигини эътиборга олсак, у ҳолда ТКЎ-АсМ тизими коммутацияси бузилишсиз ишлаш шартларидан яна бири, ККни ҳеч қачон ТКЎнинг чиқиш қисмига эмас, балки фақат ТКЎнинг кириш қисмига улаш зарур.

Тез-тез ишга тушириш режимига эга бўлган автоматлаштирилган электр юритмалар тизимига мўлжалланган ТКЎнинг ишончли ишлашини

таъминлаш учун статор токи, ротор тезлиги ва бошқа қийматлар бўйича тескари боғланиш элементларини киритиш зарур. Шу билан бирга, АсМни ТКЎ ёрдамида пасайтирилган кучланиш билан ишга туширишда ишга тушириш токининг камайиши (бу усулни ишлаб чиқишнинг асосий мақсади) билан бирга, айлантурувчи электромагнит моментнинг ҳам сезиларли камайишига сабаб бўлади. Бундан ташқари АсМни ишга тушириш жараёнида тиристорларнинг очилиш бурчагини  $\theta = 180^\circ \div 0$  ораликда бошқариб кучланишни раво ёзгартириш натижасида, статор чулғамидаги кучланиш шакли носинусоидал кўринишда бўлади, токнинг учинчи, бешинчи ва юқори гармоник ташкил этувчилари ротор ва статор орасида ҳосил қилувчи айлантурувчи ва тормозловчи электромагнит моментлар ҳосил бўлади. Шунинг учун АсМнинг ишга тушириш жараёнида микропроцессор қурилмасидан фойдаланиш зарурати пайдо бўлади.

Кўпгина муаллифлар таъкидлашича, микропроцессорлардан фойдаланиш бўйича автоматик бошқариш тизимлари, микросхема, алгоритм, дастурларини ишлаб чиқиш интеллектуал мулк ҳисобланганлиги сабабли, илмий-техник адабиётларда бу мавзудаги маълумотларни нашр этиш камдан-кам истисно ҳисобланади. Бундай ҳолат мазкур тадқиқот натижаларини мавжуд ишлар билан таққослаш имкониятини бермайди.

Диссертациянинг «**Микропроцессорли бошқарилувчи АсМ-ТКЎни ишга туширишдаги математик модели**», номли учинчи бобида идеаллашган, деб фараз қилинган АсМ, ТКЎнинг нозизиқли актив қаршилиги эътиборга олган ва микропроцессор ёрдамида ишга тушириш режимини бошқаришнинг математик моделларини ишлаб чиқишга бағишланган.

ИЭСнинг узлуксиз технологик жараёни шароитида катта қувватли юқори кучланишли ускуналарида экспериментал синов ўтказиш юқори сарф-ҳаражатли, машаққатли ва баъзан имконсиз ҳисобланади. Шу сабабли, электр юритма айрим элементларининг АсМ ўткинчи жараёнларига таъсирини аниқлаш, шунингдек микропроцессор бошқарувидан фойдаланиш шартларини аниқлаш бўйича тадқиқотлар ўтказиш учун ТКЎ-АсМ тизимининг математик моделини ишлаб чиқиш, унда ҳисоблаш экспериментларини ўтказиш, сўнгра тадқиқот натижаларини объектининг ТКЎ-АсМга тадбиқ этиш таклиф қилинди.

АсМнинг математик модели учун амалиётда тенгламалар тизимини содалаштириш мақсадида тенглама ва ўзгарувчилар сонини сезиларли даражада камайишига олиб келувчи умумлаштирилган электр машинанин сода моделларидан фойдаланиш қабул қилинган. У ҳолда моделнинг икки фазага статор ва ротор чулғамлари кучланишларининг тенгламалари ортогонал координаталарда қуйидагича ёзилади:

$$\left. \begin{aligned} u_{\alpha s} &= -d\Psi_{\alpha s}^v / dt + i_{\alpha s} r_s \\ u_{\beta s} &= -d\Psi_{\beta s}^v / dt + i_{\beta s} r_s \\ u_{\alpha r} &= -d\Psi_{\alpha r}^v / dt + i_{\alpha r} r_r \\ u_{\beta r} &= -d\Psi_{\beta r}^v / dt + i_{\beta r} r_r \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

ротор ҳаракатининг (электр юритма моментлари мувозанати) тенгламалари

$$d\omega_r / dt = [M_C(t) - M_{\Sigma M}(t) / J], \quad (2)$$

ва электромагнит momenti қўйдаги шаклда бўлади

$$M_{\Sigma M}(t) = pM(t)[i_{\beta s} i_{\alpha r} - i_{\alpha s} i_{\beta r}]. \quad (3)$$

Статор кучланиши юқори гармоник таркибий қисмларининг таъсирини ҳисобга олиш учун кучланиш тенгламалари тизими қўйдаги шаклда бўлади:

$$\left. \begin{aligned} u_{\alpha s}^v &= -d\Psi_{\alpha s}^v / dt + i_{\alpha s}^v r_s \\ u_{\beta s}^v &= -d\Psi_{\beta s}^v / dt + i_{\beta s}^v r_s^v \\ u_{\alpha r}^v &= -d\Psi_{\alpha r}^v / dt + i_{\alpha r}^v r_r^v \\ u_{\beta r}^v &= -d\Psi_{\beta r}^v / dt + i_{\beta r}^v r_r^v \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Унда натижавий электромагнит момент қиймати тоқларнинг ҳар бир гармоник ташкил этувчилари ҳосил қилган моментлар йиғиндиси каби аниқланади

$$\left. \begin{aligned} M_{\Sigma M}^v(t) &= pM(t)[i_{\beta s}^v i_{\alpha r}^v - i_{\alpha s}^v i_{\beta r}^v] \\ M_{\Sigma M}(t) &= \sum M_{\Sigma M}^v(t) \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Юқорида баён қилинган АсМ математик моделини тузишнинг умумий қабул қилинган тартибидан фарқли равишда, ушбу ишда, ишлаб чиқариш механизми қаршилик моментининг оний қийматлари, аввалдан эксперимент орқали олинган вентилятор тавсифи  $M_C(\omega)$  ёрдамида олинди.  $M_C(\omega)$  қаршилик моментининг экспериментал равишда ўлчанган қийматларининг сон қийматлари жадваллар ёки графиклар шаклида математик моделга киритилиши мумкин. Энг қулай  $M_C(\omega)$  нинг аналитик тақдимоти қўйдаги соддалаштирилган функция шаклида бўлади

$$M_C(\omega) = M_0 + (M_{CN} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_N} \right)^q, \quad (6)$$

бунда -  $M_C(\omega)$  ротор тезлиги  $\omega$  бўлгандаги қаршилик momenti;  $M_0$ - механизмнинг юксиз ишлаш momenti;  $M_{CN}$  - айланиш тезлиги номинал  $\omega_N$  бўлгандаги қаршиликнинг номинал momenti;  $q$ - статик механик тавсифининг турини аниқлайдиган кўрсаткич (мазкур ишлаб чиқариш механизми учун экспериментал тарзда аниқланди  $q=1,65$ ).

Тиристорлар очилиш хусусиятларини шу таъриқа ўрганиш, тиристорлар гуруҳларидан иборат ТКЎнинг математик моделини яратиш имконини берди.

Келтирилган тавсифлар асосида қуйидаги хулосага келиш мумкин. Тиристорларнинг ишлаши ток шакли ва катталиги  $i_{AK}$ , тиристорнинг анод-катод чиқишидаги кучланиши  $u_{AK}$ , бошқариш токи  $i_y$  ва вақт онига  $t$ , шунингдек, тиристор ички ҳолатига боғлиқ  $S$  бўлган актив қаршилиги бўлган ночизикли тенгламалар билан тавсифланган экан:

$$R_{AK} = f[U_{AK}(t), i_{AK}(t), i_y(t), t, S] \quad (7)$$

Бошқарув токи бир онда нолга ёки тўғрилаш токига тенг  $I_{yc}$  бўлиши мумкин бўлган дискрет ўзгарувчи миқдордир:

$$R_{AK} = \begin{cases} R_{a-f} = R_{\text{енуш}}, & \text{агар } i_{AK} \leq 0 \text{ ёки } U_{AK} < 0, \\ R_{a-b} = R_{\text{енуш}}, & \text{агар } U_{AK} \geq 0 \text{ ва } S = 0, \\ R_{d-e} = R_{\text{очиш}}, & \text{агар } U_{AK} \geq 0 \text{ ва } S = 1, \end{cases} \quad (8)$$

бунда  $i_{AK}$  - тиристордаги ток,  $u_{AK}$  - тиристор анод-катод чиқишидаги кучланиши;  $I_{уд}$  - тиристорни очик ҳолатини ушлаб туриш токи;  $I_{вкл}$  - очилиш ҳолатига ўтиш токи;  $R_{закр}$  - тиристорнинг берк ҳолатидаги қаршилиги;  $R_{откр}$  - тиристорнинг очик ҳолатидаги қаршилиги;  $S$  - тиристорнинг ички ҳолати (0 - очик, 1 - ёпиқ) ва у қуйидагича ифодаланиши мумкин:

$$S_K = \begin{cases} 0, & \text{агар } U_k < 0 \text{ ёки } i_{AK} < I_{к.зар} \text{ бўлса} \\ 1, & \text{агар } U_{AK} \geq 0 \text{ ёки } i_{AK} = I_{к.зар} \text{ бўлса} \\ S_K \text{ колган барча холатларда} \end{cases} \quad (9)$$

$K$  кетма-кет уланган тиристорларнинг  $k$ -тиристори учун тенгламаларни қуйидагича ёзиш мумкин

$$S_K = \begin{cases} 0, & \text{агар } U_k < 0 \text{ ёки } i_{AK} < I_{к.зар} \text{ бўлса} \\ 1, & \text{агар } U_{AK} \geq 0 \text{ ёки } i_{AK} = I_{к.зар} \text{ бўлса} \\ S_K \text{ колган барча холатларда} \end{cases} \quad (10)$$

ва  $N$  параллел уланган тиристорларнинг  $N$ -тиристори учун тенгламаларни қуйидагича ёзиш мумкин

$$R_N = \begin{cases} R_{a-f} = R_{\text{енуш}}, & \text{агар } i_N \leq 0 \text{ ёки } U_N < 0, \\ R_{a-b} = R_{\text{енуш}}, & \text{агар } U_N \geq 0 \text{ ва } S_N = 0, \\ R_{d-e} = R_{\text{очиш}}, & \text{агар } U_N \geq 0 \text{ ва } i_N > I_{к.зар} \text{ } S_N = 1, \end{cases} \quad (11)$$

ТКЎнинг кетма-кет уланган  $K$  сонли тиристорлар гуруҳи учун ночизикли актив қаршилиқлар ва ҳолатларининг тенгламалари қуйидагича

$$R_K = R_1' + R_2' + \dots + R_K' = \sum_{k=1}^K R_K' , S' = S' k , \quad (12)$$

ва параллел уланган  $N$  тиристорлар ночизикли актив қаршиликлар ва ҳолатларининг тенгламалари қуйидагича ёзилади.

$$R_N = 1 / \left[ (1 / R_1) + (1 / R_2) + \dots + (1 / R_n) \right] = 1 / \sum_{n=1}^N 1 / R_n' , S = S_n . \quad (13)$$

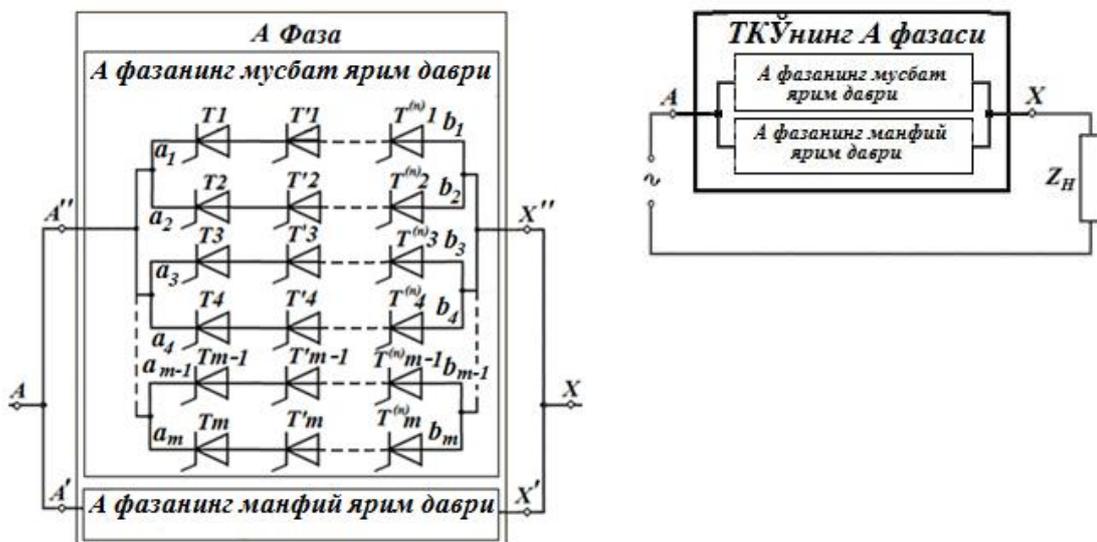
А фаза кучланиши мусбат (индекси +) ва манфий (индекси -) ярим даврлари учун ТГнинг математик моделлари актив қаршиликлари учун қуйидаги ночизикли тенглама ёрдамида ёзилади:

$$R_{A.TPH(+)} = 1 / \sum_{n=1}^N 1 / \sum_{k=1}^K R_k' , R_{A.TPH(-)} = 1 / \sum_{n=1}^N 1 / \sum_{k=1}^K R_k' . \quad (14)$$

Унда ТКЎ А фазасидаги тиристорлар гуруҳининг математик модели (3-расм) ҳар бири кетма-кет уланган  $K$  тиристорлардан иборат карама-қарши-параллел уланган шаҳобчалардан тузилган ва уларнинг ҳар бири  $N$  параллел уланган гуруҳларидан иборат бўлган тиристорлар гуруҳидан ташкил топган ТКЎнинг қуйидаги ночизикли актив қаршиликлар ночизикли тенгламаси каби ёзилади:

$$R_{A.TPH(+)} \begin{cases} R_{A.TPH(+)} , a\zeta ap(0 + 2\pi) \leq t \leq (180 + 2\pi) \\ R_{A.TPH(-)} , a\zeta ap(180 + 2\pi) \leq t \leq (360 + 2\pi) \end{cases} . \quad (15)$$

ТКЎ нинг А фазаси учун ёзилган тенгламалар тизими қолган икки фаза учун амал қилади, бунда тенгламалар ТКЎ тиристорларининг ихтиёрий параметрлари учун ёзилган (3-расм). Маълумки, ТКЎ ёрдамида  $\theta$  бурчакни бошқариб ишга тушириш усули на фақат АсМни ишга тушириш токини камайтириш имконини бермади, балки электромагнит айлантириш моментини ҳам камайтиради ва, демак ишга тушириш вақт давомийлиги ортади.



### 3-расм. ТПН А фазасининг тиристор гурухлари

### 4-расм. ТКЎ-АсМ имитация моделининг схемаси

Ушбу ҳолатда, АсМ статор чўлғамининг кучланиш функция  $u(t)$  си шакли носинусоидал бўлади. Токнинг юқори гармоник ташкил этувчилари пайдо бўлади, уларнинг ҳар бири айлантурувчи ва тормозловчи электромагнит моментарни ҳосил қиладилар. Шундай қилиб, АсМ киришидаги ўртача кучланишнинг равон ўсишига қарамай, ротор тезлиги пулсацияланувчи бўлади ва унинг миқдори синхрон тезликнинг яримига яқинлашганда, роторнинг тормозланиш жараёни кузатилади.

Микропроцессорли бошқариш тизими тиристорни бошқариш импульсларининг керакли шаклини шакллантириш билан бир қаторда, ротор тезлиги ва статор токидаги тесқари боғланиш ёрдамида АсМ ўртача кучланишининг ўзгариши тезлигини ҳам бошқаради ва шу билан, электр юритмани ишга туширишда роторни тормозланиш режимдан бартараф этади.

Диссертациянинг «ТКЎ-АсМни ишга тушириш ўткинчи жараёнларини микропроцессорли бошқаришнинг экспериментал тадқиқоти» деб номланган тўртинчи бобда объект ва унинг моделлари экспериментал тадқиқоти натижалари келтирилган. Юқорида таъкидланганидек, ИЭСнинг узлуксиз технологик жараёнида катта қувватли жиҳозларда экспериментал тадқиқотлар олиб бориш имконияти мавжуд эмас.

Шу сабабли эксперимент тадқиқотлари технологик жараённи тўхтатмасдан амалга оширилди. Бунда тажриба тадқиқот ишлари айрим босқичларга ажратилди:

а) ишлаб чиқилган ТКЎ-АсМ математик модели (ММ)да ҳисоблаш экспериментлари ўтказиш;

б) ТКЎ-АсМ нинг имитацион моделини ишлаб чиқиш ва ушбу моделда экспериментал тадқиқотлар ўтказиш;

в) ТКЎ-АсМ физик модели - лаборатория ускунасида экспериментал тадқиқотлар ўтказиш ва тадқиқот натижаларини таққослаш.

Катта қувватли электр юритма айрим элементларининг АсМни ишга тушириш ўткинчи жараёни сифатига таъсирини ММда ҳисоблаш эксперименти ёрдамида бажаришга қаратилган биринчи босқичда, ТКЎ-АсМ тизимининг ММ нозизиқли дифференциал тенгламаларини ҳисоблаш алгоритми ва С++ тилида ечиш дастури тузилди.

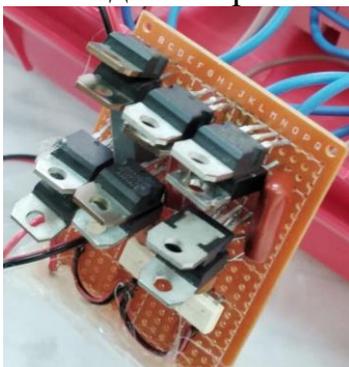
Экспериментал тадқиқотларнинг иккинчи босқичида - диссертациянинг иккинчи боби хулоса ва таклифларидан олинган тавсияларни текширишда ТКЎ имитация модели (ТКЎИМ)нинг кучли схемаси йиғилди. Схемада ТКЎнинг бир фазасидаги (масалан, А фаза) бир тиристор, ҳар бири бир-бирига параллел бўлган (3-расм), улар эса кетма-кет уланган  $(a_1-b_1)$ ,  $(a_2-b_2)$ , ...,  $(a_m-b_m)$  тиристорлар гуруҳидан иборат занжир билан алмаштирилди ва «Мусбат ярим давр» деб аталди. Фаза Адаги қарама-қарши параллел уланган яна бир базавий тиристор айнан шундай уланишли ТГ схемаси билан алмаштирилди ва «Манфий ярим давр» деб номланди.

Учинчи босқични бажариш - ММда ҳисоблаш эксперименти натижаларининг мос эканлигини текшириш учун унинг физик модели ишлаб чиқилди, ТКЎ-АсМ тажриба ускунаси ва улар бўйича экспериментал тадқиқотлар ўтказилди. ТКЎ-АсМнинг физик модели қўйидагилардан:

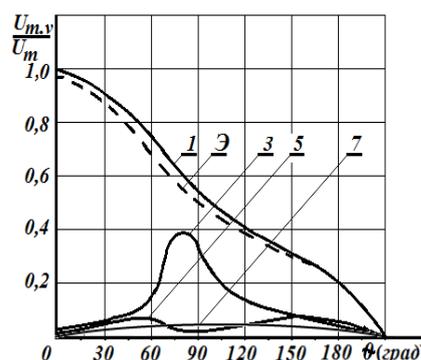
а) ТКЎ, олтига тиристорлар гуруҳидан ташкил топган, ҳар бир фазада жуфт қарама-қарши-параллел уланган тиристорлар гуруҳидан, уларнинг ҳар бири кетма-кет уланган учта тиристор билан иккита параллел уланган кичик гуруҳларни бирлаштиради, тиристорларнинг тури КУ201 (5-расм.);

б) АИР63В4 турдаги, қуввати 0,37кВт, кучланиши 380/220В ва айланиш тезлиги  $n_1=1500$  айл/мин бўлган АсМ;

в) роторнинг айланиш тезлиги ва статор токи бўйича тескари боғланишдан иборат.



**5-расм. Физик моделнинг тиристорли гуруҳлари платаси**



**6-расм. Кучланиш гармоникаларининг  $\theta$ га боғлиқлиги**

Ҳисоблаш эксперименти ёрдамида қўйидаги масалалар ҳал қилинди:

- тиристорлар очилиш бурчагини вариациялаш натижасида статор чулғами кириш кучланиши шакли ўзгаришида унинг юқори гармоник ташкил этувчилари АсМ ишга тушириш тавсифига ва ўткинчи жараён кечишига таъсири аниқлаш;

- АсМни ишга тушириш учун қулай шарт-шароитлар ва талабларни шакллантириш ва АсМ тезланишининг таъсирини аниқлаш ҳамда статор токининг чегаравий қийматларини турли даражада сақлаш.

Кучланиш носинусоидал эгри чизиқларининг осциллограммаси гармоник қаторларга ёйиб, гармоник ташкил этувчилар, уларнинг амплитуда қийматлари аниқланди ва ҳар бир гармоника амплитудаси  $U_{m,v}$  нинг тиристор очилиш бурчагига  $\theta$  боғлиқлик графиги қурилди (6-расм).

Гармоник ташкил этувчиларни  $U_{m,v}=f(\theta)$  таққослаш шуни кўрсатдики, кучланишнинг асосий гармоника амплитудаси тиристор очилиш бурчаги  $\theta = 180^\circ$  дан  $0$  (тиристор тўлиқ очилиши)гача камайишида у ўзининг минимал қийматидан максимал  $95 \div 98\%$  - ДавСТ кучланиш сифатига жоиз бўлган қийматигача ўзгаради.

Учинчи гармоник ташкил этувчи тиристор очилиш бурчаги  $\theta$  нинг камайишида аввал ортади ва  $\pi/2$ да максимал қиймати  $(35-37\%)U_{m,1}$  га эришиб, сўнгра камаяди. Бешинчи гармоник ташкил этувчиси ўзгариши ҳам

шундай бўлади, фақат бунда иккита экстремум бўлиб,  $8\div 10\%$  ини ташкил этади.

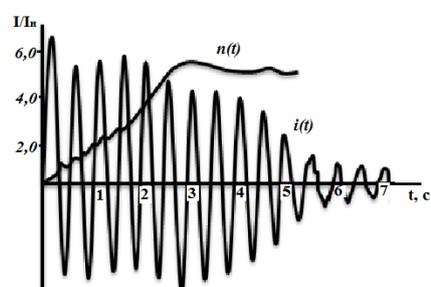
Математик моделда ўтказилган ҳисоблаш эксперименти шуни кўрсатдики, АСМни ишга тушириш жараёнида тиристорнинг очилиш бурчаги  $\theta$  ва кучланиш  $U$ нинг босқичма-босқич ўзгаришида, баъзи гармоник ташкил этувчилар амплитудалари ортадиган диапазон  $60^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$  да (6-расм), роторнинг тезланиши секинлашади, ротор тормозланади ва тўхтаб қолади. Микропроцессорга қўйиладиган талаб - тезликнинг шу диапазонда бурчак  $\theta$  ни кескин ошириб, кучланишнинг ўртача қийматини бошқариб, тезликнинг равон ортишини ТКЎ ёрдамида таъминлашдир.

Бундан ташқари микропроцессор, юқорида тавсия этилган ва ҳисоблаш тажрибаларини ўтказишда тасдиқланган ТГни бошқариш сигналининг керакли шаклда бўлишини таъминлаши зарур. Қуйида АД-5000 турдаги АСМни бевосита ишга туширишнинг ММда бажарилган ҳисоблаш эксперименти (7,а-расм) ва ишлаб чиқилган микропроцессорли бошқарилувчи ТКЎдаги (7,б-расм) статор токи ва ротор айланиш тезлигининг вақтга боғлиқлик динамик тавсифлари келтирилган.

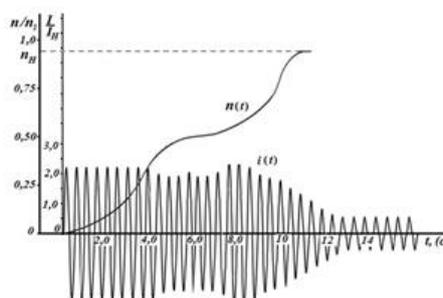
ТКЎ-АСМ тизимининг имитацион моделида ТГли ТКЎ хар хил қувват коэффиценти  $\cos\varphi$  бўлгандаги ишлашининг экспериментал тадқиқотлари ўтказилди. Тадқиқотлар натижасида  $\cos\varphi$  ортиши билан ва у бирга яқин бўлганда тиристорлар очилиши учун зарур бўлган вақт оралиғининг камайиши ҳисобига параллел уланган тиристорлар коммутациясининг бузилиш эҳтимоли ортиши ҳақидаги назарий хулосалар тўғри эканлиги аниқланди.

Актив-индуктив характердаги юкланишда қувват коэффиценти 0,8дан камайишида тиристор токининг «ўсиш» вақт оралиғи ортиши (бу вақт оралиғида барча параллел уланган тиристорлар очик ғолатга ўтишга улгуради) ҳисобига ТГ коммутацияси бузилишининг эҳтимоли кескин камаяди.

Ток ва кучланишлар  $\cos\varphi=1,0$  ва 0,6 (расм.8) бўлгандаги осциллограммалари юқоридагиларни тасдиқлайди.

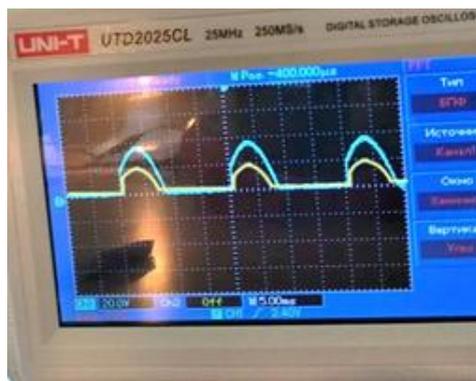


а)

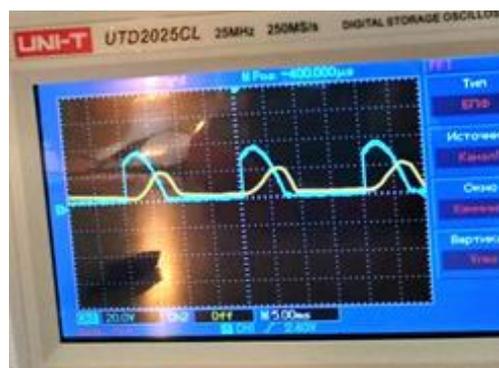


б)

**7-расм. Ҳисоблаш ва экспериментал тадқиқотлар натижалари**



а)



б)

8

-

Шундай қилиб, ГТ ишончли ишлашининг яна бир шarti ТКЎнинг  $\cos\phi$  қийматини бирга яқин келтирмаслик экан. Шу сабабли, агар ТКЎ-АсМ тизимида реактив қувватни компенсацияловчи конденсаторли компенсатор мавжуд бўлса, улар фақат тармоқ билан ТКЎ кириш ўртасида уланиши шарт.

Ушбу илмий ишни жорий этилиши электр моторларни тўлиқ қайта созлаш учун сарфланадиган умумий ҳаражатни камайтиришга олиб келади:

-қуввати 5000 кВт бўлган АсМни таъмирлашсиз хизмат муддатини ошиши эвазига (битта 5000 кВт бўлган электр моторини таъмирлаш учун 95 млн сўм сарф-ҳаражат кетади)  $A_1=95 \times 2 - 95 = 95$  млн. сўм тежалди.

-қуввати 630 кВт бўлган АсМни таъмирлашсиз хизмат муддатини ошиши эвазига  $A_2=22 \times 3 - 22 = 44$  млн. сўм тежалди.

Иссиқлик электр станциясининг хусусий эҳтиёж агрегатлари асинхрон юритмаларини таъмирлашсиз хизмат муддатини оширилиши эвазига тежалган умумий иқтисодий самара қуйидагича ҳисобланади

$$A_{yM} = A_1 + A_2 = 95 + 44 = 139 \text{ млн. сўм.}$$

Микропроцессорли қурилмани таркибий қисмини йиғишда ишлатиладиган, сотиб олинган маҳсулотлар қиймати: Ноутбук Dell Inspiron 15-3552/Intel туридаги микропроцессор қурилмасининг нархи 2 813 млн.сўм.; кучланиши 2,8 кВ и токи 0,8 кА ТБ453-800 туридаги тиристорлар барчаси учун жами  $36 \times 390 000 = 14$  млн.сўм.

Микропроцессорли ТКЎ-АсМ қурилмаси учун умумий ҳаражат  $C_{yзгар} = 2,813 + 14 = 16,813$  сўмни ташкил этади. ТКЎ қурилмаси учун талаб этиладиган сўров коэффициент  $\lambda = 1,2$  деб қабул қилинади.

Микропроцессорли ТКЎ-АсМ қўллашда ҳаражатларни қоплаш муддати қуйидагича.

$$T_{\text{қоп.муддат}} = \frac{C_{yзгар}}{\lambda \cdot A_{yM}} = \frac{16,813}{1,2 \cdot 139} = 0,1 \text{ йил} = 1,2 \text{ ой}$$

Бу ерда  $T_{\text{қоп.муддат}}$ -барча кетган сарф ҳаражатларни қоплаш муддати.

## ХУЛОСА

**«Иссиқлик электр станциясининг хусусий эҳтиёж агрегатларини асинхрон юритмасини ишга туширилишини микропроцессор ёрдамида бошқариш»** мавзисидаги техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертация бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижалари асосида қўйидаги хулосалар тадим этилган:

1. Ўзбекистон Республикаси ИЭС хусусий эҳтиёж агрегатларининг юқори кучланишли катта қувватли асинхрон моторларнинг ишга туширилиши таҳлил қилинган. Натижада «Навоий ИЭС» АЖ хусусий эҳтиёж агрегатларининг юқори кучланишли катта қувватли асинхрон моторларнинг ишга туширилиши тўғридан-тўғри усул билан амалга оширилиши ва бу усулнинг камчиликлари изоҳлаб берилган.

2. Тиристор кучланиш ўзгартиркич таркибидаги тиристорлар гуруҳи коммутациясининг бузилишсиз ишлаш шартлари ишлаб чиқилди. Натижада биргаликда очилишини, тиристорларни бошқариш импульслари давомийлиги хар бир алоҳида тиристорнинг ёқилиш давоилигидан кам бўлмаслиги таъминланган.

3. Уланишлар комбинацияси билан тузилган тиристорлар гуруҳидан иборат бўлган тиристор кучланиш ўзгартиркич ёрдамида катта қувватли юқори кучланишли қисқа туташган роторли асинхрон моторни микропроцессорли бошқариш усули таклиф этилган. Натижада катта қувватли юқори кучланишли асинхрон моторларни раван ишга тушириш имконини беради.

4. «Тиристор кучланиш ўзгартиркич –асинхрон мотор» тизимини ишга туширишда микропроцессорли бошқариш ўткинчи жараёнининг аниқлаштирилган математик модел, имитация модели ва тиристорларни бир вақтда очилишини таъминловчи дастур яратилди. Натижада ишлаб чиқилган математик модел, дастур ва имитацион моделлар ёрдамида турли хил синов ва ҳисоблаш ишлари олиб борилиб, нисбатан мақбул вариант танлаб олинган.

5. Тадқиқот ишлари назарий хулосалари шуни тасдиқлайдики микропроцессорли бошқарилувчи «Тиристор кучланиш ўзгартиркич – асинхрон мотор» тизимини яратиш учун параллел ва кетма-кет уланган тиристорлар гуруҳидан фойдаланиш афзаллиги исботланди. Натижада катта қувватли асинхрон моторларни микропроцессорли «Тиристор кучланиш ўзгартиркич –асинхрон мотор» тизим ёрдамида ишга туширишда ишга тушириш токи 2,5 мартага камайиши ва таъмирлашсиз хизмат муддати эса 6÷7 ойдан 25 ойгача узайиши имконини берган.

6. Ушбу диссертация доирасида олиб борилган илмий тадқиқот ишларининг натижалари «Навоий ИЭС» АЖда жорий этилган. Натижада катта қувват ва юқори кучланишли асинхрон моторларни «Тиристор кучланиш ўзгартиркич –асинхрон мотор» тизимида ишга туширишда таъмирлашсиз хизмат муддати ошириш эвазига бир йилдга 139 млн. сўм иқтисодий самарадорликка эришилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК DSc.03/10.12.2019.Т.03.03 ПРИ  
ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**ХАМЗАЕВ АКБАР АБДАЛИМОВИЧ**

**УПРАВЛЕНИЕ ПУСКОМ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
АГРЕГАТОВ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЭС С ПОМОЩЬЮ  
МИКРОПРОЦЕССОРА**

**05.05.02 – Электротехника. Электроэнергетические станции системы.  
Электротехнические комплексы и установки.**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)  
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

**ТАШКЕНТ-2021**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за В2020.4.PhD/Г767.

Докторская диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете им. Ислама Каримова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.tdtu.uz) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net.uz).

Научный руководитель:

**Алимходжаев Камалиддин Тиллаходжаевич**

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

**Камалов Толяган Сиражиддинович,**

доктор технических наук, профессор

**Арипов Назиржон Мукарамович**

доктор технических наук, профессор

Ведущая организация:

**Бухарский инженерно-технологический институт**

Защита диссертации состоится «10» июня 2021 г. в 11 часов на заседании Научного совета DSc 03/10.12.2019.Т.03.03 при Ташкентском государственном техническом университете/ (Адрес: 100095, г Ташкент, ул. Университетская, 2. тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu\_info@tdtu.uz.)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (регистрационный номер - 212). (Адрес: 100095, Ташкент, ул. Университетская, 2. тел.: (99871) 246-03-41.)

Автореферат диссертации разослан «26» июня 2021 года.  
(протокол рассылки № «4» от «25» июня 2021 г.)



**К.Р. Аллаев**  
председатель научного совета  
по присуждению ученой степени,  
д.т.н., профессор, академик

**О.Х. Ишназаров**  
ученый секретарь научного совета  
по присуждению ученой степени,  
д.т.н., профессор.

**Т.Ш. Гойилов**  
председатель научного семинара  
при научном совете по  
присуждению учёной степени,  
д.т.н., профессор.

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация к диссертации доктора философии (PhD))**

### **Актуальность и востребованность темы диссертации.**

В мировой практике особое значение придается плавному пуску асинхронных двигателей высоковольтные и большой мощности на тепловых электростанциях, а также выявлению методов и технических решений снижения потерь энергии в них. В настоящее время в развитых странах «...существуют различные подходы к технологическим машинам в различных отраслях производства, повышению энерго-и ресурсоэффективности, снижению энерго и ресурсоемкости, внедрению широкого применения энерго-и ресурсосберегающих технологий в производство»<sup>1</sup>. В связи с этим особое внимание уделяется экономии энергии и ресурсов, а также их эффективному использованию, бесперебойной работе высоковольтных асинхронных двигателей большой мощности, как в существующих, так и на существующих и в новых электростанциях.

Одним из важных направлений развития эффективной выработки электроэнергии тепловыми электростанциями в мире является удовлетворение специфических потребностей предприятия в уделении особого внимания плавному пуску мощных и высоковольтных асинхронных электроприводов агрегатов собственных нужд тепловых электрических станциях, сокращению пусков. токи, увеличивают срок службы без ремонта электродвигателей, проводятся научные исследования. Исследования в этой области, в том числе снижение пускового тока при микропроцессорном управлении мощными высоковольтными асинхронными двигателями частных энергоблоков электростанций, увеличение срока службы без ремонта являются приоритетными. При этом одной из актуальных задач является выявление дополнительных возможностей энергосбережения на основе комплексного анализа потребления электроэнергии на тепловых электростанциях.

В Республике проводятся исследования и меры по разработке методов снижения потребления электроэнергии и других ресурсов, а также внедрению ресурсосберегающих устройств и технологий на производственных предприятиях, которые являются одним из важнейших секторов экономики. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы определены задачи, в том числе «...снижение энергоемкости и ресурсоемкости экономики, внедрение энергосберегающих технологий в производство, использование возобновляемых источников энергии. ...»<sup>2</sup>. Реализация данных задач, в том числе разработка методов эффективного использования электрооборудования собственных нужд тепловых электрических станций, разработка энерго- и ресурсосберегающих технологий для пуска в ход асинхронных электроприводов больших мощностей с вентилятором

---

<sup>1</sup> <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207218808945305?journalCode=tetn20>

<sup>2</sup> Указ Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года № ПФ-4947 «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

всасывающий, а также энерго- и ресурсосбережение при использовании электрооборудования собственных нужд ТЭС являются одними из наиболее важных вопросов.

Данная диссертация направлена на реализацию целей и задач, поставленных указом, постановлением и иными поручениями Президента. А также при выполнении задач, изложенных в других нормативных документах, связанных с этой деятельностью, данная диссертационная работа частично служит в Указе Президента Республики Узбекистан № ПП-4947 от 7 февраля 2017 года, Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-3238 от 23 августа 2017 года «О мерах по дальнейшему внедрению современных энергоэффективных и энергосберегающих технологий», № ПП-3379 от 8 ноября 2017 года «О мерах по обеспечению рационального использования энергоресурсов» и от 22.08.2019г. № ПП-4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективной отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной области.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики: II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

**Степень изученности проблемы.** В ведущих научных центрах и высших учебных заведениях мира, в том числе: Technische Universität Dresden, RWTH Aachen University, (Германия), Cambridge University (Великобритания) в Российской Федерации – Национальным исследовательским университетом, Санкт-Петербургский политехнический университет (Россия), Белорусский государственный технологический университет, Киевский политехнический институт (Украина), в Ташкентском государственном техническом университете; в ООО «Научно-технический центр» АО «Узбекэнерго» (Узбекистан) ведутся широкомасштабные научно-исследовательские работы.

Изучению свойств пусковых режимов АД посвятили свои работы целый ряд ученых, в частности, Костенко М.П., Копылов И.П., Токарев Б.Ф., Соколов М.М., Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хамудханов М.З. и другие. Свой существенный вклад в создание и усовершенствование асинхронных электроприводов с тиристорным регулятором напряжения внесли многие ученые: Браславский И.Я., Нестеров К.Е., Зюзев А.М., Андрющенко О.А., Бойко А.А., Островлянчик Ю.В., Сарваров А.С., Петрушин В.С., Глазырин А.С., Cadirci M. Ermis M. Rahman (Турция), Saqib M.A. (Пакистан), Коваль А.С., Скарыно Б.Б.

В Республике научные исследования по созданию системы «тиристорный преобразователь напряжения-асинхронный двигатель» Алимходжаев К.Т., Базарав Н.Х., Каримов Х.Г., Камалов Т.С., Хашимов А.А., Алимходжаев К.Т., Арипов Н.М., Ишназаров О.Х., Тоиров О.З. и др. которыми достигнуты многие положительные результаты.

Несмотря на значительные успехи, технические возможности применяемых в то время инструментов и элементов систем управления были ограничены. В данной диссертации разработана схема тиристорного преобразователя напряжения для режима работы асинхронных двигателей большой мощности с помощью микропроцессорного управления, а также предложена плавный пуск агрегатов и ее решения.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в рамках проектов, включенных в план научно-исследовательских работ Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова в рамках проектов № ОТ-ЁАХ-0301 «Ёш олимлар академик харакатчанлиги» на тему «Исследование современных методов управления асинхронными электроприводами» (2017).

**Целью диссертационной работы** является усовершенствование систем «Тиристорный преобразователь напряжения - асинхронный двигатель» на основе асинхронного электропривода агрегатов собственных нужд с помощью микропроцессорного управления.

**Задачи исследований:**

анализ существующих способов пуска и особенностей плавного пуска мощных высоковольтных асинхронных двигателей;

разработка схемы тиристорного преобразователя напряжения для пускового режима высоковольтного асинхронного двигателя большой мощности с применением микропроцессорного управления;

разработка математической модели асинхронного двигателя на основе тиристорного преобразователя напряжения в режиме плавного пуска и составить алгоритм ее решения;

разработка алгоритм расчета нелинейных гармоник амплитуды.

**Объектом исследования** являются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и тиристорный преобразователь напряжения для агрегатов собственных тепловых электростанций.

**Предметом исследования** являются математические модели асинхронных электроприводов с тиристорным преобразователем напряжения и микропроцессорным управлением для электроприводов агрегатов собственных нужд тепловых электростанции.

**Методы исследования.** В процессе исследования использовались методы теорий электрических машин, электрических приводов, линейных электрических цепей, полупроводниковой техники, математического анализа, математического и физического моделирования.

**Научная новизна диссертационного исследования** заключается:

усовершенствован способ пуска на основе микропроцессорного управления импульсами группы параллельно-последовательно соединенных тиристоров в системе тиристорного преобразователя напряжения;

разработана математическая модель тиристорного преобразователя напряжения на основе нелинейных активных сопротивлений;

усовершенствован способ пуска высоковольтного асинхронного двигателя большой мощности на основе тиристорного преобразователя напряжения с микропроцессорным управлением;

разработана схема плавного пуска высоковольтного асинхронного двигателя на основе компенсации изменения нагрузки.

**Практические результаты исследования** заключаются:

разработан энергосберегающий режим работы системы «тиристорный преобразователь напряжения-асинхронный двигатель-насосная устройства»;

разработана математическая модель системы «тиристорный преобразователь напряжения-асинхронный двигатель» с микропроцессорным управлением;

разработана имитационная модель системы «тиристорный преобразователь напряжения-асинхронный двигатель»;

проведены экспериментальные исследования разработанной системы «тиристорного преобразователя напряжения-асинхронный двигатель» с применением микропроцессорного управления в лабораторных установках.

**Достоверность результатов исследований.** Достоверность научных результатов обоснована сравнительным анализом математической модели, теоретических и экспериментальных данных, подтвержденных аналитическими выражениями, а также предложениями о внедрении метода пуска в ход асинхронного двигателя в производство.

**Научная и практическая значимость результатов исследований.**

Научная значимость исследования обосновывается совершенствованием метода плавного пуска на основе микропроцессорного управления и тиристорного преобразователя напряжения мощных и высоковольтных асинхронных двигателей агрегатов собственных нужд тепловых электростанций, разработка алгоритма расчета математической модели пуска с использованием микропроцессорного устройства.

Практическая значимость результатов исследования обосновывается разработкой способа плавного пуска высоковольтного асинхронного двигателя большой мощности с использованием тиристорного преобразователя напряжения, состоящего из последовательно и параллельно соединенных тиристорных групп, что позволяет повысить напряжение и мощность тиристорного преобразователя напряжения, а также его микропроцессорного управления.

**Внедрение результатов исследования.** На основе полученных научных результатов по применению системы «тиристорный преобразователь напряжения-асинхронный двигатель» для пуска высоковольтных асинхронных двигателей большой мощности, а также по анализу информации о возможностях их управления с помощью микропроцессора:

микропроцессорное управление на базе высоковольтных мощных асинхронных двигателей системы «тиристорного преобразователя напряжения -асинхронный двигатель» внедрено при плавном пуске асинхронного двигателя мощностью 5000 кВт с питающей насосной мощностью котла АО «Навоийская ТЭС». В результате были снижены пусковой ток и момент инерции, а срок службы этих электродвигателей без ремонта увеличен с 6÷7 месяцев до 25 месяцев (справки Министерства энергетики № 04-13-3946 от 28 июля 2020 года и АО «Навоийская тепловая электростанция" № 13/143 от 23 января 2020 года);

микропроцессорное управление на базе высоковольтных мощных асинхронных двигателей системы «тиристорного преобразователя напряжения - асинхронный двигатель» было внедрено при плавном пуске асинхронного двигателя всасывающего вентилятора мощностью 630 кВт, применяемого в системе обогрева котла АО «Навоийская ТЭС». В результате был оптимизирован режим работы, что позволило увеличить срок службы электродвигателей и пусковых устройств (справки Министерства энергетики № 04-13-3946 от 28 июля 2020 года и АО «Навоийская тепловая электростанция" № 13/143 от 23 января 2020 года);

ожидаемая рентабельность ТПН-АД - 139 млн. сумов за счет улучшенного пускового режима асинхронных двигателей и снижения затрат на ремонт при микропроцессорном управлении на базе мощного высоковольтного асинхронного электропривода (справки Министерства энергетики № 04-13-3946 от 28 июля 2020 года и АО «Навоийская тепловая электростанция" № 13/143 от 23 января 2020 года).

**Апробация работы.** Результаты данного исследования были обсуждены на 2 международных и 1 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикации результатов.** По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, из них 8 научных статей, в том числе 5 в республиканских журналах и 3 в зарубежных журналах, рекомендованных ВАК Республики Узбекистан о публикациях основных научных результатов (PhD) диссертаций, получено 2 свидетельства на программный продукт для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Структура диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, приложений. Объем диссертации составляет 122 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность и востребованность выполненных работ, показаны цели и задачи исследования, характеризуются объект и предмет, приведено соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, излагаются научная новизна и практические результаты исследования, раскрываются научная и практическая значимость полученных результатов, даны сведения о

внедрении в практику результатов исследований, по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Современное состояние проблемы пуска высоковольтных асинхронных двигателей большой мощности на тепловых электростанциях»** представлен анализ существующих способов пуска и особенности плавного пуска высоковольтных АД большой мощности. В общем случае, для улучшения пусковых режимов электроприводов можно было использовать устройства с плавным управлением частоты вращения, построенные по системам тиристорный преобразователь - двигатель постоянного тока (ТП-Д), преобразователь частоты с непосредственной связью - асинхронный двигатель (НПЧ-АД) /или/ и преобразователь частоты со звеном постоянного тока - асинхронный двигатель (ПЧ-АД). Электропривод по системе ТП-Д не получил широкого применения из-за тяжелых климатических условий эксплуатации, а также повышенных требований к обслуживанию.

Однако пуск высоковольтных АД больших мощностей прямым включением в сеть имеет серьезные проблемы, т.к. такой режим АД сопровождается броском пускового тока, в 5-8 раз больше номинального.

Анализ результатов исследований пусковых режимов высоковольтных АД больших мощностей, используемых в различных установках показали, что они имеют ряд существенных недостатков и требуют дальнейшего совершенствования.

Во второй главе диссертации **«Решение проблем плавного пуска в ход высоковольтных АД большой мощности с микропроцессорным управлением»** - рассмотрены пути решения этих вопросов путем введения последовательно-параллельно включенных тиристорных групп (ТГ) взамен каждого тиристора в ТПН. Надежная работа таких ТПН, обеспечивается при одновременном отпирании всех тиристоров ТГ.

В данной главе проводятся исследования динамических процессов отпирания тиристоров, определяются требования к управляющему сигналу тиристоров и степень влияния параметров АД на динамический процесс коммутации тиристоров, а также приводятся обоснования необходимости применения микропроцессорного управления.

Технологический разброс вольтамперных характеристик таких вентилях при их изготовлении, затрудняют работу группы последовательно и /или/ параллельно соединенных тиристоров. При этом отдельные параллельно и последовательно соединенные тиристоры перегружаются, соответственно, по току и напряжению. Такое явление приводит к преждевременному выходу из строя вентилях. Для устранения этих неполадок, в диссертационной работе проводился критический анализ работы параллельно и последовательно соединенных тиристоров в динамических режимах их включения, с учетом динамических режимов пуска в ход АД с точки зрения их использования для системы ТПН-АД.

Для обеспечения равномерности распределения прямого тока тиристоров в статическом и динамическом режимах можно использовать два метода: подбор тиристоров одного типа с одинаковыми характеристиками; принудительное деление тока с помощью дополнительных электротехнических устройств. Первый метод подробно исследован в технической литературе. Поэтому, рассмотрим второй метод более подробно.

Если значения обратных токов и токов утечки, значения прямого напряжения в проводящем состоянии, емкостей  $p-n$ -переходов, времени задержки включения и времени выключения отдельных приборов являются разбросанными, условие эффективности - одновременного отпирания тиристоров в ТГ не будет выполнено.

Если в цепи единственный тиристор, то после подачи импульса управления и его отпирания, ток управления  $I_y$  (рис.1, а) больше не влияет на его работу, поэтому для управления одиночным тиристором на практике применяются импульсы небольшой длительности ( $t_{u. ynp.} = 1 \div 3$  мкс).

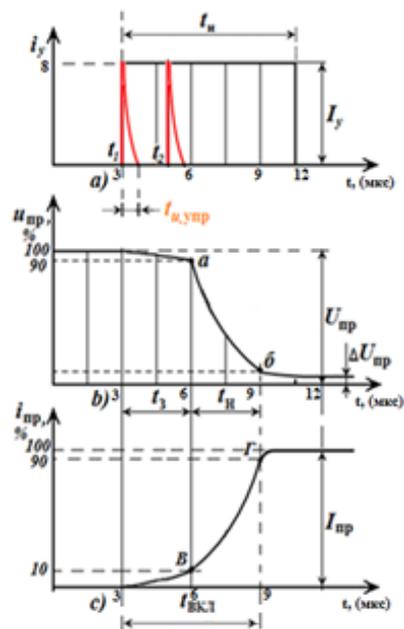
При последовательном соединении тиристоров, если к одному из вентиляей импульс управления поступит с некоторым запаздыванием, например  $t_2 - t_1 > t_{u. ynp.}$  (рис.1,а), то цепь будет разомкнута, через тиристоры ток  $I_{пр}$  в прямом направлении (из-за нарушения закона о непрерывности тока) протекать не будет, не будет начинаться процесс первоначальной инжекции электронов из эмиттерной области тиристоров.

Таким образом, в отличие от процесса работы одиночного тиристора, для работы, последовательно соединенной ТГ вытекает один из основных требований, который формулируется следующим выражением. В последовательно соединенной ГТ сигнал управления во все тиристоры должен поступать одновременно (без запаздывания).

Если для пуска АД с короткозамкнутым ротором большой мощности использовать ТПН с параллельно соединенными двумя и более ( $N$ ) тиристорами (рис.2), то большой пусковой ток АД  $I_{пр} = (5 \div 8) I_H$  будет распределен между этими тиристорами. При этом каждый тиристор будет нагружен частью пускового тока, значительно меньше, чем допустимый для данного типа тиристоров  $I = I_{пр} / N$ .

Динамический процесс включения группы параллельно соединенных тиристоров ТПН при прямом пуске АД большой мощности будет протекать следующим образом.

Если в момент времени  $t_1$  (рис.1,а) к управляющему электроду первого тиристора  $T1$  (рис.2) подается сигнал управления, то в течение времени  $t_1 + t_{вкл.}$  (рис.1,с) он включается и через тиристор  $T1$  (рис.2) начинает протекать полный



**Рис.1. Временные диаграммы электромагнитных процессов**

пусковой ток АД. Второй тиристор  $T2$ , к управляющему электроду которого отпирающий сигнал подается с запаздыванием (т.е. в момент времени  $t_1 + t_{вкл}$ ) не будет открываться, так как в этот момент разность потенциалов  $\Delta u_{ax}$  между точками входа «а» и выхода «х» будет минимальной (рис.1, б) из-за протекающего тока в  $T1$  (рис.2). Для определения допустимой длительности времени запаздывания подачи сигнала к управляющему электроду  $T2$ , предположим, что сигнал подается в момент времени  $t_1 + \Delta t$ .

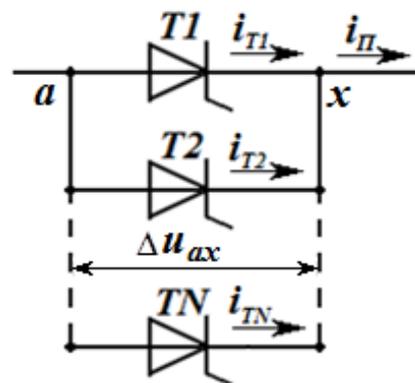
Если  $t_3 \leq \Delta t \leq t_{вкл}$  (рис.1,с), то величина разности потенциалов между точками «а» и «х» (рис.2) будет  $\Delta u_{ax} \approx (10 \div 90)\% \cdot U_{ПР}$ , ток через  $T1$  будет интенсивно нарастать от 10% до 90% значения полного пускового тока  $I_{П}$  (рис.1,с) и вероятность отпирания тиристора  $T2$  будет низкой. Если  $0 \leq \Delta t \leq t_3$ , то величина разности потенциалов  $\Delta u_{ax} \approx (100 \div 90)\% \cdot U_{ПР}$  (рис.1,б), ток через  $T1$  будет медленно нарастать от 0 до 10% значения полного пускового тока  $I_{П}$  и вероятность отпирания тиристора  $T2$  (рис.2) будет высокой. В то же время, вероятность срыва коммутации тиристора  $T2$  не исключается. Поэтому, первым и необходимым условием работы параллельно соединенных тиристорov в ГТ, как и при последовательном включении тиристорov, является одновременная подача управляющего сигнала во все тиристоры ГТ.

Невыполнение этих условий приводит к следующим последствиям.

После процесса отпирания тиристора импульсом управления достаточно короткой длительности должен последовать процесс постепенного увеличения тока с прохождением отрезков времени задержки  $t_3$  (рис.1,с) тока и времени нарастания  $t_H$  тока. При этом, обязательным условием обеспечения необходимой коммутации тиристора должна быть непрерывность протекания тока через каждый последовательно соединенный тиристор. Запаздывание или не отпирание хотя бы одного последовательно соединенного тиристора приводит к нарушению принципа непрерывности тока. Следовательно, все последовательно соединенные тиристоры будут заперты и цепь не будут отпираться. Для обеспечения одновременной коммутации тиристорov, сигналы управления  $U_y$  тиристорами ГТ должны иметь необходимую длительность, больше длительности включения ( $t_{вкл}$ ), которая определяется как сумма длительностей задержки и нарастания тока

$$t_{и} > t_{вкл} = t_3 + t_H$$

Таким образом, в отличие от общепринятых рекомендаций по применению тиристорov, о достаточности минимальной длительности управляющего импульса, для ГТ системы «ТПН-АД» длительности



**Рис.2. Параллельное соединение тиристорov**

импульсов управления тиристоров должны быть больше времени запаздывания для данных тиристоров.

Если времена задержки  $t_z$  зависит только от типа тиристоров, то длительность нарастания тока  $t_H$ , которая входит в состав времени включения тиристоров  $t_{BKЛ}$ , зависит также от характера нагрузки (рассмотрим ниже).

Если в момент времени  $t_1$  к управляющему электроду тиристора  $T1$  подается сигнал управления, то в течение времени  $t_1 + t_{BKЛ}$  он включается и через тиристор  $T1$  начинает протекать полный пусковой ток АД. Тиристор  $T2$ , к управляющему электроду которого отпирающий сигнал подается с запаздыванием (т.е. в момент времени  $t_1 + t_{BKЛ}$ ) не будет открываться, так как в этот момент разность потенциалов  $\Delta u_{ax}$  между точками входа «а» и выхода «х» будет равна нулю из-за протекающего тока в тиристоре  $T1$ . При активном характере нагрузки, т.е. при  $\cos\varphi=1,0$ , чему соответствует режим АД с конденсаторным компенсатором (КК), форма тока при отпирании тиристора повторяет форму напряжения. При этом время включения тиристора  $t_{BKЛ}$  будет минимальным – режим, близкий к срыву коммутации. При активно-индуктивном характере нагрузки ток в тиристоре имеет форму запаздывания в зависимости от величины  $\cos\varphi$ . С ростом индуктивного характера нагрузки ТПН темп нарастания тока в тиристоре во время его отпирания уменьшается и растет вероятность отпирания тиристоров без срыва коммутации.

Расчеты показали, что при коэффициенте мощности короткого замыкания АД  $\cos\varphi = 0,45 \div 0,55$ , работа ТПН с параллельно соединенными ТГ будет наиболее приемлемым с точки зрения работы тиристоров без срывов коммутации.

Следовательно, если учитывать, что фактором, вызывающим изменения  $\cos\varphi$  АД, является включение КК на вход обмотки статора двигателя, то одним из необходимых условий работы без срыва коммутации ТПН-АД является включение КК на входе ТПН, а ни в коем случае на его выходе.

Для обеспечения надежной работы разработанного ТПН в системе автоматизированного электропривода с частым пусковым режимом, необходимо использование обратной связи по току, скорости вращения ротора и другим величинам. При этом, необходимо учитывать то обстоятельство, что пуск с пониженным напряжением с помощью ТПН обуславливает снижение пускового тока, которое и является основной целью разработки данного метода, но еще и значительного уменьшения электромагнитного вращающего момента. Кроме этого, с управлением угла отпирания тиристоров ТПН от  $\theta = 180^0 \div 0$  и плавным изменением напряжения в процессе пуска АД, форма кривой напряжения обмоток статора будет не синусоидальной, при которой между статором и ротором создаются вращающие и тормозные электромагнитные моменты от токов с частотами третьей, пятой и выше гармонических составляющих. Поэтому появляется необходимость использования микропроцессорного управления процессом пуска АД.

Многие авторы отмечают то, что разработка систем автоматического управления, схем, алгоритмов, программ по применению микропроцессоров, представляют собой предмет интеллектуальной собственности, поэтому публикации материалов в научно-технической литературе являются редким исключением. Такое положение не позволяет проводить сравнения результатов данного исследования с существующими работами.

В третьей главе диссертации «**Математическое моделирование АД-ТПН с микропроцессорным управлением при пуске**» - посвящена разработке математических моделей АД в режиме пуска с учетом принятых допущений об идеализированной электрической машине, ТПН с нелинейным активным сопротивлением и использованием микропроцессорного управления.

Выполнение экспериментальной проверки мощного высоковольтного оборудования в условиях непрерывного технологического процесса ТЭС является высоко затратным, затруднительным, порой невозможным. Поэтому, для проведения исследований по определению влияния отдельных элементов электропривода на переходные процессы АД, а также определения условий для применения микропроцессорного управления, было предложено разработать математическую модель системы ТПН-АД, проводить на ней вычислительный эксперимент и затем, результаты исследований применить на оригинал объекта ТПН-АД.

В целях упрощения системы уравнений для математической модели АД, принято использовать простейшие модели обобщенной электрической машины, где количество уравнений и переменных значительно сокращаются. Тогда уравнения напряжений двухфазных обмоток статора и ротора модели в ортогональных координатах будет записаны:

$$\left. \begin{aligned} u_{\alpha s} &= -d\Psi_{\alpha s}^v/dt + i_{\alpha s} r_s \\ u_{\beta s} &= -d\Psi_{\beta s}^v/dt + i_{\beta s} r_s \\ u_{\alpha r} &= -d\Psi_{\alpha r}^v/dt + i_{\alpha r} r_r \\ u_{\beta r} &= -d\Psi_{\beta r}^v/dt + i_{\beta r} r_r \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

а, уравнения движения ротора (равновесия моментов электропривода)

$$d\omega_r/dt = [M_c(t) - M_{\text{ЭМ}}(t)/J], \quad (2)$$

и электромагнитного момента будут в виде

$$M_{\text{ЭМ}}(t) = pM(t)[i_{\beta s} i_{\alpha r} - i_{\alpha s} i_{\beta r}]. \quad (3)$$

Для учета влияния высших гармонических составляющих напряжения статора, система уравнений напряжений будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{\alpha s}^v &= -d\Psi_{\alpha s}^v/dt + i_{\alpha s}^v r_s \\ u_{\beta s}^v &= -d\Psi_{\beta s}^v/dt + i_{\beta s}^v r_s \\ u_{\alpha r}^v &= -d\Psi_{\alpha r}^v/dt + i_{\alpha r}^v r_r \\ u_{\beta r}^v &= -d\Psi_{\beta r}^v/dt + i_{\beta r}^v r_r \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Тогда результирующий электромагнитный момент будет определяться из суммы моментов каждой гармонической составляющей токов

$$\left. \begin{aligned} M_{\Delta M}^v(t) &= pM(t) \left[ i_{\beta s}^v i_{\alpha r}^v - i_{\alpha s}^v i_{\beta r}^v \right] \\ M_{\Delta M}(t) &= \sum M_{\Delta M}^v(t) \end{aligned} \right\} . \quad (5)$$

В отличие от общепринятых положений составления математической модели АД, приведенных выше, в данной работе значения  $M_C(t)$  - мгновенные значения момента сопротивления производственного механизма, определялись из кривой вентиляторной характеристики  $M_C(\omega)$ , в процессе вычисления уравнений математической модели, предварительно снятой путем эксперимента. Численные значения экспериментально снятых величин момента сопротивления  $M_C(\omega)$  можно включить в математическую модель в виде таблиц или графиков. Наиболее удобным является аналитическое представление  $M_C(\omega)$  в виде следующей аппроксимированной функции:

$$M_C(\omega) = M_0 + (M_{CN} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_N} \right)^q, \quad (6)$$

где  $M_C(\omega)$  - момент сопротивления при скорости  $\omega$ ;  $M_0$  - момент холостого хода механизма;  $M_{CN}$  - номинальный момент сопротивления при номинальной частоте вращения  $\omega_N$ ;  $q$  - показатель степени, который определяет тип статической механической характеристики (для данного производственного механизма определен экспериментально  $q=1,65$ ).

Подробное исследование свойств отпирания тиристоров позволило построить математическую модель ТПН, состоящего из групп тиристоров.

Исходя из приведенных характеристик, можно сделать вывод, что работа тиристора описывается нелинейными уравнениями с активным сопротивлением, зависящим от формы и величины тока  $i_{AK}$ , напряжения  $u_{AK}$  на выходе анод-катод тиристора, тока управления  $i_V$  и времени  $t$ , а также от внутреннего состояния  $S$ :

$$R_{AK} = f[U_{AK}(t), i_{AK}(t), i_V(t), t, S], \quad (7)$$

Ток управления считается дискретным, изменяющимся мгновенно и равным нулю, либо току спрямления  $I_{VC}$ :

$$R_{AK} = \begin{cases} R_{a-f} = R_{закр}, & \text{если } i_{AK} \leq 0 \text{ или } U_{AK} < 0, \\ R_{a-b} = R_{закр}, & \text{если } U_{AK} \geq 0 \text{ и } S=0, \\ R_{d-e} = R_{Откр}, & \text{если } U_{AK} \geq 0 \text{ и } i_{AK} \leq 0 \text{ и } S=1, \end{cases} \quad (8)$$

где  $i_{AK}$  ток в тиристоре,  $u_{AK}$  - напряжения на выходе анод-катод тиристора;  $I_{уд}$  - ток удержания включенного состояния тиристора;  $I_{вкл}$  - ток перехода во включенное состояние;  $R_{закр}$  - сопротивление тиристора в закрытом состоянии;  $R_{Откр}$  - сопротивление тиристора в открытом состоянии;  $S$  - внутреннее состояние (0 - открыт, 1 - закрыт) тиристора может быть представлено выражением:

$$S_K = \begin{cases} 0, & \text{агар } U_k < 0 \text{ ёки } i_{AK} < I_{к.зар} \text{ бўлса} \\ 1, & \text{агар } U_{AK} \geq 0 \text{ ёки } i_{AK} = I_{к.зар} \text{ бўлса} \\ S_K \text{ колган барча холатларда} \end{cases} \quad (9)$$

Для  $k$ -тиристора из  $K$  последовательно соединенных тиристоров уравнения можно записать, как

$$S_K = \begin{cases} 0, & \text{агар } U_k < 0 \text{ ёки } i_{AK} < I_{к.зар} \text{ бўлса} \\ 1, & \text{агар } U_{AK} \geq 0 \text{ ёки } i_{AK} = I_{к.зар} \text{ бўлса} \\ S_K \text{ колган барча холатларда} \end{cases} \quad (10)$$

и  $n$ -тиристора из  $N$  параллельно соединенных тиристоров уравнения можно записать, как

$$R_N = \begin{cases} R_{a-f} = R_{\text{ёнши}}, & \text{агар } i_N \leq 0 \text{ ёки } U_N < 0, \\ R_{a-b} = R_{\text{ёнши}}, & \text{агар } U_N \geq 0 \text{ ва } S_N = 0, \\ R_{d-e} = R_{\text{очши}}, & \text{агар } U_N \geq 0 \text{ ва } i_N > I_{к.зар} \text{ } S_N = 1, \end{cases} \quad (11)$$

Для группы тиристоров из  $K$  количества последовательно соединенных тиристоров уравнения нелинейных активных сопротивлений и состояний будут записаны:

$$R_K = R'_1 + R'_2 + \dots + R'_K = \sum_{k=1}^K R'_K, \quad S' = S'_k, \quad (12)$$

и для  $N$  параллельно соединенных тиристоров уравнения нелинейных активных сопротивлений и состояний будут записаны:

$$R_N = 1 / [(1/R_1) + (1/R_2) + \dots + (1/R_n)] = 1 / \sum_{n=1}^N 1/R'_N, \quad S = S_n, \quad (13)$$

Математические модели ТГ для положительного (с индексом +) и отрицательного (с индексом -) полупериодов напряжения фазы  $A$  будет записана следующим нелинейным уравнением из активных сопротивлений:

$$R_{A.ТПН(+)} = 1 / \sum_{n=1}^N 1 / \sum_{k=1}^K R'_k, \quad R_{A.ТПН(-)} = 1 / \sum_{n=1}^N 1 / \sum_{k=1}^K R'_k \quad (14)$$

Тогда математическая модель тиристорных групп ТПН для фазы  $A$  (рис.3) состоящей из двух встречно-параллельно соединенных ветвей, каждая из которых составляет параллельно соединенные  $N$  групп, каждая из которых состоит из  $K$  последовательно соединенных тиристоров, будет записана следующим нелинейным уравнением из активных сопротивлений:

$$R_{A.ТПН(+)} \begin{cases} R_{A.ТПН(+)}, & \text{если } (0 + 2\pi) \leq t \leq (180 + 2\pi) \\ R_{A.ТПН(-)}, & \text{если } (180 + 2\pi) \leq t \leq (360 + 2\pi) \end{cases}, \quad (15)$$

Система уравнений, записанные для фазы  $A$  ТПН справедлива также для двух других фаз, причем уравнения записаны для ТПН с произвольными параметрами тиристоров (рис.3).

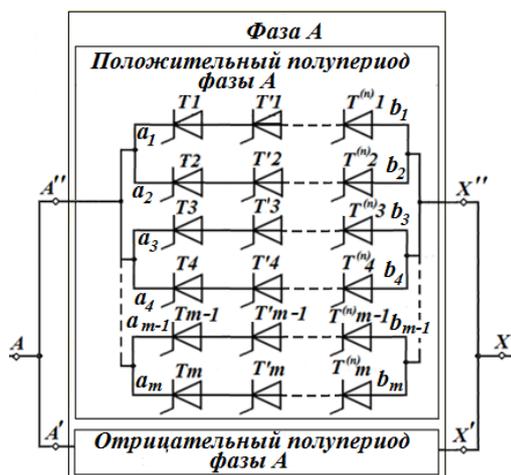


Рис.3. Тиристорные группы фазы А ТПН



Рис.4. Силовая схема имитационной модели ТПН-АД

Известно, что метод пуска с применением ТПН и управлением угла  $\theta$  позволяет не только уменьшить пусковой ток АД, но еще уменьшает электромагнитный вращающий момент по величине, следовательно, приводит к росту длительности пуска. При этом, форма кривой напряжения  $u(t)$  обмоток статора АД будет существенно не синусоидальной. Появляются составляющие токов высших гармонических, которые создают составляющие вращающего и тормозного электромагнитного момента. Таким образом, несмотря на плавный рост среднего значения напряжения на входе АД, частота вращения ротора будет пульсирующей, а при близкой к половине синхронной скорости вращения, будет наблюдаться процесс торможения ротора. Микропроцессорная система управления будет обеспечивать, кроме формирования требуемой формы импульсов управления тиристорами, еще будет управлять темпом изменения среднего напряжения АД с помощью обратных связей по частоте вращения ротора и току статора, тем самым выводит электропривод из заторможенного режима при пуске.

В четвертой главе диссертации «**Экспериментальные исследования переходных процессов пуска в ход «ТПН-АД» с микропроцессорным управлением**» приведены результаты экспериментальных исследований объекта и его моделей. Как было отмечено выше, проведение экспериментальных исследований на оборудовании большой мощности в условиях непрерывного технологического процесса ТЭС не представляется возможным. Поэтому экспериментальные исследования выполнялись без остановки процесса технологии. При этом опытные исследования были разделены на отдельные этапы: а) проведение вычислительных экспериментов на разработанной математической модели (ММ) ТПН-АД; б) разработка имитационной модели ТПН-АД и проведение опытных исследований на этой модели; в) проведение экспериментальных исследований на физической модели - лабораторной установке ТПН-АД и сравнение результатов исследований.

При выполнении первого этапа - определение влияния отдельных элементов электропривода большой мощности на качество переходных процессов пуска в ход АД с помощью вычислительных экспериментов на ММ, составлен алгоритм и разработана программа решения нелинейных дифференциальных уравнений на языке C++ для ММ системы ТПН-АД.

Для выполнения второго этапа экспериментальных исследований - проверки рекомендаций из выводов и заключений второй главы, была собрана силовая схема (рис.4) имитационной модели (ИМТПН). В схеме один базовый тиристор одной фазы (например, фазы А) ТПН, был заменен ТГ (рис.3), состоящей из последовательно соединенных  $(a_1-b_1)$ ,  $(a_2-b_2)$ , ...,  $(a_m-b_m)$  цепочек, каждая из которых соединена между собой параллельно и назван «Положительным полупериодом». Другой встречно-параллельно соединенный базовый тиристор, был заменен ТГ с подобной схемой соединения и назван «Отрицательным полупериодом».

Для выполнения третьего этапа - проверки адекватности результатов вычислительного эксперимента на ММ, была разработана физическая ее модель - лабораторная установка ТПН-АД и проведены опытные исследования на них.

Физическая модель ТПН-АД состоит:

ТПН состоит из шести набранных тиристоров в ТГ в каждой фазе по одной паре встречно-параллельно соединенных групп тиристоров, каждая из которых объединяет две параллельно включенные подгруппы с последовательно соединенными тремя тиристорами типа КУ201 (рис.5); АД типа АИР63В4, мощностью 0,37 кВт, напряжением 380/220 В и синхронной частотой вращения ротора  $n_1=1500$  об/мин; из обратных связей по частоте вращения ротора и току статора.

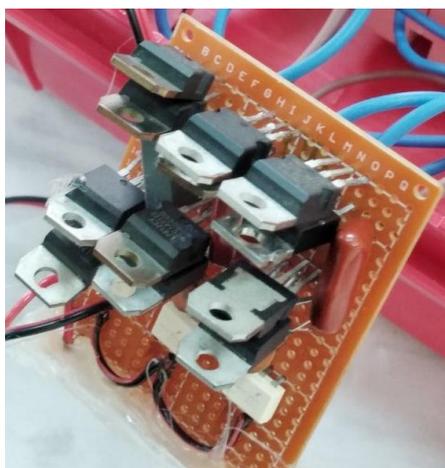


Рис.5. Плата с тиристорными группами физической модели.

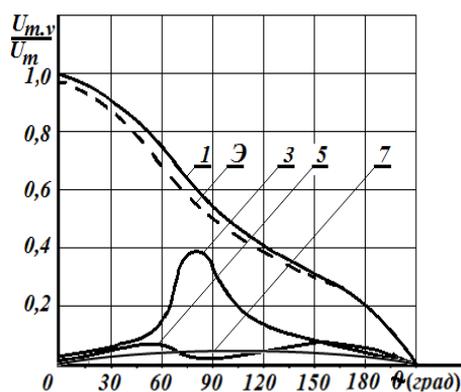


Рис.6. Кривые зависимостей амплитуд гармонических составляющих напряжения статора от угла отпирания тиристоров: 1, 3, 5-основная, третья, пятая гармоники.

Вычислительный эксперимент проводился для решения следующих задач: для определения влияния высших гармонических напряжения, приложенного к обмоткам статора при изменениях формы выходного

напряжения ТПН при варьировании углом отпирания тиристоры на пусковые характеристики и на характер протекания переходных процессов;

для формирования благоприятных условий и требований к пуску АД и определения влияния ускорения ротора АД с поддержанием на различном уровне предельных значений тока статора.

Осциллограммы кривых напряжений были разложены в гармонический ряд, определены гармонические составляющие, их амплитудные значения и построены графики зависимости амплитуд каждой гармонической  $U_{m,l}$  в функции от угла отпирания тиристоры  $\theta$  (рис.6).

Сравнения составляющих  $U_{m,v}=f(\theta)$  показали, что амплитуда основной гармоники напряжения растет при уменьшении угла отпирания от  $\theta = 180^\circ$  до  $0$  от своего минимального до максимального  $95 \div 98\%$ , определяемого допустимыми показателями ГОСТ на качество кривой напряжения при полностью открытом состоянии тиристоры. Третья гармоническая составляющая с уменьшением угла  $\theta$  с начало растет, достигая максимального (35-37%) от  $U_{m,l}$  значения при угле, близком  $\pi/2$ , затем уменьшается. Пятая гармоническая составляющая изменяется с двумя экстремумами, но составляет не более  $8 \div 10\%$ . Вычислительный эксперимент на ММ показал, что в процессе пуска АД постепенным нарастанием  $U$  изменения угла  $\theta$ , в диапазоне изменения  $60^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ , при котором амплитуды некоторых высших гармонических напряжения повышаются (рис.6), разгон ротора сбавляется, иногда ротор тормозится и затягивается процесс пуска. К микропроцессору предъявляется требование проскочить этот участок быстрым темпом изменения угла  $\theta$ , следовательно, с увеличенным темпом роста среднего значения  $U$  ТПН.

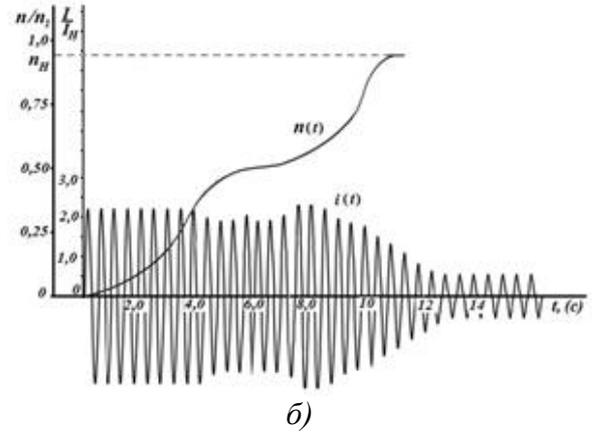
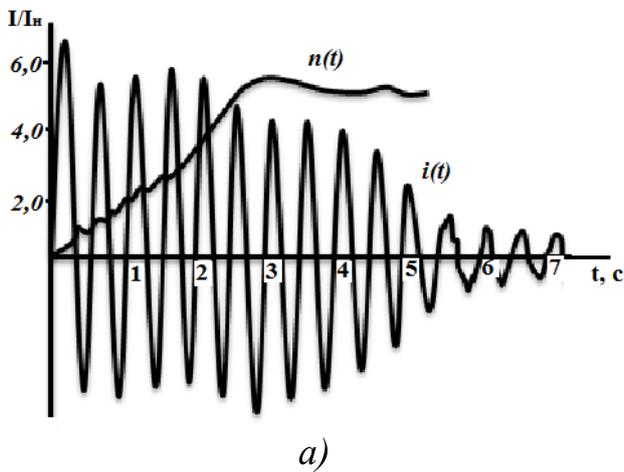
Также микропроцессор будет обеспечивать ГТ сигналами управления необходимой формы, предложенных выше и получивших подтверждение при проведении вычислительных экспериментов. Ниже приведены кривые зависимости тока и частоты вращения ротора АД АД-5000, снятые по результатам вычислительного эксперимента на ММ при прямом пуске (рис.7,а) и с использованием разработанной ТПН с микропроцессорным управлением (рис.7,б).

На имитационной модели системы ТПН-АД проводились экспериментальные исследования работы ТПН с ГТ при различных значениях коэффициента мощности  $\cos\varphi$  на выходе ТПН. Исследования подтвердили теоретические положения о росте вероятности срыва коммутации параллельно соединенных тиристоры при  $\cos\varphi$ , близком к единице, из-за сокращения времени, отведенного для включения тиристоры.

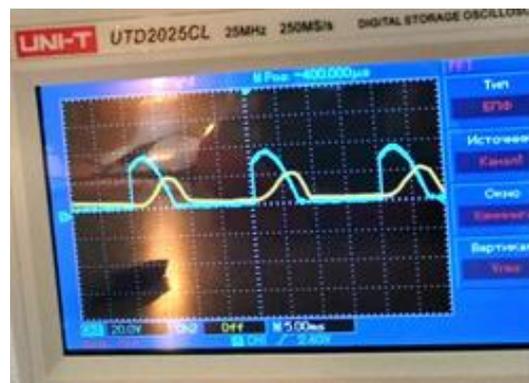
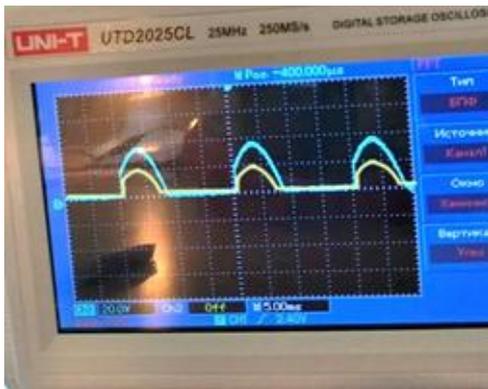
При убывании  $\cos\varphi$  активно-индуктивного характера ниже 0,8 вероятность срыва коммутации ГТ резко уменьшается, за счет увеличения времени «нарастания тока» в тиристоре, в течение которого все параллельно соединенные тиристоры успевают перейти в открытое состояние.

Осциллограммы тока и напряжения при  $\cos\varphi=1,0$  (рис.8,а),  $\cos\varphi=0,6$  (рис.8,б) подтверждают приведенные выше заключения. Таким образом, еще одним условием надежной работы ГТ является недопущение доведения  $\cos\varphi$

ТПН до единицы. Следовательно, при наличии в схеме компенсирующих реактивную мощность устройств, они должны быть подключены только между сетью и входом ТПН.



Р



а)

б)

**8-рис. Кривые напряжений и токов тиристоров при различных коэффициенты мощностях.**

При применение предлагаемой научно-исследовательской работы для двух ЭД ожидается:

Асинхронный электродвигателя питательного насоса котла ТЭС мощностью 5000 кВт за счет увеличение срока службы (Ремонт одного электродвигателя мощностью 5000 кВт обойдется в 95 млн сумов)

$$A_1 = 95 \times 2 - 95 = 95 \text{ млн. сумов.}$$

АД мощностью 630 кВт за счет увеличение срока службы (Ремонт одного электродвигателя мощностью 5000 кВт обойдется в 22 млн сумов)

$$A_2 = 22 \times 3 - 22 = 44 \text{ млн. сумов.}$$

Общая экономическая эффективность, достигаемая за счет увеличения без ремонта срока службы асинхронных электропривода агрегатов собственных нужд ТЭС определяется по следующим.

Общий экономический эффект получим

$$A_{ум} = A_1 + A_2 = 95 + 44 = 139 \text{ млн. сумов}$$

Стоимости покупных изделий, используемой при сборке компонента микропроцессорного устройства: микропроцессор типа Ноутбук Dell Inspiron 15-3552/Intel 2,813 млн. сум., тиристор типа ТБ453-800, напряжением 2,8 кВ и током 0,8 кА – 390 000 сумов; для двух ТПН необходимо  $6 \cdot 3 \cdot 2 = 36$  тиристоров; стоимость ТПН  $36 \cdot 390\,000 = 14$  млн.сумов.

Итого, стоимость ТПН с микропроцессором  $C_{преоб} = 2,813 + 14 = 16,813$  млн. сумов. Для системы ТПН-АД с микропроцессорным управлением принимаем спроса коэффициент  $\lambda = 1,2$ .

Находим срок окупаемости внедряемого ТПН-АД с микропроцессорным управлением

$$T_{окуп} = \frac{C_{преоб}}{\lambda \cdot A_{общ}} = \frac{16,813}{1,2 \cdot 139} = 0,1 \text{ год} = 1,2 \text{ месяца}$$

Где  $T_{окуп}$  - срок окупаемость общие расхода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования, проведенного по диссертации доктора философских наук в области технических наук (PhD) на тему «Управление пуском асинхронного электропривода агрегатов собственных нужд ТЭС с помощью микропроцессора» были представлены следующие выводы:

1. Проанализированы процессы пуска высоковольтных мощных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором агрегатов собственных нужд тепловых электростанции. В результате были объяснены недостатки при методе прямого пуска высоковольтных мощных асинхронных двигателей агрегатов собственных нужд «Навоийского ТЭС».

2. Разработаны условия бесперебойной работы коммутации тиристорных групп в составе тиристорного преобразователя напряжения. В результате обеспечена одновременное отпирание всех тиристоров и длительность импульсов управления тиристоров не меньше длительности отпирания каждого тиристора в отдельности.

3. Предложена методика управления микропроцессорного пуска в ход высоковольтного асинхронного короткозамкнутого двигателя большой мощности с тиристорным преобразователем напряжения, состоящего из комбинации соединенных тиристорных групп. В результате обеспечена плавный пуск высоковольтных мощных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

4. Разработана математическая модель переходного процесса микропроцессорного управления, имитационная модель и программа, позволяющая одновременно отпирать тиристоры при запуске системы «Тиристорный преобразователь напряжения - асинхронный двигатель». В результате были проведены различные испытания и расчеты с использованием разработанной математической модели, программного обеспечения и имитационных моделей, и был выбран относительно оптимальный вариант.

5. Теоретические выводы исследования подтверждают, что доказано преимущество использования группы тиристорov, соединенных параллельно и последовательно, для создания системы «тиристорный преобразователь напряжения - асинхронный двигатель» с микропроцессорным управлением. В результате время пуска мощных асинхронных двигателей с использованием микропроцессорной системы «тиристорный преобразователь напряжения - асинхронный двигатель» сокращается в 2,5 раза, а срок службы без ремонта увеличен с 6-7 месяцев до 25 месяцев.

6. Результаты научно-исследовательских работ, выполненных в рамках данной диссертационной работы внедрены на АО «Навоийский ТЭС». В результате пуск мощных и высоковольтных асинхронных двигателей по системе «Тиристорный преобразователь напряжения –асинхронный двигатель» позволил увеличить срок службы без ремонта и достигается экономическая эффективность на 139 миллионов в год.

**SCIENTIFIC COUNCIL FOR AWARDING ACADEMIC DEGREES  
DOCTOR of SCIENCE DSc 03/10. 12. 2019. T. 03. 03 AT TASHKENT  
STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

---

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY  
NAMED AFTER ISLAM KARIMOV**

**KHAMZAEV AKBAR ABDALIMOVICH**

**«MICROPROCESSOR CONTROL OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC  
DRIVE STARTUP OF TPP UNITS OF OWN NEEDS»**

**05.05.02 – Electrical Engineering. Electric power stations and systems. Electric technical  
complexes and installations**

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)  
TECHNICAL SCIENCES**

**TASHKENT-2021**

**The theme of the dissertation of doctor of philosophy(PhD) in technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2020.4.PhD/T767.**

The dissertation has been prepared at Tashkent State Technical University named after Islam Karimov.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian and English (resume)) on the website [www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz) and on the website of «ZiyoNet» Information and education portal ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Scientific Adviser:**

**Alimxadjaev Komoliddin Tillaxodjaevich**

doctor of technical science, professor

**Official Opponents:**

**Kamalov Tolyagan Sirajidinovich**

doctor of technical science, professor

**Aripov Nazirjon Mukaramovich,**

doctor of technical science, professor

**Lead organization:**

**Bukhara Engineering and Technology Institute**

The defense of dissertation will take place on "10" 07 2021 at 11<sup>00</sup> o'clock at a meeting of the Scientific council No. DSc.03/10.12.2019.T.03.03 under Tashkent State Technical University (Address: 100095, Tashkent, Universitet st., 2. Tel./fax: (99871) 227-10-32; e-mail: [tadqiqitchi@tdtu.uz](mailto:tadqiqitchi@tdtu.uz)).

The doctoral dissertation can be reviewed at the Information-resource center of Tashkent State Technical University (is registered number No 212) (Address: 100095, Tashkent, Universitetskaya st., 2. Tel./fax: (99871) 246-03-41; e-mail: [tadqiqitchi@tdtu.uz](mailto:tadqiqitchi@tdtu.uz)).

Abstract of the dissertation sent out on "26" 06 2021  
(Protocol of the delivery No 4 dated "25" 06 2021)



**K.R. Allaev**  
Chairman of scientific council for awarding scientific degrees Doctor of technical sciences, Professor, Academician

**O.H. Ishnazarov**  
Scientific secretary of scientific council on awarding scientific degrees, Doctor of technical sciences, Professor

**T.Sh. Goyibov**  
Chairman of scientific seminar under scientific council for awarding scientific degrees Doctor of technical sciences, Professor

## INTRODUCTION (abstract to the dissertation of the doctor of philosophy (PhD))

**The purpose of the dissertation is** to study and develop systems «Thyristor voltage Converter- induction motor» (TVC-IM) based on a high-voltage asynchronous high-power electric drive with the use of microprocessor control.

**The tasks of the research:**

To achieve this goal, you need to solve the following main tasks:

analysis of existing start-up methods and features of smooth start-up of high-power high-voltage asynchronous motors;

development of a T TVC circuit for the starting mode of a high-voltage high-power induction motors using microprocessor control;

development of a mathematical model of an asynchronous motor with a TPN in soft start mode and determination of the solution algorithm

conducting experimental studies on the physical model of the «TVC-IM» system using microprocessor control;

development of simulation models of high-voltage «TVC-IM» of high power.

**The object of the research** is short-circuited asynchronous motors with TVC drives of units for their own needs of thermal power stations.

**The scientific novelty of the dissertation research** consists in:

developed a method for controlling the microprocessor start-up of a high-voltage asynchronous short-circuited high-power motor with a TPN consisting of thyristor groups;

a mathematical model of TVC with nonlinear active resistances has been developed;

proposed requirements for the pulse control groups of thyristors TPN microprocessor start-up high-voltage asynchronous closed-loop motor of high power;

developed a calculation algorithm and a calculation program in C++ for equations of a mathematical model of the TVC-IM system for conducting computational experiments.

**Implementation of research results.** Based on scientific results obtained on the control of the system «Thyristor voltage Converter-asynchronous motor» (TPN-AD) using a microprocessor based on a powerful high-voltage asynchronous electric drive:

Due to the smooth start of asynchronous motor with squirrel-cage rotor with capacity of 5,000 kW feed pump a boiler-house of JSC «Navoi TPP» was reduced starting current reduced moment of inertia and increased the service life of these motors with 6÷7 months to 25 months.

The result will also increase production productivity during this period.

The operating mode of the asynchronous motor with a short-circuited rotor with a capacity of 630 kW of the suction fan used in the heating system of Navoi TPP JSC will be optimized, which will increase the service life of electric motors and starting devices.

The expected economic efficiency is estimated at 139 million soums due to improving the start-up mode of asynchronous electric motors and reducing repair costs when controlling the TPN-AD system using a microprocessor based on a high-voltage asynchronous electric drive of high power. (information from the Ministry of Energy No. 04-13-3946 dated July 28, 2020 and Navoi thermal power plant JSC No. 13/143 dated January 23, 2020).

**Structure and scope of work.** The structure of the dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of references, and appendices. The volume of the dissertation is 112 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙЎХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть; part I)**

1. Хамзаев А.А., Тошов Б.Р. Применение частотного преобразователя при автоматизации водоотливных и воздухоудных установок// Горный вестник Узбекистана. – Навои, 2017. -№69. –С.92-96 (05.00.00; №7).

2. Хамзаев А.А. Применение современной техники и технологии для регулирования скорости маломощного двух скоростного электромотора в автоматическом режиме // Горный вестник Узбекистана. – Навои, 2017. - №69. –С. 96-99 (05.00.00; №7).

3. Хамзаев А.А. Исследование переходных процессов при пуске асинхронных двигателей с большой мощностью при помощи параллельных тиристоров // Горный вестник Узбекистана. – Навои, 2019. - №69. – С.96-100 (05.00.00; №7).

4. Alimkhadjaev K.T., Khamzaev A.A. The problems of direct start-up of asynchronous engine of large power fan settings for tps // International journal of Advanced research in science, engineering and technology. -Volume 6, issue 11, - 2019. – PP. 11224-11228. (05.00.00; №31).

5. Алимходжаев К.Т, Хамзаев А.А. Катта кувватли қисқа туташган роторли асинхрон электр моторлар иш режимида микропроцессор қурилмасини қўллаш // Композицион материаллар. –Тошкент, 2019. -С.148-150 (05.00.00; №13).

6. Алимходжаев К.Т., Тоиров О.З., Хамзаев А.А., Таниев М. Развитие системы «Тиристорный преобразователь напряжения-асинхронный (ТПН-АД)» на основе высоковольтного АД большой мощности // Энергия ва ресурс тежаш муаммолари. – Тошкент, 2020. -№3-4. -С.192-198 (05.00.00; №21).

**II бўлим (II часть; part II)**

7. Алимходжаев К.Т., Тошов Б. Р., Хамзаев А.А. Ўзгарувчан токли катта кувватли электр моторлар иш режимида микропроцессор қурилмасини қўллаш учун дастурий таъминот // Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги интеллектуал мулк агентлиги. ЭХМ дастури учун гувоҳнома. DGU 2019-0957.

8. Хамзаев А.А.,Тошов Б. Р., Абдуазизов Н.А., Зоҳидов О.У. Гидравлик суюқликнинг тавсифига боғлиқ равишда гидроциклон асинхрон моторини микропроцессорли бошқариш учун дастурий таъминот // Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги интеллектуал мулк агентлиги. DGU 2019-1196.

9. Хамзаев А.А., Зоҳидов О.У.Сравнительный анализ высоковольтных и низковольтных преобразователей частоты, выполняемых на тиристорах и биполярных транзисторах (IGBT-МОДУЛЯХ) // Материалы VIII-

международной научно-технической конференции «Горно-металлургический комплекс и достижения, проблемы и современные тенденции развития». – Навоий, 2015. –С. 239-240.

10. Хамзаев А.А., Зохидов О.У. Метод уменьшение пускового тока // Материалы Республиканской научно-технической конференции «Горно-металлургический комплекс: достижения, проблемы и перспективы инновационного развития». –Навоий, 2016, - С. 200-201.

11. Хамзаев А.А., Тошов Б.Р., Тураев Д.Х. Разработка систем автоматизированного управления режимами работы насосных и воздухоудувных установок // Журнал «Молодой учёный». – Россия, Казан, 2017. - С. 80-83.

12. Хамзаев А.А., Мусурманов Э.Ш, Хайдарова М.Э. Повышение энергоэффективности вентиляторных установок // Журнал «Молодой учёный». – Россия, Казан, 2017. - С. 95-98.

13. Хамзаев А.А., Зохидов О.У. Микропроцессоры в системах электропривода // Материалы международной научно-технической конференции «Перспективы инновационного развития горно металлургического комплекса». -Навои, 2018. -С. 292-293.

14. Хамзаев А.А., Зохидов О.У., Турсунов Х.У, Баракаев С.У. Выбор и обоснование специальных компенсирующих устройств для компенсации реактивных нагрузок // Сборник статей VIII Международной научно-практической конференции «Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения» - Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2018. – С. 252.

15. Хамзаев А.А. Mathematical model of two-speed asynchronous electric motor with high power // International conferens «Integrated innovative development of Zarafshan region: achievements, challenges and prospects». - Navoi, 2019. - PP.638-643.

16. Khamzaev A.A., Toshov B.R., Qodirov Kh.G. Transients of series and parallel connected thyristors of a high-voltage electric drive «TVS-AM» // Journal of critical reviews. -Vol 7, Issue 15, 2020.

17. Хамзаев А.А., Тошев Ш.Э, Анализ магнитного поля в воздушном зазоре неявнополюсного синхронного генератора двухосного возбуждения при несимметричных коротких замыканиях // «Интернаука», 2020. -С. 388-395.

Автореферат «Энергия ва ресурс тежаш муаммолари» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди.

Бичими: 84x60 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. «Times New Roman» гарнитураси.  
Рақамли босма усулда босилди.  
Шартли босма табағи: 3. Адади 100. Буюртма № 3/21.

Гувоҳнома № 851684.  
«Тирограф» МЧЖ босмаҳонасида чоп этилган.  
Босмаҳона манзили: 100011, Тошкент ш., Беруний кўчаси, 83-уй.