

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

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**УМАРОВ ШУХРАТ БАДРЕДДИНОВИЧ**

**ДАВРИЙ СТРУКТУРАЛИ ВЕНТИЛЛИ ЎЗГАРТИРГИЧЛАРИНИ ИШ  
РЕЖИМЛАРИНИ ТАДҚИҚ ҚИЛИШ УСЛУБИЁТИ**

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

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАН ДОКТОРИ (DSc)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Техника фанлари доктори (DSc) диссертацияси автореферати  
мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора технических наук (DSc)**

**Contents of the Doctoral (DSc) Dissertation Abstract**

<b>Умаров Шухрат Бадреддинович</b> Даврий структурали вентилли ўзгартиргичларини иш режимларини тадқиқ қилиш услубиёти.....	3
<b>Умаров Шухрат Бадреддинович</b> Методология исследований режимов работы вентиляльных преобразователей с периодической структурой .....	29
<b>Umarov Shukhrat Badreddinovich</b> Methodology for investigating modes of operation of transducers with periodic structure.....	55
<b>Эълон қилинган ишлар рўйхати</b> Список опубликованных работ List of published works .....	59

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

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**УМАРОВ ШУХРАТ БАДРЕДДИНОВИЧ**

**ДАВРИЙ СТРУКТУРАЛИ ВЕНТИЛЛИ ЎЗГАРТИРГИЧЛАРИНИ ИШ  
РЕЖИМЛАРИНИ ТАДҚИҚ ҚИЛИШ УСЛУБИЁТИ**

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

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАН ДОКТОРИ (DSc)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2022**

Фан доктори (DSc) диссертациясининг мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузурадаги Олий аттестация комиссиясида B2022.1.DSc/T508 рақами билан рўйхатга олинган.

Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (Ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) ҳамда «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида ([www.ziyounet.uz](http://www.ziyounet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий маслаҳатчи:** Сапаев Хушнуд Бабажанович  
техника фанлари доктори, профессор

**Расмий ошпонентлар:** Коровкин Николай Владимирович  
техника фанлари доктори, профессор  
(Россия Федерацияси)

Тоиров Олимжон Зувурович  
техника фанлари доктори, профессор

Арплов Назиржон Мукарамович  
техника фанлари доктори, профессор

**Этакчи ташкилот:** Тошкент ахборот технологиялар университети

Диссертация химояси Тошкент давлат техника университети ҳузуридаги DSc.03/10.12.2019.T.03.03 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил «27» август соат 12.00 даги мажлисида бўлиб ўтди. (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@edu.uz](mailto:tstu_info@edu.uz)).

Диссертация билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин 28 рақам билан рўйхатга олинган) (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2. Тел.: (99871) 207-14-70).

Диссертация автореферати 2022 йил «16» август ни қоралаш (2022 йил «16» август даги 5, рақамли рўйхатга олинган).



**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.Гайнабов**  
Илмий даражалар берувчи илмий  
кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,  
техника фанлари доктори, профессор

## КИРИШ (докторлик (DSc) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда турли хил sanoat соҳаларида кенг қўлланиладиган ток ўзгартиргичлари асосидаги кучли ярим ўтказгичли ўзгартиргичларни ишлаб чиқиш, улардан юқори аниқлик ва ишончлилик билан оқилона фойдаланиш ҳамда хизмат кўрсатиш даврини узайтириш масалаларига алоҳида аҳамият берилмоқда. Хозирги кунда ривожланган мамлакатларда «...ишлаб чиқариладиган электроэнергиянинг 60% кўп бўлган қисми ярим ўтказгичли ўзгартиргичлар орқали ўтади. Қувватли электроника тизимларидан жаҳон даражасида фойдаланилганида ишлаб чиқарилган электр энергиясининг 12-15% тежаш мумкин»<sup>1</sup>. Бу борада, жумладан, истеъмол қилинадиган энергия сифати ва энергия манбаларининг ишончлигига талаблари юқори бўлган энергетик объектлари учун зарур бўлган электр таъминоти режимини таъминлаш учун мўлжалланган ток ўзгартиргичлари асосидаги вентилли ўзгартиргичларининг энергия самарадорлигини оширишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда турли хил қувватли электроника асбобларининг самарадорлигини ошириш, техник кўрсаткичларининг такомиллаштириш, вентилли ўзгартиргичларининг схемаларини моделлаштириш ва лойиҳалаш учун самарали математик моделлар ва дастурий воситаларни яратиш ҳамда талаб этилган иш режимларида энергия тежайдиган ва барқарор ишлашини таъминлашга қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, жумладан, талаб этилган иш режимларида чиқиш параметрларининг минимал ўзгаришлари билан турли хил масъулиятли истеъмолчиларни таъминлаштириш учун даврий структурали вентилли ўзгартиргичларини лойиҳалаш, моделлаштириш ва кучланиш қийматини барқарорлашини таъминлайдиган даврий структурали вентилли ўзгартиргичларини ишлаб чиқиш бўйича тадқиқотлар устувор ҳисобланмоқда. Шу билан бирга, мавжуд бошқарув усулларини, юкланиш турларини ва инверторнинг кириш токнинг шаклини инобатга олиб амал қиладиган усуллар, алгоритмлар ва дастурларни яратиш ҳамда вентилли ўзгартиргичларинининг юқори техник ва иқтисодий кўрсаткичларини таъминлайдиган куч схема элементларининг параметрларини аниқлаш долзарб вазифалардан ҳисобланмоқда.

Республикамызда иқтисодий тармоқлари кесимида энергия сифимдорлигини 2030 йилга қадар бир ярим баробарга камайтириш мақсадида янги технологик ечимларни яратиш ва такомиллаштириш ҳамда жорий этишга доир кенг қўламли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. 2022–2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегиясида, жумладан «... иқтисодийнинг энергия самарадорлигини 20 фоизга ошириш, sanoat тармоқларида йўқотишларни камайтириш ва ресурсларни ишлатиш

---

<sup>1</sup><https://www.electronics.ru/journal/article/68.pdf>

самарадорлигини ошириш»<sup>2</sup> бўйича вазифалари белгиланган. Ушбу вазифаларини амалга оширишда, хусусан, истеъмол қилинадиган энергия сифатини ва ишончилигига қўйилган юқори талабларни таъминлайдиган ва ишлаб чиқариш жараёнларнинг энергия сифимдорлигини камайтирувчи ярим ўтказгичли ўзгартиргичларни яратиш ва жорий қилиш ҳамда уларнинг талаб этилган иш режимларини аниқ ва рационал таҳлил этиш усулларини ишлаб чиқиш масалаларини ечишга қаратилган тадқиқот ишларини олиб бориш муҳим ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон «2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2016 йил 22 декабрдаги ПҚ-2692 «Саноат тармоқлари корхоналарининг жисмоний ишдан чиққан ва маънавий эскирган машина-ускуналарини жадал янгилаш, шунингдек, ишлаб чиқариш ҳаражатларини камайтиришга оид қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида», 2017 йил 23 августдаги ПҚ-3238 «Замонавий энергия самарадор ва энергия тежамкор технологияларни жорий этиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги, 2019 йил 27 мартдаги ПҚ- 4249 «Ўзбекистон республикасида электр энергетика тармоғини янада ривожлантириш ва ислоҳ қилиш стратегияси тўғрисида», 2020 йил 10 июлдаги ПҚ-4779 «Иқтисодийнинг энергия самарадорлигини ошириш ва мавжуд ресурсларни жалб этиш орқали иқтисодиёт тармоқларининг ёқилғи-энергетика маҳсулотларига қарамлигини камайтиришга доир қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида»ги қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация иши бўйича тадқиқотлар республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурстежамкорлик» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи.<sup>3</sup> Энергия самарадорлигини ошириш ва ярим ўтказгичли ўзгартиргичларини ишлаб чиқишга қаратилган илмий тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий ўқув юртларида, шу жумладан Massachusetts Institute of Technology, University of Texas at Austin (АҚШ), Institute of Electrical and Electronical Engineeres (АҚШ); Г. М. Кржижановский номидаги Энергетика институти (АЖ «ЭНИН», Россия), ОАЖ «Энергетика илмий-текшириш институти» (Россия); НПП «ЭОС» (Украина), Hefei University of Technology (Хитой); Aalborg University (Дания), University of Cambridge (Англия), TU Dortmund University (Германия), Siemens AG (Германия), Toshiba (Япония),

<sup>2</sup>Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон «2022–2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида»ги Фармони

<sup>3</sup> <https://www.twirpx.com>, <http://cyberleninka.ru>, [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net), <https://uc-ciee.org>, <http://www.sci-hab.la>, [www.dissercat.com](http://www.dissercat.com), <http://elibrary.ru>

Тошкент давлат техника университети (Ўзбекистон) ва бошқаларда амалга оширилмоқда.

Юқори техник-иктисодий тавсифларга эга бўлган даврий структурали вентилли ўзгартиргичларни самарали ишлаб чиқиш соҳасида олиб борилган илмий тадқиқотлар натижасида қуйидаги муҳим илмий натижалар олинган: вентилли мураккаб ночизғий занжирларни моделлаштириш усуллари тадқиқот қилинган (Institute of Electrical and Electronical Engineeres, АҚШ; Aalborg University, Дания; Hefei University of Technology, Ҳитой), даврий вентилли ўзгартиргичларнинг такомиллаштирилган схемалари ишлаб чиқилган (ОАЖ «Энергетика илмий-текшириш институти», Россия; НПП «ЭОС», Украина; University of Electronic Science and Technology, Ҳитой), юқори қувватли вентилли ўзгартиргичлар ишлаб чиқилган (Rockwell Automation, АҚШ; Allen Bradley, Канада; Imvar, Англия), кўп вазиқали электр юритмалар учун частота ўзгартиргичлари ишлаб чиқилган (Mitsubishi, Япония; Триол, Россия; Ross Hill, АҚШ; Relience Elektric, Германия), саноат корхоналари учун автоном инверторлари асосидаги частота ўзгартиргичлар ишлаб чиқилган (Тошкент давлат техника университети, Энергетика муаммолари институти, Ўзбекистон).

Дунёда саноат корхоналарида вентилли ўзгартиргичлар ёрдамида электр энергияни ўзгартириш самарадорлигини ошириш билан боғлиқ муаммоларнинг ечимини топишга қаратилган бир қатор қуйидаги йўналишларда: вентилли ўзгартиргичларнинг ўткинчи ва турғун ишлаш режимларини таҳлил қилиш усуллари такомиллаштириш, ўзгартирилган электр энергиясининг параметрларини сақлаиб турилишининг аниқлигини ошириш ҳамда эксплуатация ишончилигини ва хизмат қилиш муддатини узайтирилишини таъминлашга оид тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Муаммонинг ўрганганлик даражаси. Энергия самарадор статик ўзгарткичларини ишлаб чиқиш ва амалий қўллаш билан боғлиқ бўлган илмий масалаларни ҳал қилишда бир қатор таниқли хорижий олимлар катта ҳисса қўшганлар, жумладан: В.Д. Bedford, W. Mc. Muray, M. Demontvignier, Н.Д. Папалекси, И.М. Чиженко, И.Л. Каганов, В.А. Лабунцов, Н.Н. Щедрин, О.А. Маевский, Ю.Г. Толстов, А.А. Булгаков, Т.А.Глазенко, Г.С. Зиновьев, В.Е. Тонкаль, Ю.К. Розанов, Ю. С. Забродин ва бошқалар.

Энергия ўзгарткичларини тадқиқ қилиш усуллари ишлаб чиқиш, шунингдек электр энергиясини ўзгартирилиш самарадорлигини ошириш каби илмий муаммоларни ҳал қилишга Ўзбекистоннинг таниқли олимларини илмий ишлари бағишланган. Булардан Х.Ф. Фазилов, М.З. Хамудханов, Б.У.Умаров, К.Р. Аллаев, Р.А. Захидов, Т.Х. Насыров, Т.С. Камалов, А.А. Хашимов, Н. Х. Базаров, Н.М. Арипов, М.И. Ибадуллаев, Р.А. Сыздыков, Ф.А. Хошимов, Х.Б. Сапаев, М.К. Бобожанов, О.Х. Ишназаров, Н.Б. Пирматов, О.З. Тоиров ва бошқалар. Олиб борилган илмий тадқиқотлар натижасида саноат корхоналарида энергия ўзгартиргичларидан фойдаланиш самарадорлигини ошириш масалаларини ечишда салмоқли натижаларга эришилди.

Шу билан бирга, вентилли ўзгартиргичларининг ўткинчи ва турғун режимларини ҳисоблаш математик моделлари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш, энергия самарадорлигини ошириш, кириш ва чиқиш параметрларининг ўзгаришини ҳисобга олган ҳолда куч схемаларни яратиш, даврий кетма-кетлигига эга бўлган барча турдаги автоном инверторлар ва энергия ўзгартиргичлари учун қўллаш имкониятини берувчи юқори коммутация барқарорлигига эга вентилли ўзгартиргичининг схемасини ишлаб чиқиш билан боғлиқ илмий муаммолар етарли даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат техника университетининг илмий режасига мувофиқ ОТ-Ф2-62 “Микропроцессор бошқарувли автоматлаштирилган электр юритмалар асосида энергия тежамкор технологияларни ишлаб чиқиш ва яратиш ҳамда электр машиналар ва кабелли техниканинг энергетик самарадорлигини ошириш” (2017-2020) лойиҳаси доирасида бажарилган.

Тадқиқот мақсади даврий структурали вентилли ўзгартиргичларини ўткинчи ва турғун иш режимларини тадқиқ қилиш услубиётини яратиш ва юқори коммутацион мувозанатига эга бўлган вентилли ўзгартиргичнинг схемасини ишлаб чиқишдан иборат.

#### **Тадқиқот вазифалари:**

автоном инверторлар асосидаги даврий структурали вентилли ўзгартиргичларни ҳозирги ҳолатини ва моделлаштириш ҳамда ишлаб чиқиш истиқболларини таҳлил қилиш;

ҳар хил турдаги автоном инверторлар ва куч схемасининг структураси (топологияси) даврий кетма кетлигида ўзгарадиган энергия ўзгартиргичлари учун қўлланилишини таъминлайдиган даврий структурали вентилли ўзгартиргичларини моделлаштириш услубиётини яратиш;

инверторларни кириш тоқининг узлукли ва узлуксиз режимларида актив-индуктив ва двигател юкламаларида ишлайдиган вентилли ўзгартиргичларни ўткинчи ва турғун режимларини ҳисоблаш учун математик моделларини ва алгоритмларини яратиш;

коммутацион мувозанатини сақлаб қолган ҳолда чиқиш кучланиш қийматини барқарорлашини таъминлайдиган, ростлаш диапозонини ҳамда даврий структурали вентилли ўзгартиргичларини кучли схемасининг элементлари параметрларини аниқланишини таъминлайдиган инверторларнинг ишчи тавсифларини ишлаб чиқиш;

юқори коммутацион мувозанатига эга бўлган ток ва кучланиш автоном инверторлари асосидаги даврий структурали вентилли ўзгартиргич схемасини ишлаб чиқиш;

тадқиқот натижаларини даврий структурали вентилли ўзгартиргичларини лойиҳалаш жараёнида амалий қўллаш.



**Тадқиқот объекти сифатида саноат кабел ишлаб чиқариш корхоналари «NATIONAL HOLDINGS» МЧЖ ва «NAVOI CABLE CONNECTOR» ХК МЧЖ олинган.**

**Тадқиқот предмети ток автоном инверторлари асосидаги даврий структурали вентилли ўзгартиргичларининг статик ва динамик тавсифлари ташқил қилади.**

**Тадқиқот усуллари.** Тадқиқот Лаплас ўзгартирилиши асосидаги оператор усули, оний қийматлар усули ва гармоникаларнинг таркиблаш усулидан фойдаланилган. Компютерли таҳлилларни амалга оширишда назарий омилларни текшириш учун C++ тилидаги дастурий воситалар ва ишлаб чиқилган алгоритмларни қўллаш орқали рақамли ва аналитик усулларида фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:**

**даврий структурали вентилли ўзгартиргичларининг ишлаш режимларини тадқиқотлаш услубиёти бир ва уч фазали ток инверторларининг математик моделлари ва ҳисоблаш алгоритмлари асосида ишлаб чиқилган;**

**универсал операторли алмашинув схемаларини ишлаб чиқиш усули вентилли ўзгартиргичнинг нимсхемаларини эквивалентлаш асосида таклиф этилган;**

**бир ва уч фазали автоном инверторларининг ишчи тавсифлари юклама тури, бошқариш усули ҳамда кириш токининг шаклини ҳисобга олган ҳолда аниқланган;**

**даврий структурали вентилли ўзгартиргичларининг ўткинчи ва турғун режимларини ҳисоблаш алгоритмлари кириш кучланиши ва юклама қийматлари ўзгаришини ҳисобга олган ҳолда ишлаб чиқилган;**

**Лаплас ўзгартирилиши усулини такомиллаштириш асосида даврий структурали вентилли ўзгартиргичларининг элементларини техник кўрсаткичларини аниқлаш математик моделлари ишлаб чиқилган.**

**даврий структурали вентилли ўзгартиргич схемаси ток ва кучланиш автоном инверторларининг афзалликларини бирлаштириш асосида ишлаб чиқилган.**

**Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:**

**бир ва уч фазали ток автоном инверторларининг тури схемаларининг ток ва кучланишларнинг оний қийматларини ҳисоблаш учун рекурент аналитик ифодалар аниқланган;**

**аниқланган ишчи тавсифлар қуйидагиларни: силлиқловчи дросселнинг оптимал параметрларини, компенсация қурилмаси тиристорларининг самарали бошқариш бурчагини, чеклайдиган дросселнинг оптимал ўрнатилишини аниқлаш имкониятини бериб, лойихалаш жараёнини энгиллаштирган;**

**даврий структурали вентилли ўзгартиргичларининг математик моделлари вужудга келиши мумкин бўлган ўткинчи ва турғун режимларини инобатга олинган ҳолда ишлаб чиқилган;**

юклама талабига биноан ток автоном инверторидан кучланиш автоном инвертори режимига ёки тескарисига ўтишни автоматик равишда таъминлаб, авария вазиятлар пайдо бўлишининг олдини оладиган даврий структурали вентилли ўзгартиргичнинг схемаси ишлаб чиқилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги.** Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги олинган назарий, ҳисоблаш ва тажриба натижаларининг ўзаро мувофиқлиги, ҳисоблаш усуллари ва математик моделлардан тўғри фойдаланилганлиги ҳамда ҳисобий ва тажрибавий натижаларнинг ўзаро мос келиши билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.**

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти юкланишнинг турли хил режимларини амалга оширишда даврий структурали ва ўхшаш динамик хусусиятларга эга бўлган қурилмалар синфи сифатида автоном ток ва кучланиш инверторларини моделлаштириш услубиётини ишлаб чиқиш; автоном ток инвертори куч схемасининг бир неча ҳолатига эквивалент бўлган универсал алмашув схемаларни ишлаб чиқиш ҳисобига дастурий воситани яратиш учун талаб этилган хотира ҳажми ва унинг ҳисоблаш вақтини камайтириш имкониятини берувчи автоном ток инверторларининг математик моделларини ишлаб чиқиш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти ток автоном инверторидан кучланиш автоном инвертори режимига ёки аксинча кучланиш автоном инвертори режимидан ток автоном инвертори режимига автоматик равишда ўтиб, шу туфайли авария вазиятлар пайдо бўлишига йўл қўймайдиган юқори коммутацион кўрсаткичларга эга даврий структурали вентилли ўзгарткич схемасини ишлаб чиқиш; инверторларда ўтадиган физик жараёнларни юқори аниқлик билан етарли даражада намойиш этишга имконият берувчи алгоритмлар ва дастурларни яратиш; силлиқловчи дросселни оптимал параметрларини, компенсацион қурилманинг тиристорларини самарали бошқариш бурчагини, чекловчи дросселни оптимал жойлашишини аниқлашга имкон берадиган ишчи тавсифларини олиш, натижада ток автоном инверторини лойиҳалаш масаласи осонлаштирилиши билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларини жорий қилиниши.** Даврий структурали вентилли ўзгартиргичларини иш режимларини тадқиқ қилиш услубиётини ишлаб чиқиш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

симни чўзиш технологик жараёнини такомиллаштириш усули “National HOLDINGS” МЧЖ жорий қилинган («Ўзэлтехсаноат» уюшмасининг 2021 йил 30 декабрдаги №04-3/2828-сонли маълумотномаси). Натижада, мис чиқиндиларини 8% га камайтирилишига, қиммат ускуналар ишлаш муддатини (табiiий олмосдан ясалган филера) ўртача 5% га оширилишига, машина вақти 12% га узайтирилиб, 231150 000 (икки юз ўттиз бир миллион бир юз эллик минг) сўм умумий иқтисодий самарадорликка эришилган;

симни чўзиш технологик жараёнини такомиллаштириш усули «NAVOI CABLE CONNECTOR» ХК МЧЖ жорий қилинган («Ўзэлтехсаноат» уюшмасининг 2022 йил 16 июндаги №04-3/1455-сонли маълумотномаси).

Натижада, мис чикиндиларини 6% га камайтирилишига, қиммат ускуналарнинг ишлаш муддатини (табiiй олмадан ясалган филера) ўртача 4-5% га оширилишига, машина вақти 10% га узайтирилиб, 164380000 (бир юз олтимиш тўрт миллион уч юз саксон минг) сўм умумий иқтисодий самарадорликка эришилган;

Ўзгармас кучланишни ўзгарувчан кучланишга айлантирувчи ўзгартиргич учун Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигидан фойдали моделга патент олинган (№FAP 01895; 2022й.). Натижада ўзгартиргичнинг куч схемаси автоматик равишда алмашиши туфайли юқори коммутация мувозанатли инвертор яратилган.

Тадқиқот натижаларини апробацияси. Тадқиқотнинг натижалари 15 та халқаро ва 8 та республика илмий-амалий анжуман ва семинарларда муҳокамадан ўтган.

Тадқиқот натижаларини эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 66 та илмий иш чоп этилган, шулардан 1 та монография, 1 та дарслик, 1 та ўқув қўлланма, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фан доктори (DSc) диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий нашрларда 12 та мақолалар, жумладан 7 та республика ва 5 чет эл илмий журналларида ҳамда 7 та мақола Scopus маълумотлар базасига кирувчи тўпламларда нашр этилган, 1 патент ва 5 та ЭХМ учун дастур гувоҳномалари олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 176 бетдан иборат.

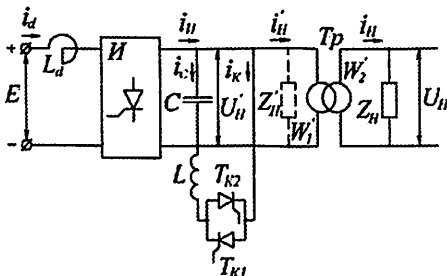
## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари асосланган, тадқиқотнинг объекти ва предмети ифодаланган, тадқиқотнинг республика фан ва техника тараққиётининг устувор йўналишларига мувофиқлиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти, тадқиқот натижаларини жорий этилиши, нашр этилган илмий ишлар ва диссертациянинг тузилиши очиб берилган.

"Автоном инверторларни моделлаштириш ва ишлаб чиқариш муаммоларининг ҳозирги ҳолати" деб номланган биринчи бобда вентиляр коммутация орасидаги интервалларда даврий структурага эга бўлган ўзгармас ва ўзгарувчан ток электр энергияси ўзгартиргичлари тузилишининг умумий тамойиллари кўриб чиқилган. Чет эл компаниялари томонидан ишлаб чиқарилган ток автоном инверторлари (ТАИ) техник хусусиятларининг қиссий таҳлили шуни кўрсатдики, ўрта ва юқори қувватли қурилмалар учун асосан кесувчи вентилли бўлган ток автоном инверторининг схемаси қўлланилади, чунки бошқа инверторлар билан таққослаганда кесувчи

вентилли ток автоном инвертори яхши динамик хусусиятларга ва паст частотали ҳудудда кенгайтирилган ростлаш диапазонига эга.

Ушбу бобда 1-расмда келтирилган схема бўйича тайёрланган бир фазали параллел ТАИ ишлашини таҳлил қилиш мисолидан фойдаланган ҳолда, чиқиш кучланишини барқарорлаштириш режимида ишлайдиган ушбу турдаги ўзгартиргичларни моделлаштириш тамойиллари ва босқичларини кетма-кетлиги кўриб чиқилган. Схемада стабилизация режими қарши-параллел уланган тиристор жуфтлиги (компенсацион қурилма) томонидан ҳосил қилинган салбий тескари алоқа туфайли амалга оширилади.



1-расм. Чиқиш кучланишини барқарорлаштириш режимида ишлайдиган бир фазали параллел ток автоном инверторнинг схемаси.

Шунингдек, бобда ТАИ асосидаги вентилли ўзгартиргичларининг математик моделларини ишлаб чиқиш усуллари бўйича олиб борилган тадқиқотлар шуни кўрсатадики, моделларни шартли равишда иккита асосий гуруҳга бўлиш мумкин: соддалаштирилган ва тўлиқ моделларга. Соддалаштирилган моделларни ишлаб чиқиш жараёнида кўпинча уларнинг ўткинчи ва турғун жараёнларнинг ҳақиқий шароитларига мувофиқлиги билан боғлиқ муаммолар юзага келиши кузатилади. Аниқ моделлар аниқ бўлса-да, улар дастурий восита сифатида амалга оширилганида жуда қатта ҳажмдаги хотира талаб қилишади. Шунинг учун ҳажми ва ҳисоблаш вақти камроқ бўлган юқори аниқликга эга бўлган тўлиқ моделларни ишлаб чиқиш амалий нуқтаи назардан тўғри бўлади.

Ушбу ишда тўлиқ моделни ишлаб чиқиш учун Лаплас ўзгартiriшларига асосланган оний қийматлар усули (оператор усули) қўлланилган, чунки бу усул вентилли занжирларда динамик жараёнларнинг ривожланишини тўлиқ ва аниқ акс эттиради. Классик шаклда оператор усулидан фойдаланиш ўткинчи ва турғун жараёнларни таҳлил қилиш учун мўлжалланган математик моделни ишлаб чиқиш учун қатта тайёргарлик процедуралари билан бир қаторда, натижада олинган модел сифатининг пасайишига олиб келади, жумладан, зарур бўлган хотира ҳажмининг ошишига, алгоритм мураккаблашишига ва ҳисоблаш тезлиги пасайишига. Ушбу камчиликлар, биринчи навбатда математик моделни ишлаб чиқишда ишлатиладиган эквивалент операторли алмашув схемаларининг сони кўплиги билан боғлиқ. Шу муносабат билан оператор усули асосида математик моделни тузишда кучли схеманинг бир нечта мумкин бўлган тузилмаларига эквивалент бўлган операторли алмашув схемаларидан (бундан кейин

универсал операторли алмашув схемалари деб аталади) фойдаланиш таклиф этилади. Бунинг учун аввал танланган бошқариш ва барқарорлаштириш усулига мувофиқ кучли схемаснинг мумкин бўлган тузилмалари аниқланади, сўнгра уларнинг операторли алмашув схемалари тузилади, шундан сўнг кучли схеманинг бир нечта мумкин бўлган тузилмаларига эквивалент бўлган универсал операторли алмашув схемалари ишлаб чиқилади.

Ишда аналитик ифодаларнинг таркибидаги коэффициентларга нисбатан функционал ажратиш амалга оширилади. Қиймати фақат кучли схеманинг параметрларига боғлиқ бўлиб, операторли алмашув схемаларининг тури ва вақтига боғлиқ бўлмаган коэффициентлар  $a_i$ ,  $N_i$  ва  $M_i$  харфлари билан белгиланган. Қиймати кучли схеманинг параметрларига ва операторли алмашув схема турига боғлиқ бўлган лекин вақтга боғлиқ бўлмаган коэффициентлар  $A_i$  ва  $B_i$  харфлари билан белгиланган. Қиймати кучли схеманинг параметрларига ва операторли алмашув схемаси ҳақиқий бўлган орилигидаги вақтига боғлиқ бўлган коэффициентлар  $K_i$  харфлари билан белгиланган. Шундай қилиб, вентилли ўзгарткичнинг битта вариантини ҳисоблашда биринчи турдаги  $a_i$ ,  $N_i$  ва  $M_i$  коэффициентлари бир марта ҳисобланади, чунки кейинги ҳисоблаш жараёнида уларнинг қийматлари ўзгармасдан қолади; иккинчи турдаги  $A_i$  ва  $B_i$  коэффициентлари фақат кучли схеманинг тузилиши ўзгарганда, яъни ушбу янги иштирок этадиган операторли алмашув схема учун ҳисоблаш жараёни бошланганида унинг учун янги мустақил бошланғич шартларни ҳисобга олган ҳолда; учинчи турдаги  $K_i$  коэффициентлари, шунингдек керакли ток ва кучланишларнинг қийматлари вақт ўзгаришига биноан ҳисобланади. Шу муносабат билан айтиш мумкинки, коэффициентларни функционал ажратиш амали бир хил коэффициентларни ҳисоблашнинг такрорланишини бартараф этиб, шу билан умумий моделнинг ҳажмини камайтиради ва тез ишлашини таъминлайди. Универсал операторли алмашув схемалари асосида математик моделларни ишлаб чиқишда қуйидаги умумий соддалаштиришлар қабул қилинган: вентиλλар идеал тавсифли, уларнинг коммутацияси ўта тез, қувват трансформаторининг магнитланиш токи нолга тенг.

Квазитурғун режимда вентиλλарни уланиш-узилишларининг мунтазамлиги туфайли ҳар доим такрорланувчанлик орилигини ажратиш мумкин бўлади. ТАИ ларда бу орилик бир, икки, уч ёки ундан ортиқ босқичларни ўз ичига олади, уларнинг алмаштириш схемалари ва аниқ ички боғланишлари билан тавсифланади. Ушбу боғланишлар схеманинг такрорийлик интэрвалларининг давомийлиги, электрон параметрларига ва унинг олдинги ҳолатига боғлиқлиги шаклида акс этади. Шу маънода, АИТ ҳақида даврий тузилишга ега чизикли бўлмаган вентилли занжирларининг одатий вақиллари сифатида гапириш мумкин.

Юқорида келтирилган инверторлардаги электромагнит жараёнларнинг сифатли таҳлили уларни такрорлаш орилигидаги босқичлар сони бўйича уч гуруҳга ажратилишига мумкин бўлади.

Биринчи гуруҳга такрорланувчанлик оралиғида бир босқичга эга бўлган ва шу босқичга мос келувчи алмаштириш схемаси билан инверторлар киради. Бу гуруҳга параллел, параллел кетма-кет ва кетма-кет параллел инверторлар киради.

Иккинчи гуруҳга такрорланувчанлик оралиғида икки босқичга эга бўлган ва шу икки босқичга мос келувчи иккита алмаштириш схемали инверторлар киради. Кўриб чиқилаётган инверторлардан бу гуруҳга кетма-кет инверторлар ва тиристорлардаги  $di/dt$  кескин ошишини чегаралаш учун кўшимча индуктивликли параллел инверторлар киради.

Учинчи гуруҳга уч ёки ундан ортиқ босқичга ега бўлган барча инверторлар киради. Бу кесувчи вентилли инверторлар, коммутацияси икки босқичли ва қарама-қарши уланган бошқарилувчи вентилли дросселли компенсатор (КҚ) ли ТАИ лар.

Ушбу ишда келтирилган тадқиқот методологиясидан электромагнит жараёнларни параллел, параллел кетма-кет, кетма-кет параллел, кетма-кет, шунингдек кесувчи вентилли ва коммутацияси икки босқичли инверторларни таҳлил қилиш учун фойдаланиш мумкин.

Ишда ўрганилган вентилли ўзгартиргичлар (ВЎ) схемаларининг математик моделларини ишлаб чиқиш қуйидаги кетма-кетликда амалга оширилади:

а) танланган кўзғалиш ва стабилизация усули билан амалга ошириладиган алмаштириш схемаларининг мумкин бўлган турлари тўплами аниқланади;

б) универсал алмаштириш схемалари тузилади, ҳисоблаш учун зарур бўлган ток ва кучланишларнинг тасвирлари ва асллари аниқланади;

в) жараён ривожланишининг мумкин бўлган йўллари таҳлил қилинади ва алмаштириш схемаларининг турларини интервалларида ўзгартириш кетма-кетликлари аниқланади, жараён ривожланиш босқичларини ўзгаришнинг чегаравий шартлари тузилади;

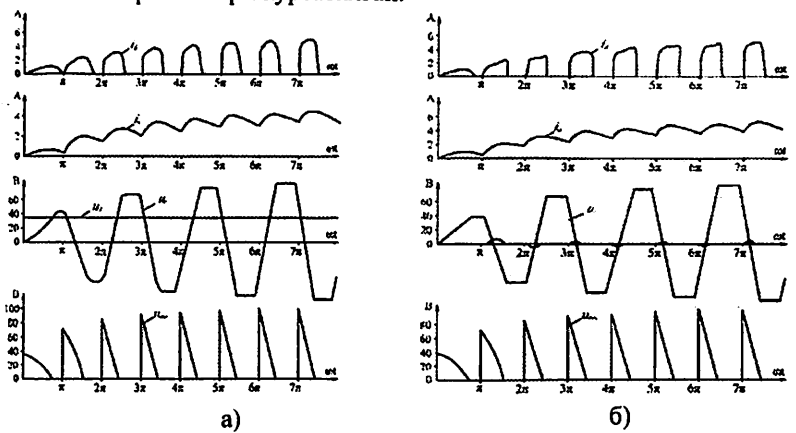
д) танланган кўзғалиш ва ростлаш усулини ҳисобга олган ҳолда чегара шартларининг бажарилишини қидириш асосида ўткинчи жараённи ҳисоблаш алгоритмининг блок-схемаси тузилади.

"Ўзгармас ток таъминот манбаси режимларида ишлайдиган вентилли ўзгарткичларининг ўткинчи жараёнларини тадқиқот методикаси" деб номланувчи иккинчи бобда трансформатор орқали кетма-кет уланган бир фазали кетма-кет ТАИ ва тўғрилагичдан иборат топган стабиллашган ўзгармас ток таъминот манбаларидаги ўткинчи жараёнларини тадқиқот қилиш методикаси тавсифланган. Юклама сифатида (алмаштириш схемаси қарши э.ю.к. ва актив қаршиликдан иборат) статик истеъмолчи, ўзгармас ток мотори ёки электрон лампа бўлиши мумкин. Чиқиш кучланишини ростлаш (стабилизациялаш) икки йўл билан амалга оширилиши мумкин: тиристорларига етказиб бериладиган импульсларнинг частотасини ўзгартириб ёки коммутация конденсаторига параллел равишда уланган КҚ ёрдамида бошқариш орқали. Электромагнит жараёнларни таҳлил қилиш шуни

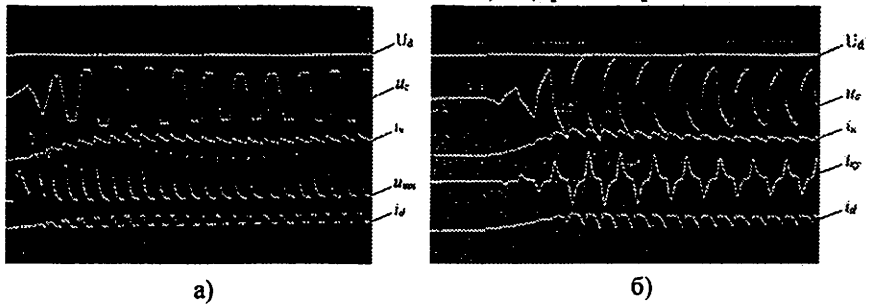
кўрсатдики, қабул қилинган ростлаш усулига қараб, частотали бошқаришда ўткинчи жараёнларини ривожланишида учта ОАС ва КҚ ёрдамида бошқаришда эса бешта ОАС иштирок етиши мумкин. Ҳар бир ОАС учун коэффицентларни функционал ажратиш билан керакли ток ва кучланишнинг тегишли рекуррент ифодалари топилган.

Ушбу бобда олинган ток ва кучланишнинг оний қийматлари учун ифодалар частотани бошқариш ва КҚ ёрдамида кетма-кет АИТ асосидаги ВЎ да ўткинчи жараёнларини ҳисоблаш алгоритмларининг асоси бўлиб, ўткинчи жараёнида иштирок этадиган схеманинг тузилмаларига эквивалент бўлган ОАС мавжудлиги ва кетма-кетлигини ҳисобга олган ҳолда ишлаб чиқилган.

Ишлаб чиқилган алгоритмлар ва дастурларга асосланиб, юқоридаги иккала ростлаш усули учун кетма-кет ТАИ асосидаги ВЎ-нинг ишга тушириш пайтида бир қатор ўткинчи жараёнларининг графикалари олинган. 2 ва 3-расмларда ВЎ ишга туширишдаги ток ва кучланишнинг вақт диаграммалари ва осциллограммалари кўрсатилган.



2-расм. Кетма-кет ТАИ асосидаги ВЎ ишга туширишнинг вақт диаграммалари: а) частотали ростлаш; б) КҚ ёрдамида ростлаш



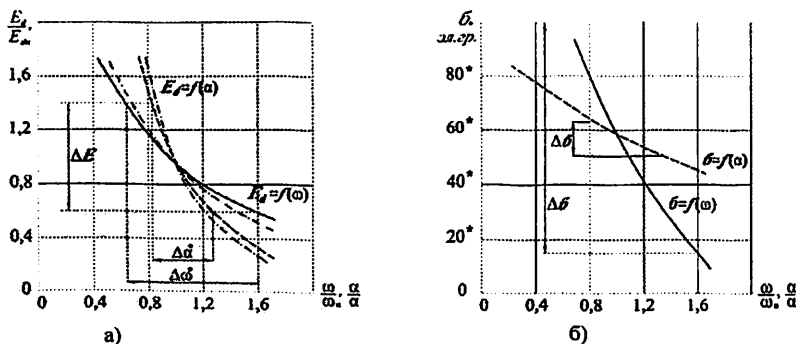
3-расм. Кетма-кет ТАИ асосидаги ВЎ ишга туширишнинг осциллограммалари: а) частотали ростлаш; б) КҚ ёрдамида ростлаш

Ҳисобий ва тажрибавий натижаларининг тоқ ва кучланишнинг ўртача ва жорий қийматларига қараб оғиши 6-8 фойздан ошмади. Олинган натижаларнинг ўзаро мос келиши ишлаб чиқилган алгоритмлар ва дастурларнинг тўғрилигини баҳолашга имкон беради.

Шунингдек, бобда кетма-кет ТАИ асосидаги ВЎ иккала рoстлаш усули учун ўзгартиргичнинг ишчи тавсифлари аниқланган. 4-расмда кириш кучланиши  $E_d$  номинал  $E_{dном}$  нисбатан ўзгарганда олинган  $E_d^* = f(\omega^*)$  ва  $E_d^* = f(\alpha^*)$  ишчи тавсифлар кўрсатилган. Ушбу расмдан кўришиб турибдики,  $E_d + 40\%$  оралиғида ўзгарганда стабилизация режимини сақлаб туриш учун  $\alpha_{нач}$  нисбатан  $\alpha$  ни  $0.85 \div 1.3$  оралиғида,  $\omega_{ном}$  га нисбатан эса  $\omega$  ни  $0.65 \div 1.6$  оралиғида ўзгартириш керак, яъни частотани ўзгартириш билан стабилизация режимини сақлаб туриш учун рoсташ параметрни (частотани) кенг доирада ўзгартириш керак.

Берилган  $\omega^*$ ,  $\alpha^*$  қийматларини ўзгарганида ўзгартиргични коммутацион мувозанатини сақлаб қолиб барқарорлигини таъминлайдиган тикланиш бурчаги  $\delta$  қийматини аниқлаш учун қўлланиладиган  $\delta = f(\alpha)$  ва  $\delta = f(\omega)$  ишчи тавсифлари 4, б расмда кўрсатилган. Ушбу ишчи тавсифлардан кўришиб турибди  $E_d$  қиймати бир хил ўзгарганида ( $E_{dном}$  нисбатан 40%), тикланиш бурчаги  $\delta$  қиймати частотали рoстлашда  $\Delta\delta = 86$  эл. градусда ўзгариб тикланиш бурчагининг критик қийматига  $\delta_{min} = 14$  эл. градусга яқинлашиб қолади, ҳолбуки КҚ ёрдамида рoстлашда эса  $\alpha$  бурчаги фақат 10 эл. градусга ўзгариб тикланиш бурчагининг қиймати  $\delta_{min} = 53$  эл. градус бўлади.

Шу ҳолат бўйича айтиш мумкинки, КҚ орқали рoстланадиган ВЎ частота билан рoстланадиган ВЎ қараганда яхшироқ рoстлаш ва коммутацион хусусиятларига эга. Чунки частота билан рoстлаш усули қўлланганлигида номиналга нисбатан мумкин бўлган частота ўзгаришини катта диапазонда таъминлаш зарурати коммутация хусусиятларининг ёмонлашишига ва ўзгартиргичнинг элементларининг ўрнатилган қувватини ортиқча кўпайтиришга олиб келади.

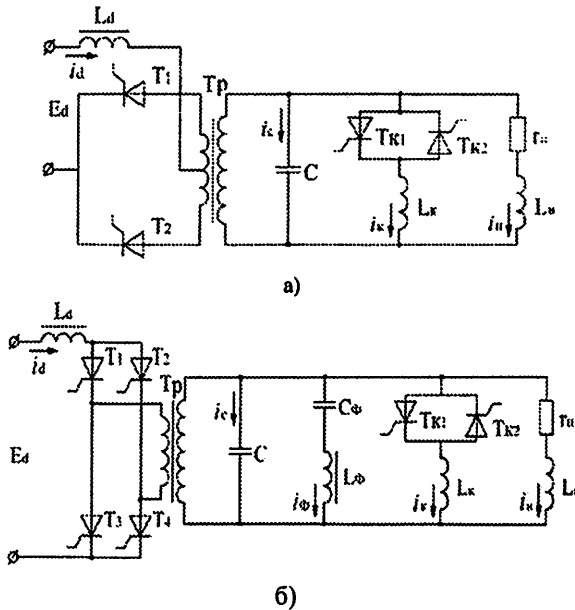


4-расм. Кетма-кет ТАИ асосидаги ВЎ ишчи тавсифлари,  $P=const$ :  
 а)  $E_d^* = f(\alpha^*)$ ;  $E_d^* = f(\omega^*)$ ; б)  $\delta = f(\alpha^*)$ ;  $\delta = f(\omega^*)$



Олинган ишчи тавсифлар ВЎ коммутация мувозанати сақланган ҳолда чиқиш кучланишининг қийматини барқарорлаштиришни таъминлайдиган бошқарув диапазонининг қийматини аниқлашга имкон беради ва шу билан ВЎ нинг оптимал параметрларини топишга ёрдам беради.

"Ўзгарувчан ток таъминот манбаси режимларида ишлайдиган вентилли ўзгарткичларининг ўткинчи жараёнларини тадқиқот методикаси" деб номланувчи учинчи боб ВЎ чиқиш кучланишини барқарорлаштириш режимларида ишлайдиган ТАИ даги ўткинчи жараёнларини таҳлил қилишга бағишланган. Тадқиқот учун турли хил схемалар ва стабилизация усулларидан, чиқиш кучланишини ростланадиган индуктивлик  $L_k$  шаклидаги компенсацион қурилмаси (КҚ) бўлган бир фазали ТАИ танланган (5-расм). Таҳлил қилиш ўзгарткичнинг схемасида ўзгарувчан филтри мавжудлиги ёки мавжуд бўлмаган ҳолатлар, шунингдек ТАИ нинг кириш токининг узлуксиз ва узлукли режимларида КҚ ишлаб турган ёки ишламаган ҳолатлари учун амалга оширилган.



5-расм. Компенсацион қурилмали параллел бир фазали ТАИ асосидаги ВЎ схемалари: а) ярим кўприкли; б) кўприкли

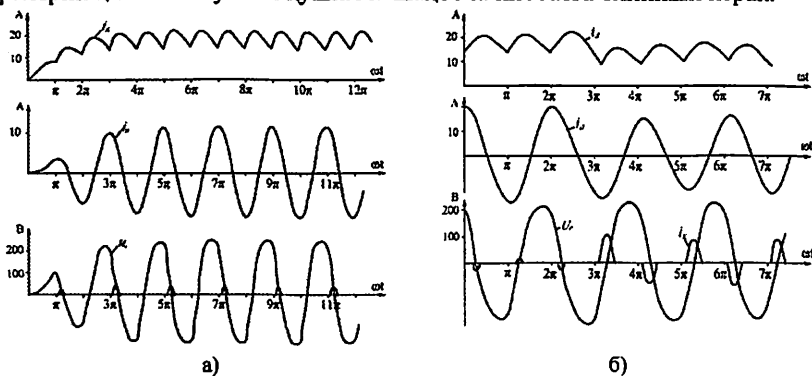
КҚ ли ТАИ ни узлуксиз кириш токида ВЎ нинг чиқиш кучланишини ростлаш КҚ бошқариш бурчаги -  $\alpha$  қийматини ўзгартириш орқали амалга оширилганида ишга тушириш пайтидан то турғун режимга қадар электромагнит жараёнларни ривожланишида олтига операторли алмашинув схема (ОАС) иштирок этиши мумкинлигини кўрсатди. Ушбу олтига ОАСни

КҚ нинг иккита ишчи ҳолати билан бир-биридан фарқ қиладиган универсал ОАС га келтирилди. Ҳар бир универсал ОАС учун Кирхгоф қонунларига мувофиқ керакли ток ва кучланишлар учун тузилган тенгламалар ечилиб уларнинг Лаплас усули бўйича тасвирлар ва кейин ажратиш теоремасига мувофиқ қуйидаги шаклга эга бўлган аслари топилади:

$$\begin{aligned} i_d(t) &= E_d/r_1 + (B_2/D_1)\exp(-b_2t) + A_1K_1 + B_1K_2 ; \\ i_H(t) &= E_d/r_1 + (B_4/D_2)\exp(-b_2t) + A_3K_3 + B_3K_4 ; \\ u_c(t) &= r_H E_d/r_1 + (B_4/D_1)\exp(-b_2t) + A_3K_1 + B_3K_2 . \end{aligned} \quad (1)$$

Шундай йўл билан иккинчи универсал ОАС учун ҳам ток ва кучланишнинг аслари топилган.

Бобда ВЎ нинг юкламаси параллел ва кетма-кет уланган  $r_H$  ва  $L_H$  учун ҳисоблаш формулалари топилган. Шунингдек КҚ ли ва  $L$ ,  $C$  филтрли параллел ТАИ нинг математик модели ҳам ишлаб чиқилди. Ўткинчи жараёнларни ривожланишда иштирок этадиган кучли схеманинг барча конфигурацияларида кетма-кет уланган  $r_H$  ва  $L_H$  филтрни акс этувчи қўшимча шаҳобча пайдо бўлади. Шунинг учун ВЎ схемасидаги (КҚ ли ва  $L$ ,  $C$  филтрли параллел ТАИ) ўткинчи жараёнларни тадқиқотлаш худди аввалги ВЎ (КҚ ли параллел ТАИ) схемасида бўлгани каби КҚ нинг ишчи ҳолатига боғлиқ бўлган иккита универсал ОАС асосида амалга оширилиши мумкин, аммо бунда филтрни ҳисобга олувчин қўшимча шаҳобча инобатга олиниши керак.



6-расм. ВЎ ишга туширишнинг вақт диаграммалари: а) ишга тушириш; б) юклама ўзгарганида

Ишлаб чиқилган алгоритмлар ва математик моделларга ва дастурларга асосланиб, бир фазали параллел ТАИ асосидаги ВЎ-нинг ишга тушириш пайти учун бир қатор ўткинчи жараёнларининг графикалари олинган. 6-расмда КҚ ли ТАИ асосидаги ВЎ ишга туширишдаги ҳамда юкланма ўзгарганидаги ток ва кучланишнинг вақт диаграммалари ва осциллограммалари кўрсатилган.

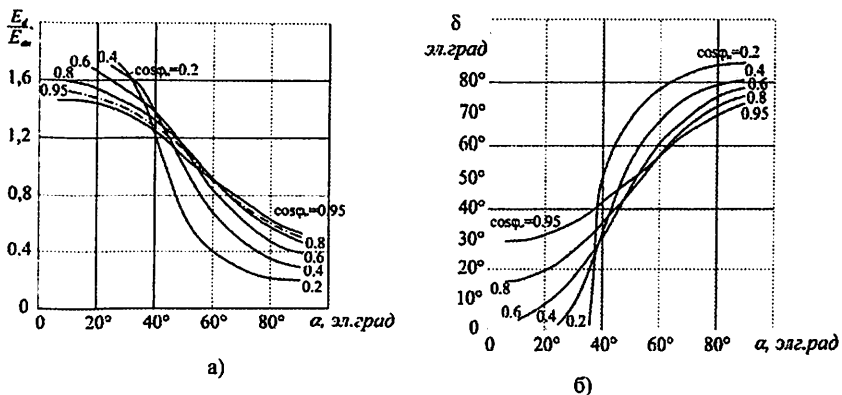
Компютер тажрибаларининг натижалари шуни кўрсатдики, инверторни мустақил қўзғалиш усулида стабилизация жараёни узоқроқ давом этади ва

юклама ўзгарганидан кейин биринчи ярим даврда юкламадаги кучланишининг амплитудаси ошиши комбинацияланган қўзғалиш усулига қараганда катта бўлади. Бу инверторнинг комбинацияланган қўзғалиш усули билан динамик мувозанати юқорилиги ҳақида гапиришга имкон беради.

Шунингдек, бобда КҚ ли параллел ТАИ асосидаги ВЎнинг ишчи тавсифлари олинган. Чикиш кучланиши қийматининг стабиллашуви  $E_{dном}$ ,  $Z_{ном}$  алоҳидаги ўзгариши ёки уларнинг бир вақтда ўзгарган ҳолатда КҚ тиристорларининг очилиш бурчаги -  $\alpha$  ни ўзгартириш орқали амалга оширилган. 6-расмда турли  $\cos \varphi_n$  олинган ишчи тавсифлар кўрсатилган.

7, а –расмда келтирилган  $E_d = f(\alpha)$  тавсифлардан фойдаланиб  $E_d$  нинг берилган ўзгариши билан  $U_{вых}$  чиқиш кучланишининг стабиллашишини таъминлайдиган  $\alpha$  – бурчагининг қийматини аниқлаш мумкин. 7, б –расмда келтирилган тавсифлардан фойдаланиб  $E_d$  нинг ўзгариши доирасида  $U_{вых}$  чикиш кучланишининг стабиллашишини таъминлайдиган ва ВЎ мувозанатини сақлаб турилишини таъминлайдиган  $\alpha$  – бурчагининг ростлаш диапазонини аниқлаш мумкин.

Олинган тавсифларга кўра  $\cos \varphi_n$  қиймати камайиши билан ВЎ нинг ростлаш ва коммутацион тавсифлари ёмонлашишини кўриш мумкин, шунинг учун  $\cos \varphi_n = 0,2$  учун  $\alpha$  бурчакнинг чегаравий қиймати  $\delta > 0$  ўзгариши 35 эл. градусдан кам бўла олмайди, ваҳоланки  $\cos \varphi_n = 0,95$  бўлганида эса, коммутация мувозанатининг шarti  $\alpha$  ростлаш бурчагининг бошланғич қийматларида ҳам бажарилади.



7-расм. Параллел ТАИ ва КҚ асосидаги ВЎнинг ишчи тавсифлари  $U_{вых}=const$ ,  $Z_n=const$ ,  $E_d=varia$ : а)  $E_d=f_1(\alpha)$ ; б)  $\delta=f_2(\alpha)$

Шунингдек,  $E_d$  кириш кучланишининг қиймати ўзгармас бўлганида ва юкланма параметрларининг ўзгарганида турли хил  $\cos \varphi_n$  учун олинган ишчи тавсифлар  $U_{вых}$  чиқиш кучланишининг стабиллашишини таъминлайдиган ва ВЎ мувозанатини сақлаб турилишини таъминлайдиган  $\alpha$  – бурчагининг қийматларини аниқлаш имкониятини беради.

Юқорида келтирилган кўрсаткичлардан ташқари, ушбу дастур ёрдамида коммутация конденсаторининг реактив қуввати  $Q_c$ , компенсация курилмасининг реактив қуввати  $Q_{ку}$ , ўзгартиргичнинг умумий реактив қуввати  $Q_{\delta}$  ҳамда криш токининг ўртача қиймати  $I_d$  каби бошқа ВЎ нинг кўрсаткичларини ҳисоблаш мумкин.

Инверторларнинг асосий энергетик параметрларидан бири бўлган чиқиш кучланишининг шаклининг носинусоидаллик даражаси бўлганлиги туфайли бобда параллел ток автоном инвертори ва кесувчи вентилли ток автоном инверторларнинг чиқиш кучланиши  $u_n$  ва чиқиш токи  $i_n$  ларнинг ҳисоблаб курилган тавсифларининг шакллари тадқиқоти ўтказилган.

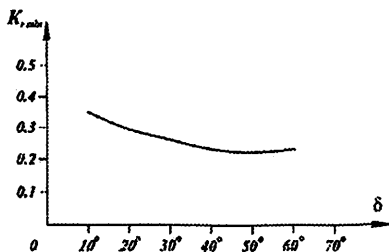
ток автоном инвертори ва кесувчи вентилли ток автоном инверторларнинг  $u_n$  ва  $i_n$  лари гармоникаларининг таҳлили қуйидагиларни кўрсатди:

- қанчалик коммутация конденсаторининг сиғимининг қиймати кичик бўлса, шунчалик параллел ток автоном инверторига нисбатан кесувчи вентилли ток автоном инверторининг гармоникалар коэффиценти ( $K_2$ ) ёмонроқ бўлади;

- коммутация конденсаторининг сиғимининг катта қийматларида параллел ток автоном инвертори ва кесувчи вентилли ток автоном инверторларнинг гармоникалар коэффиценти ( $K_2$ ) қиймати деярли бир хил бўлади;

- $\cos\varphi_n$  катталашган сари  $i_n$  ва  $u_n$  тавсифларининг шакллари синусоидадан анча фарқ қилади.

Силликловчи дросселнинг индуктивлигини инверторнинг кўрсаткичларига таъсирини аниқлаш учун 8-расмда кўрсатилган тикланиш бурчаги  $\delta = f(L_d^*)$  тавсифи олинди.



8-расм.  $K_{e\ min} = f(\delta)$  тавсифининг графика

Ўтказилган таҳлиллар қуйидагиларни кўрсатди: бир фазали параллел инверторда катта қийматлардан бошлаб  $L_d$  индуктивлигини камайтириш инвертор чиқиш токининг гармоникаларини камайтиради. Бундай камайиш  $\delta$  бурчагининг катта қийматларида таъсирли бўлиб кичикларида эса таъсирсиз. Юқори гармоникаларнинг минимал қийматга эришилиши номинал юкланишда узликсиз режимининг чегарасидаги  $L_d$  индуктивлигининг

қийматларида бўлади. Бундан кейинги  $L_d$  камайиши инвертор чиқиш токининг шакли ёмонлашишига олиб келади.

Бобда ишлаб чиқилган математик моделлар битта дастур бўйича инверторнинг иккала кучли (кўприк ёки нол чиқишли) схемаларини ҳам тадқиқотлашни таъминлайди, чунки модел асосидаги рекуррент ифодалар ва шунга мос равишда унинг дастурий таъминоти кучли ) схеманинг турига боғлиқ бўлмаган ҳолда олинган.

"Автоном ток инвертерларининг турғун режимларини тадқиқотлаш услубиёти" деб номланган тўртинчи бобда икки турдаги юкламали статик ва моторли (асинхрон мотор) даврий тузилишга эга вентилли ўзгарткичларнинг турғун режимларини таҳлил қилиш услубиётини ишлаб чиқиш натижалари қуйидаги истиқболли уч фазали ток инвертерлари мисолида: параллел, параллел-кетма-кет, кетма-кет-параллел, кетма-кет, кесувчи вентилли инвертор ва икки босқичли коммутацияли инверторлар кўриб чиқилган. Бундан ташқари, индуктивликларни тиристорлардаги  $di/dt$  чеклаш имкониятлари (параллел ток автоном инвертори мисолида) инверторнинг асосий кўрсаткичларига таъсири баҳоланди.

Электромагнит жараёнларни таҳлил қилишда  $i_L(p)$  ва  $u_C(p)$  тоқлар ва кучланишларининг тасвирларидан уларнинг асллари  $i_L(t)$  ва  $u_C(t)$  топилади, бунинг учун чегара шартларини ҳисобга олган ҳолда ҳар бир босқичда чегара тоқлари ва кучланишларининг қийматини аниқлаш учун тенгламалар тизими тузилади. Бундан кейин, уч фазали вентилли ўзгарткичда ўтадиган жараёнларнинг симметриялиги ва такрорланиши асосида ишлаб чиқилган мувофиқлик матрицасидан фойдаланиб, чиқиш кучланишининг бутун даври учун тоқлар ва кучланишлар учун ифодалар топилади.

Белгиланган кетма-кетликни бажаришда ҳар бир гуруҳ инверторларининг такрорланувчанлик оралиғида электромагнит жараёнлар ўтишининг характери тенгламалар тизимининг турига ҳал қилувчи таъсир кўрсатади. Шундай қилиб, инерциал миқдорларнинг чегара қийматларини топиш учун биринчи гуруҳ инвертерларини таҳлил қилганда, биз қуйидаги алгебраик тенгламалари тизимини топамиз:

$$\begin{aligned} f(I_i, U_j, \pi/m\omega) &= 0; \\ i &= 1 \dots k, j = 1 \dots n, \end{aligned} \quad (2)$$

бу ерда  $k$  -индуктивликлар сони;

$n$  -босқичнинг алмаштирув схемасидаги сизимлар сони;

$m$  -фазалар сони;

$\pi/m\omega$  -такрорийлик интервалининг давомийлиги.

Тенгламалар тизими (2) чизикли бўлиб, у такрорланувчанлик оралиғида битта алмаштириш схемаси (битта босқич) бўлган ҳар қандай вентилли ўзгарткич учун ҳосдир.

Такрорлаш оралиғида икки босқич мавжуд бўлган иккинчи гуруҳ инверторларидаги электромагнит жараёнларни таҳлил қилганда, қуйидаги шаклдаги тенгламалар тизимини оламиз:

$$\begin{aligned} f_1(I_{нач.i}, U_{нач.j}, I_{\tau}, \tau) &= 0; \\ f_2(I_{кон.i}, U_{кон.j}, I_{\tau}, U_{\tau}, [(n/m\omega) - \tau]) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Бу ерда биринчи тенглама  $\tau$  интервалнинг давомийлиги билан биринчи босқич учун, иккинчиси эса давомийлиги  $[(n/m\omega) - \tau]$  тенг бўлган иккинчи босқич учун бўлади.

Тенгламадан  $f_1$  ўзгарувчилар қийматларини  $f_2$  га алмаштириб ва  $I_{нач.i} = I_{сп.i}, U_{нач.к} = U_{кон.i} = U_{сп.j}$  тенглигини ҳисобга олиб ночизиқли тенгламалар тизимини оламиз:  $f(I_{сп.i}, U_{сп.i}, \tau) = 0$ ,

(4) бунда босқичдан иккинчисига ўтиш моментини белгилаб берувчи параметр  $\tau$  бу тизимга билвосита киради, яъни уни трансцендент қилади. Тенглама (4) трансцендентлик  $\tau$  бўйича экспоненциал ёки тригонометрик функциялар кўринишидаги коэффициентларнинг мавжудлиги билан белгиланади.

Учинчи гуруҳ инверторларидаги электромагнит жараёнларни таҳлил қилишда биз қуйидаги тенгламалар тизимини оламиз:

$$\begin{aligned} f_1(I_{нач.i}, U_{нач.j}, I_{\tau 1}, U_{\tau 1}, \tau_1) &= 0; \\ f_2(I_{\tau 1}, U_{\tau 1}, I_{\tau 2}, U_{\tau 2}, \tau_2) &= 0; \\ f_3\{I_{\tau 2}, U_{\tau 2}, I_{кон.i}, U_{кон.j}, [(n/m\omega) - \tau_1 - \tau_2]\} &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Гаусснинг алмаштириш усули орқали, қуйидагиларни инobatта олиб

$$\begin{aligned} I_{нач.i} &= I_{кон.i} = I_{сп.i}; \\ U_{нач.j} &= U_{кон.j} = U_{сп.j}, \end{aligned}$$

чизиқли бўлмаган тенгламани оламиз:

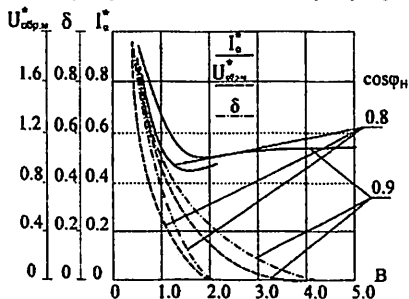
$$f(I_{сп.i}, U_{сп.j}, \tau_1, \tau_2) = 0, \quad (6)$$

$i, j$  параметрларининг юқоридаги каби бир хил маъноси билан. Ушбу тизимда иккита параметр  $\tau_1$  ва  $\tau_2$  билвосита кирган бўлади. Бу асосан такрорланадиган интервалда учта босқичнинг мавжудлиги ва шунга мос равишда биринчи босқичдан иккинчисига ва иккинчисидан учинчисига ўтиш билан боғлиқ бўлган иккита вақт  $\tau_1$  ва  $\tau_2$  моменти мавжудлиги билан боғлиқ.

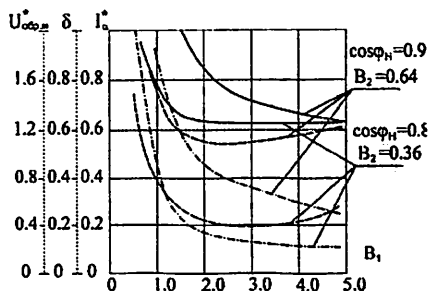
Турли (3) ва (5) шаклдаги тизимларни ўрганиш бу моҳиятан ночизиқли бўлган тизимларда минимал ночизиқли тизимни аниқлаш имкониятини вужудлигини кўрсатди. Минимал ночизиқли тизимдаги тенгламалар сони такрорланувчанлик интервалидаги босқичлар сонидан биттага кам бўлганлиги ва тенгламаларнинг ҳар бири тўла ( $\vec{r}$ ) вектори бўйича трансцендент эканлиги кўрсатилган. Олинган трансцендент тизимни ечишда итерация усули ишлатилган.

Ишлаб чиқилган услубга кўра ТАИ гуруҳларининг турғун режимини ҳисоблаб юкланиш даражасига  $B = x_{c1}/Z_{н1}$  қараб силликловчи индуктивлиги  $L_d^* = L_d/L_n$  турли қийматлари учун қуйидаги ишчи тавсифлар олинган: бекитувчи кучланишининг максимал қиймати  $U_{обр.max}^* = U_{обр.max}/E_d$ , тиристорларнинг бекилиш вақти  $\delta = \omega\tau_b$  ва манбанинг токи  $I_d^* = I_d Z_n/E_d$ . Турли ТАИ схемалари учун олинган ишчи тавсифларнинг баъзилари 9-12 расмларда келтирилган.

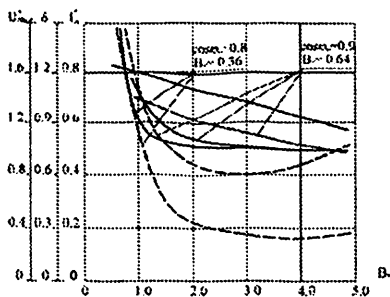
Олинган тавсифларнинг таҳлил қилиш бир хил гуруҳга мансуб инверторларнинг ишчи тавсифлари ўзаро ўхшашлигини тасдиқлайди



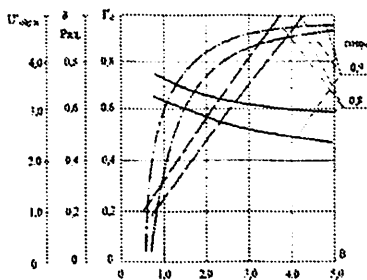
9-расм. Параллел ТАИ ишчи тавсифлари



10-расм. Параллел-кетма кет ТАИ ишчи тавсифлари



11-расм. Кетма кет- параллел ТАИ ишчи тавсифлари



12-расм. Кетма кет ТАИ ишчи тавсифлари

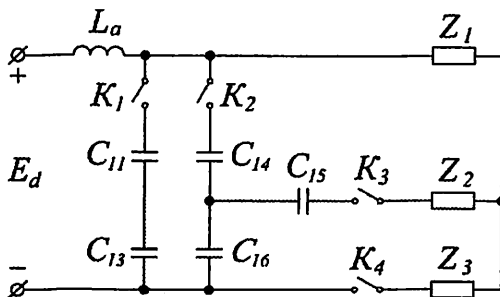
"Автоном ток инверторларининг ўткинчи режимларини тадқиқотлаш услугиёти" деб номланган бешинчи бобда уч фазали автоном ток инверторларида ўткинчи режимларида кечаётган электромагнит жараёнларини таҳлил қилиш натижалари келтирилган.

Ҳисоблашнинг бошида усул инерциал қийматларнинг бошланғич миқдорларининг берилишини талаб қилади; кейинчалик ОАС тури ўзгартирганда кейингисини ҳисоблашда бошланғич қийматлар сифатида олдинги турдаги инерциал миқдорларининг охириги қийматлари ишлатилади.

Уч фазали инверторларининг схемаларида, фазалардаги топологик симметрия тўғрисида, бир хил алмаштириш схемаси ҳақиқий бўлади ва турли хил рақамларга эга бўлган очилган венти́ллارнинг бир хил комбинацияси билан жараёнларни таҳлил қилиш учун ишлатилиши мумкин. Шунинг учун операторли алмаштириш схемалари очилган венти́ллар рақамларининг маълум комбинациялари учун тузилади ва жараённи барча фазалар, яъни схеманинг барча элементлари учун керакли босқичда ҳисоблаш учун

ишлатилади. Бобда дастурлаш ва ҳисоблаш амалини осонлаштириш учун мослаштириш матричасидан фойдаланиш таклиф этилади, уни қўллаб ОАСларнинг такрорланиш кетма-кетлиги интерваллар қийматини ҳисоблашда ҳам фойдаланиш мумкин. Бундан ташқари, такрорланиш орилигида юкланишнинг турли фазаларидаги кечаётган жараёнларни уч фазали тизимнинг хусусиятларига биноан қўйиладиган белгилар ва ишораларнинг ўзгаришларини ҳисобга олган ҳолда бир хил ифодалар билан тавсифланиши мумкин.

Бобда ушбу матрицадан фойдаланиб, қуйидаги уч фазали ТАИ ларда кечаётган ўткинчи режимларини ҳисоблаш учун математик моделлар ишлаб чиқилди: параллел, параллел-кетма-кет, кетма-кет-параллел, кетма-кет, кесувчи вентилли инвертор ва икки босқичли коммутацияли инверторлар кўриб чиқилган. Кесувчи вентилли инверторнинг математик модели ҳажмини камайтириш учун ТАИ нинг умумий алмаштириш схемасидан (13-расм) фойдаланилди, ундан ( $K_1=K_4$  калитларнинг ёқилган ҳолатига қараб) ўткинчи жараёнда алмаштириш схемаларининг мумкин бўлган барча вариантларини аниқлаш мумкин.



13-расм. КВ ли ТАИ нинг умумий алмаштириш схемаси

Кучли схеманинг муайян тузилиши учун ҳақиқий бўлган алмашинув операторли схемани олиш учун кучли схемада ёпилиши керак бўлган калитларни кўрсатган ҳолда I дан VIII гача бўлган алмашинув операторли схеманининг мумкин бўлган вариантлари қуйида I-жадвалда келтирилган.

Жадвал I

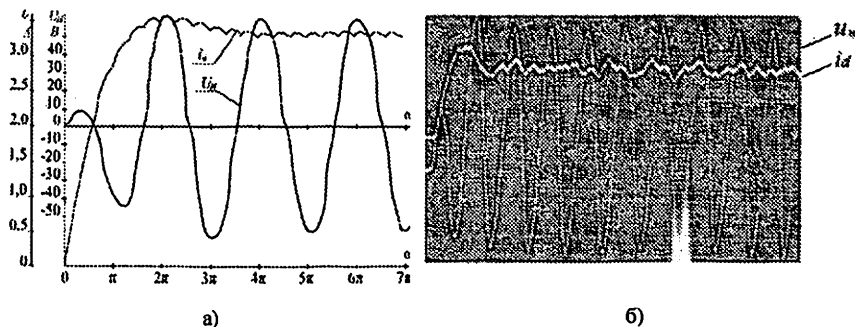
КВ ли ТАИ мумкин бўлган алмаштириш схемаларининг вариантлари

АОС тури	Уланадиган калитлар	АОС тури	Уланадиган калитлар
I	$K_3$	V	$K_1, K_4$
II	$K_3, K_4$	VI	$K_2, K_3, K_4$
III	$K_4$	VII	$K_1, K_2, K_4$
IV	$K_2, K_3$	VIII	$K_1, K_3, K_4$



13-расмда келтирилган кесувчи вентилли ток автоном инверторларнинг умумий схемасидаги ўзгартиргичнинг бошқариш усулига биноан кучли схемаси тузилишларининг алмашиш ҳолати тиристорлар  $T_1$  и  $T_2$  жуфтлигининг очилган ҳолатига мос келади. Қўриб чиқиладиган алмаштириш схемаларининг турлари ўткинчи жараёнда бошқа тиристорлар жуфтлигида ва бошқа ишлаб турган диодлар ҳолда ҳам пайдо бўлади. Бирок, алмаштириш схемасининг тури бундан ўзгармайди ва бу мослаштириш матрицасидан фойдаланиб ва очилган тиристорлар жуфтлиги номерини билиб, фақат кўрсатилган алмаштириш схемаларининг саккиз тури ёрдамида ўткинчи жараёни ҳисоблаш имконини беради. Юқоридаги барча ТАИ учун операторли алмаштириш схемаларининг мавжудлиги учун ҳақиқий бўлган чегара шартларини бажарилишига асосланган ўткинчи жараёни ҳисоблаш алгоритмлари ишлаб чиқилган.

Ҳисоблаш натижалари асосида тадқиқ қилиналиётган уч фазали параллел ток автоном инверторининг ток ва кучланишларининг оний қийматларининг тавсифлари қурилади. Мисол сифатида уч фазали параллел АИТ ўткинчи жараёни  $r_n=10$  Ом;  $L_d=0,1$  Гн;  $L_n=0,011$  Гн;  $C=80$  мкФ;  $f=125$  Гц ва  $E_d=100$  В учун  $i_d(\omega t)$  ва  $i_n(\omega t)$  ҳисобланган тавсифлари ва осциллограммалари куйида 14-расмда кўрсатилган. Ўткинчи режимларда уч фазали параллел ток автоном инверторнинг тоқлари ва кучланишларининг ҳисобланган тавсифлари ва осциллограммалари билан яхши мос келиши (5-8%) автоном ток инвертерларида ўткинчи режимларини таҳлил қилиш учун тақлиф қилинган услубни тўғрилигини тасдиқлайди



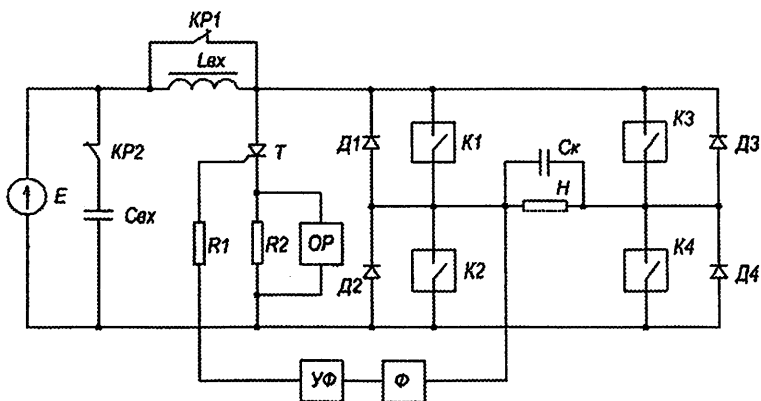
14-расм. Уч фазали параллел ТАИ нинг ўткинчи жараёнини тоқлари ва кучланишларининг оний қийматларининг тавсифлари (а) ва осциллограммалари (б)

Шунингдек, бобда автоном инверторлари асосидаги ўзгарувчан структурали вентилли ўзгарткичнинг янги схемасини ишлаб чиқиш натижалари келтирилган, бу схема ўзгарткични ток инвертери ёки кучланиш инвертери сифатида ишлаш имкониятини беради.

Схемани ишлаб чиқиш аввалдан маълум бўлган бир фазали ток автоном инвертори ва кучланиш автоном инвертори асосида янги инверторнинг

структура схемасини яратишдан иборат бўлиб (15-расм), у юкламанинг талабига биноан инвертор элементларини автоматик равишда алмаштиришни амалга ошириб, ток автоном инвертори режимдан кучланиш автоном инвертори режимига ёки аксинча ўтишни таъминлайди. Бундай ўтиш ток таъминот манбасини автоматик равишда кучланиш манбайига ўтганда ёки аксинча бўлганида яъни  $\phi$  бурчакнинг ишораси хар бир ўзгариши билан амалга оширилиши мумкин бўлади. Юкламага параллел уланган  $\phi$  бурчак ишорасини аниқлайдиган қурилма билан синхрон равишда ишлайдиган ва манбаларнинг асосий элементларига киритилган реле контактлари ёрдамида схема ўзгариши амалга оширилади.

Қурилмада техник натижага инверторнинг элементлари ток автоном инвертори режимдан кучланиш автоном инвертори режимига ёки тескарсига автоматик равишда ўтишини таъминлаш имкониятига эгаллиги туфайли ва шу билан ток инвертери ёки кучланиш инвертери сифатида ишлаши ҳамда кириш токининг қиймати нолга тушиши яъни салт режимига тушиши ёки  $i_u$  токини  $i_n$  кучланишидан фаза бўйича орқада қолиши билан содир бўлиши мумкин бўлган авария вазиятлари олдини олишдан иборат.



15-расм. Ўзгарткичнинг тузилиш схемаси

Ток автоном инвертори ҳолати учун юкланишнинг умумий импеданси индуктив характерга ўзгариши бу авария режимига мос келади, уни олдини олиш учта усулда амалга ошириш мумкин: ток автоном инверторини фавқулдда ўчириш; юкланиш билан параллел равишда қўшимча сиғимни улаш; ток автоном инверторини кучланиш автоном инвертори режимига ўтказиш, яъни схеманинг киришига паралл  $C_x$ , сиғимни улаб бир вақтнинг ўзида  $L_x$  кириш индуктивлигини ўчириш.

Схемада ток автоном инвертори режимдан кучланиш автоном инвертори режимига ўтказиш таъминланади ва шу орқали вужудга келиши мумкин бўлган авария вазиятларини олдини олиш таъминланиб, кейинги ўринларда қурилма кучланиш автоном инвертори режимда ишлай бошлайди.

## ХУЛОСА

1. Даврий структурали вентилли ўзгартиргичларининг таҳлил қилиш ва моделлаштириш, уларни қуйдаги хусусиятларга кўра: вентиллари коммутациясининг умумий тамойиллари; такрорланиш оралигида эквивалент схемалар сони; энергияни айлантириш режимлари (ток ёки кучланиш) махсус синфларга бўлиб амалга ошириш мақсадга мувофиқлиги аниқланди

2. Турли хил ток автоном инверторлари, кучланиш автоном инверторлари ва автоном резонанс инверторларининг схемалари учун, такрорланиш оралигидаги алмашув схемалари бир-биридан фақат тегишли ўзгарувчиларнинг коэффитциентлари билан фарқ қилувчи чизиқли дифференциал ифодалар билан белгиланади. Кўриб чиқилган ток инверторларининг гуруҳларидаги ушбу тенгламаларнинг коэффицентлари ток автоном инвертори иш режимларининг сифат кўрсаткичларига таъсир қилувчи асосий омиллар эканлиги кўрсатилган.

3. Ўткинчи режимларда ток автоном инверторлари кўрсаткичларини ҳисоблаш учун моделлар ва дастурларда манба ва юкланиш ўртасидаги, вентиллари коммутация моментларидаги ҳамда инверторларнинг фазалари ўртасидаги энергияни қайта тақсимланиш жараёнларини ҳисобга олиш уларни бир хил такрорланиш оралигида тургун жараёнларидан алоҳида кўриб чиқишни талаб қилиши кўрсатилган.

4. Универсал операторли алмашув схемаларини қўллаш ёрдамида инверторнинг рекуррент ифодаларидаги мустақил ўзгарувчилар ва коэффицентлар сонини камайтириш имконият берувчи даврий структурали вентилли ўзгартиргичларининг тургун ва ўткинчи жараёнларини моделлаштириш услубиёти ишлаб чиқилди

5. Уч фазали ток автоном инверторларининг уч гуруҳини вентиллари коммутация аломатлари ҳамда уларда таҳлил қилинган операторли алмашув схемалари сони билан актив-индуктив ва моторли юклама учун таҳлил қилиш ўтказилди. Бир ва икки босқичли коммутацияли ўрганилган ток автоном инверторлари гуруҳларининг коммутация мувозанатини баҳолашга имконият берадиган бир ва уч фазали ток автоном инверторларининг ишчи тавсифлари ишлаб чиқилди

6. Стабиллашган ток манбалари режимларида ишлайдиган турли хил ток автоном инверторларининг схемалари учун ишлаб чиқилган математик моделлар, тузилган алгоритмлар ва дастурлар бўйича рақамли тажрибалар ўтказилди. Дастурлар ва алгоритмларни ишлаб чиқиш натижалари Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлига қошидаги Интеллектуал мулк агентлиги томонидан берилган ЭҲМ дастурларининг давлат реестрида рўйхатдан ўтказилганлиги тўғрисида бешта гувоҳнома (DGU) билан тасдиқланди.

7. Компютерли тажрибаларнинг натижалари реал объектлардаги синовдан ўтказиш натижалари билан тасдиқланади. Экспериментал ва ҳисоблашда олинган ток ва кучланишларнинг оний қийматларининг тавсифлари яхши ўзаро мослигини (4-6%) кўрсатди ва ишлаб чиқилган алгоритмлар ва дастурларининг ишончилиги тасдиқланди

8. Коммутациянинг бузилиши билан боғлиқ бўлган авария ҳолатларини пайдо бўлишини бартараф этилишини таъминлайдиган ток автоном инвертори режимдан кучланиш автоном инвертори режимга ёки тескари ўтишни автоматик равишда таъминлайдиган ўзгармас кучланишни ўзгарувчан кучланишга айлантирувчи ўзгартиргич учун Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигидан фойдали моделга патент олинган (№FAP 01895; 2022й.). Натижада ўзгартиргичнинг куч схемаси автоматик равишда алмашиши туфайли юқори коммутация мувозанатли инвертор яратилган.

9. Тадқиқот натижалари «NATIONAL HOLDINGS» МЧЖ ва «NAVOI CABLE CONNECTOR» ХК МЧЖ кабел ишлаб чиқариш корхоналарига жорий этилган бўлиб, умумий йиллик иқтисодий самарадорлик 395 530 000 (уч юз тўқсон беш миллион беш юз ўттиз минг) сўмни ташкил этди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.Т.03.03 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ  
ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА  
ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТЕ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

**УМАРОВ ШУХРАТ БАДРЕДДИНОВИЧ**

**МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ  
СТРУКТУРОЙ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ  
ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА (DSc)  
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

**Ташкент – 2022 г.**



## ВВЕДЕНИЕ (Аннотация докторской (DSc) диссертации)

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире особое внимание уделено решению задач по разработке силовой полупроводниковой преобразовательной техники на основе преобразователей тока, имеющих широкое применение в различных промышленных сферах, их рациональному использованию с высокой точностью поддержания энергетических параметров, повышению эксплуатационной надежности и увеличению длительности срока службы. В настоящее время в развитых странах «...более 60% вырабатываемой электроэнергии проходит через полупроводниковые преобразователи. При использовании систем силовой электроники до мирового уровня можно будет сэкономить 12-15% вырабатываемой электроэнергии»<sup>4</sup>. В связи с этим особое внимание уделяется повышению энергоэффективности вентильных преобразователей на основе преобразователей тока различного назначения, предназначенных для обеспечения требуемого режима питания энергетических объектов с повышенными требованиями к качеству потребляемой энергии и надежности энергоресурсов.

В мире проводятся научные исследования по повышению энергоэффективности различных приборов силовой электроники, совершенствованию их технических характеристик, по созданию эффективных математических моделей и программных средств моделирования и проектирования вентильных преобразователей, обеспечивающих энергоэффективную и устойчивую их работу во всех возможных режимах работы. В этом направлении необходимо проводить ряд исследований, которые считаются приоритетными, в том числе по разработке вентильных преобразователей на основе автономных инверторов для питания различных ответственных потребителей с минимальными отклонениями выходных параметров в различных режимах работы. При этом одной из актуальных задач является создание методов, алгоритмов и программ, справедливых для различных способов управления, видов нагрузки и характера входного тока инвертора, позволяющие определить параметры элементов силовой схемы, обеспечивающие высокие коэффициенты коммутационной устойчивости и стабилизации, а также высокие технико-экономические характеристики вентильных преобразователей.

В республике проводятся масштабные работы по разработке, усовершенствованию и внедрению новых полупроводниковых преобразователей для технологических процессов в целях снижения энергоемкости экономики к 2030 году в полтора раза. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы определены задачи «...принять меры по повышению до 2026 года на 20 процентов энергоэффективности экономики, широкому внедрению в производство энергосберегающих

---

<sup>4</sup><https://www.electronics.ru/journal/article/68.pdf>

технологий, реализуемых по целевым параметрам снижения энергоемкости в отраслях экономики»<sup>5</sup>. При решении этих проблем приоритетное значение придается исследованиям, направленным на разработку и внедрение полупроводниковых преобразователей, обеспечивающих повышенные требования к качеству и надежности потребляемой энергии наряду со снижением энергоемкости производственных процессов, а также разработке точных и рациональных методов анализа различных режимов работы. Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-3238 от 23 августа 2017 года «О мерах по дальнейшему внедрению современных энергоэффективных и энергосберегающих технологий», № ПП-4249 от 27 марта 2019 года «О стратегии дальнейшего развития и реформирования электроэнергетической отрасли Республики Узбекистан», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в этой сфере.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022 — 2026 годы», Постановлениях Президента Республики Узбекистан № № ПП 2692 от 22 декабря 2016 года «О дополнительных мерах по ускоренному обновлению физически изношенного и морально устаревшего оборудования, а также сокращению производственных затрат предприятий отраслей промышленности», ПП-3238 от 23 августа 2017 года «О мерах по дальнейшему внедрению современных энергоэффективных и энергосберегающих технологий», № ПП-4249 от 27 марта 2019 года «О стратегии дальнейшего развития и реформирования электроэнергетической отрасли Республики Узбекистан», № ПП-4422 от 22 августа 2019 года «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности 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.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики: II. «Энергетика, энерго - и ресурсосбережение».

#### **Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации.**<sup>6</sup>

Научные исследования по повышению энергетической эффективности и внедрению в производство новых технологических процессов проводятся во многих научных центрах и высших образовательных учреждениях мира, как: Massachusetts Institute of Technology; University of Texas at Austin (США);

---

<sup>5</sup>Указ Президента Республики Узбекистан № УП - 60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы»

<sup>6</sup>Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации выполнен на основе <https://www.twirpx.com>, <http://cyberleninka.ru>, [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net), <https://uc.cleq.org>, <http://www.sci-hab.la>, [www.dissercat.com](http://www.dissercat.com), <http://elibrary.ru> и других источников.



Institute of Electrical and Electronical Engineeres (США); Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского (АО «ЭНИН», Россия); ОАО «Научно-исследовательский институт энергетики» (Россия); НПП «ЭОС» (Украина); Hefei University of Technology (Китай); Aalborg University (Дания); University of Cambridge (Англия); TU Dortmund University (Германия); Siemens AG (Германия); Toshiba (Япония); Ташкентский государственный технический университет (Узбекистан) и других.

В результате проведённых научных исследований в области эффективной разработки вентильных преобразователей с периодической структурой, имеющих высокие технико-экономические характеристики получены следующие важные научные результаты: исследованы методы моделирования сложных нелинейных цепей с вентилями (Institute of Electrical and Electronical Engineeres, США; Aalborg University, Дания; Hefei University of Technology, Китай), разработаны схемы преобразователей с улучшенными технико-экономическими характеристиками (Научно-исследовательский институт энергетики, Россия; НПП «ЭОС», Украина; University of Electronic Science and Technology, Китай), разработаны вентильные преобразователи высокой мощности (Rockwell Automation, АКШ; Allen Bradley, Канада; Imvar, Англия), разработаны преобразователи частоты для электроприводов различного назначения (Mitsubishi, Япония; Триол, Россия; Ross Hill, США; Relience Elektric, Германия), разработаны преобразователи частоты на основе автономных инверторов для промышленных предприятий (Ташкентский государственный технический университет, Институт энергетических проблем, Узбекистан).

В мире основными направлениями научно-исследовательских работ, выполняемых по повышению эффективности преобразования электрической энергии с помощью вентильных преобразователей на промышленных предприятиях, можно привести следующие: совершенствование методов анализа переходных и установившихся режимов работы вентильных преобразователей, повышение точности поддержания энергетических параметров преобразуемой электрической энергии, а также обеспечение эксплуатационной надёжности и продолжительности срока службы.

**Степень изученности проблемы.** При решении научных задач, связанных с разработкой теории и практики энергоэффективных статических преобразователей внесли большой вклад ряд зарубежных учёных, в частности: В. Bedford, Р. Нoft, W. McMurgey, Н.Д. Папалекси, И.М. Чиженко, И.Л. Каганов, В.А. Лабунцов, Н.Н. Щедрин, О.А. Маевский, Ю. Г. Толстов, А.А. Булгаков, Т.А. Глазенко, Ю.К. Розанов, Г.С. Зиновьев, В.Е. Тонкаль, Ю.С. Забродин, Д.Н. Томашевский и др.

Для решения научных задач по разработке методов исследований преобразователей энергии, а также повышению эффективности преобразования электрической энергии посвящены многочисленные исследования отечественных ученых, таких как, Х.Ф. Фазылов, М.З. Хамудханов, Б.У.Умаров, К.Р. Аллаев, Р.А. Захидов, Т.Х. Насыров, Т.С.

Камалов, А.А. Хашимов, Н. Х. Базаров, М.И. Ибадуллаев, Р.А. Сытдыков, Н.М. Арипова, Ф.А. Хошимов, Х.Б. Сапаев, М.К. Бобожанов, О.Х. Ишназаров, Н.Б. Пирматова, О.З. Тоиров и др. В результате проведенных научных исследований получены значительные научно-практические решения задач по повышению эффективности использования преобразователей энергии на промышленных предприятиях.

Несмотря на значительные успехи, научные проблемы, которые требуют решения сложных и достаточно трудоемких теоретических и практических задач, связанных с разработкой методологии исследования различных режимов работы вентилярных преобразователей ориентированных на повышение их энергетической эффективности изучены недостаточно. В данной диссертации при разработке методологии исследований режимов работы вентилярных преобразователей с периодической структурой, предложены: разработка методологии моделирования, математических моделей и алгоритмов для расчета переходных и установившихся режимов обеспечивающая возможность их применения для всех разновидностей автономных инверторов и преобразователей энергии с периодической последовательностью смены структуры силовой схемы с учетом характера изменения входных и выходных параметров преобразователя и на их основе разработана схема вентилярного преобразователя с высокой коммутационной устойчивостью.

**Связь диссертационного исследования с планами научно – исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Ташкентского государственного технического университета № ОТ-Ф2-62 по теме «Разработка и создание энергосберегающей технологии на базе автоматизированных электроприводов с микропроцессорным управлением и повышение энергетической эффективности электрических машин и кабельной техники» (2017-2020 гг.),

**Целью исследования** является разработка методологии исследований переходных и установившихся режимов работы вентилярных преобразователей с периодической структурой и разработка схемы вентилярного преобразователя с высокой коммутационной устойчивостью.

**Задачи исследования:**

исследование и анализ современного состояния и перспектив разработки и моделирования вентилярных преобразователей с периодической структурой на основе автономных инверторов;

разработка методологии моделирования вентилярных преобразователей с периодической структурой, которая обеспечивает возможность её применения для всех разновидностей автономных инверторов и преобразователей энергии с периодической последовательностью смены структуры (топологии) силовой схемы;

разработка математических моделей и алгоритмов для расчета переходных и установившихся режимов работы вентиляльных преобразователей при их работе на активно-индуктивную и двигательную нагрузку в режимах непрерывных и прерывистых входных токов инверторов;

получение режимных характеристик инверторов, позволяющих определить параметры элементов силовой схемы вентиляльных преобразователей с периодической структурой, а также диапазон регулирования, обеспечивающий стабилизацию выходного напряжения с сохранением его коммутационной устойчивости;

разработка вентиляльных преобразователей с периодической структурой на основе автономных инверторов тока и напряжения с высокой коммутационной устойчивостью;

практическая реализация результатов исследования при проектировании вентиляльных преобразователей с периодической структурой.

Объектом исследования являются промышленные кабельные предприятия: ООО «NATIONAL HOLDINGS» (г. Ташкент) и ИП ООО «NAVOI CABLE CONNECTOR» (г. Навои).

Предметом исследования являются статические и динамические характеристики вентиляльных преобразователей с периодической структурой на базе автономных инверторов тока.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач исследования использовались операторный метод на основе преобразования Лапласа, методы мгновенных значений и гармонических составляющих. При машинных анализах использовались численные и аналитические методы проверки теоретических положений с использованием программных пакетов на языке C++ и разработанных алгоритмов.

**Научная новизна исследования заключается в следующем:**

разработана методология исследований режимов работы вентиляльных преобразователей с периодической структурой на основе математических моделей и алгоритмов одно и трехфазных автономных инверторов тока;

разработан способ разработки универсальных операторных схем замещения, эквивалентных нескольким состояниям подсхем силовой схемы;

получены режимные характеристики одно и трехфазных автономных инверторов тока, разработанные с учетом вида нагрузки, способа управления и формы входного тока инверторов;

разработаны алгоритмы и программы для расчета переходных и установившихся режимов вентиляльных преобразователей с периодической структурой, учитывающие изменение величины входного напряжения и параметров нагрузки;

разработаны математические модели на основе усовершенствования преобразования Лапласа для определения технических характеристик элементов вентиляльных преобразователей с периодической структурой

разработана схема вентильного преобразователя с периодической структурой на основе объединения преимуществ автономных инверторов тока и напряжения.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

получены рекуррентные аналитические соотношения для расчета мгновенных значений токов и напряжений различных схем однофазных и трехфазных автономных инверторов;

полученные режимные характеристики позволяют определить оптимальные параметры сглаживающего дросселя, эффективный угол регулирования тиристорov компенсирующего устройства, оптимальное расположение ограничивающего дросселя, которые в совокупности облегчают процедуру проектирования;

математические модели вентильных преобразователей с периодической структурой разработаны с учетом возможных видов переходных и установившихся режимов;

разработана схема вентильного преобразователя с периодической структурой, позволяющая обеспечить по требованию нагрузки автоматическое переключение от режима автономного инвертора тока к режиму автономного инвертора напряжения или наоборот и исключаящая возникновение аварийных ситуаций.

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность полученных результатов исследований подтверждаются адекватностью теоретических, расчетных и экспериментальных результатов, корректным использованием расчетных методов и математических моделей, проверкой теоретических положений на промышленных установках.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость полученных результатов исследований характеризуется разработкой методологии моделирования автономных инверторов тока и напряжения как класса устройств с периодической структурой и едиными динамическими свойствами при реализации различных режимов нагрузки; разработкой математических моделей автономных инверторов тока, позволяющих уменьшить их программную реализацию по требуемому объему и расчетному времени за счет применения универсальных схем замещения, эквивалентных нескольким состояниям силовой схемы автономных инверторов тока.

Практическая значимость полученных результатов работы заключается в разработке схемы вентильного преобразователя с периодической структурой имеющей высокие динамические показатели за счет автоматического переключения от режима автономного инвертора тока к режиму автономного инвертора напряжения или наоборот, предотвращая тем самым возникновение аварийных ситуаций; создании алгоритмов и программ, позволяющих с высокой точностью адекватно отображать физические процессы; получении режимных характеристик, позволяющих определить оптимальные параметры сглаживающего дросселя, эффективный угол регулирования тиристорov

компенсирующего устройства, оптимальное расположение ограничивающего дросселя, что в итоге облегчает задачу проектирования автономного инвертора тока.

**Внедрение результатов исследования.** На основе полученных научных результатов по разработке методологии исследований режимов работы вентилярных преобразователей с периодической структурой:

за счет внедрения способа модернизации волочения проволоки на предприятии кабельного производства ООО «NATIONAL HOLDINGS» (Справка Ассоциации «Uzeltexsanoat» от 30 декабря 2021 года, №04-3/2828) достигнуто снижение уровня отходов меди на 8%, увеличение срока службы дорогостоящего оборудования – фильер из натурального алмаза в среднем на 5%, продлено машинное время на 12%, что в совокупности дало суммарный экономический эффект на сумму 231 150 000 (двести тридцать один миллион сто пятьдесят тысяч) сум;

за счет внедрения способа модернизации волочения проволоки на предприятии кабельного производства ИП ООО «NAVOI CABLE CONNECTOR» (Справка Ассоциации «Uzeltexsanoat» от 16 июня 2022 года, №04-3/1455) достигнуто снижение уровня отходов меди на 6%, увеличение срока службы дорогостоящего оборудования – фильер из натурального алмаза в среднем на 4-5%, продлено машинное время на 10%, что в совокупности дало суммарный экономический эффект на сумму 164 380 000 (сто шестьдесят четыре миллиона триста восемьдесят тысяч) сум;

получен патент на полезную модель Агенства по интеллектуальной собственности при Министерстве юстиции Республики Узбекистан на преобразователь постоянного напряжения в переменное (FAP 01895; 2022 г.), в результате разработана схема инвертора, имеющая повышенную коммутационную устойчивость за счет автоматического переключения силовой схемы.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследования докладывались и обсуждались на 23 научно – технических конференциях, в том числе на 15 международных и 8 республиканских конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано всего 66 научных работ. Из них 1 монография, 1 учебник, 1 учебное пособие, 18 научных статей, в том числе 7 - в республиканских и 6 – в зарубежных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций (DSc), кроме того, опубликовано 7 статей в журналах и сборниках базы данных Scopus, получены 1 патент и 5 Свидетельств на программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, приложений. Объем диссертации составляет 176 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновываются актуальность и востребованность темы диссертации, цели и задачи исследования, характеризуется объект и предмет, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, излагаются научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрываются научная и практическая значимость полученных результатов, внедрение в практику результатов исследования, результаты апробации работы, сведения по опубликованным научным работам и структуре диссертации.

В первой главе «Современное состояние проблем моделирования и разработки автономных инверторов» описаны общие принципы построения вентильных преобразователей электрической энергии постоянного и переменного тока, обладающие периодической структурой в интервалах между коммутациями вентилей. Сравнительный анализ технических характеристик АИТ выпускаемых иностранными фирмами показал, что для установок средней и большой мощности в основном используется схема АИТ с отсекающими вентилями (ОВ), так как по сравнению с другими классами инверторов АИТ с ОВ обладают лучшими динамическими свойствами и расширенным диапазоном регулирования в области низких частот.

В главе на примере анализа работы однофазного АИТ, выполненного по схеме (рис.1), работающего в режиме стабилизации выходного напряжения рассмотрены принципы и последовательность этапов моделирования преобразователей этого типа. Режим стабилизации в схеме осуществляется за счет отрицательной обратной связи, образованной встречно - параллельно включенной тиристорной парой (компенсирующее устройство – КУ).

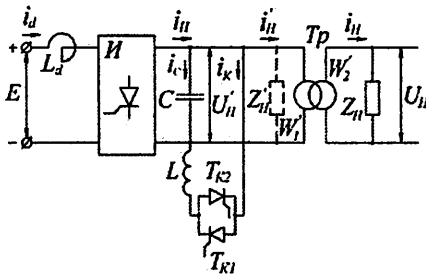


Рис.1. Схема однофазного тиристорного АИТ, работающая в режиме стабилизации напряжения на нагрузке.

Проведенное в главе исследование методов разработки математических моделей вентильных преобразователей на основе АИТ показывает, что модели условно могут быть подразделены на две основные группы: упрощающие и точные модели. При разработке упрощенных моделей зачастую возникает проблема, связанная с её адекватностью реальным условиям переходных и установившихся процессов. Полные модели хотя и являются точными, но они

вместе с этим при программной реализации являются и наиболее затратными. Поэтому с практической точки зрения имеет смысл разработка точных моделей уменьшенными объемом и временем счета.

В работе для построения полной модели используется метод мгновенных значений на основе преобразования Лапласа (операторный метод), который наиболее полно и точно отражает развитие динамических процессов в вентильных цепях. Применение операторного метода для анализа переходных и установившихся процессов в классической форме приводит наряду с большими подготовительными процедурами при разработке математической модели еще и к ухудшению качества полученной модели: увеличению объема требуемой памяти, сложности алгоритма и низкой скорости расчетов. Эти недостатки связаны, в первую очередь с большим количеством используемых эквивалентных операторных схем замещения (ОСЗ) при разработке математической модели. В связи с этим, в работе при составлении математической модели на основе операторного метода предлагается использование таких схем замещения (называемых далее универсальными схемами замещения), которые эквивалентны нескольким возможным структурам силовой схемы. Для этого вначале определяются возможные структуры силовой схемы при выбранном способе возбуждения и стабилизации, затем составляются их операторные схемы замещения, после чего разрабатываются универсальные схемы замещения эквивалентные нескольким возможным структурам силовой схемы.

В работе произведено функциональное разделение коэффициентов, входящих в формулы. Коэффициенты, величина которых зависит только от параметров силовой схемы и не зависит от вида и времени существования ОСЗ обозначены буквами  $a_i$ ,  $N_i$  и  $M_i$ . Коэффициенты, величина которых зависит от параметров силовой схемы и от вида ОСЗ, но не зависит от времени т.е. не меняется в течение интервала существования данной ОСЗ, обозначены буквами  $A_i$  и  $B_i$ . Коэффициенты, величина которых зависит и от параметров силовой схемы, и от вида расчётного времени данный ОСЗ обозначены буквами  $K_i$ . Таким образом, при расчёте одного варианта ВП коэффициенты первого вида  $a_i$ ,  $N_i$  и  $M_i$  рассчитываются один раз, так как в дальнейшем их значения сохраняется неизменным; коэффициенты второго вида  $A_i$  и  $B_i$  рассчитываются только лишь при изменении структуры силовой схемы т.е. в начале расчёта по вновь участвующей ОСЗ с учетом новых независимых начальных условий для данной ОСЗ; коэффициенты третьего вида  $K_i$  также как и искомые токи и напряжения рассчитываются по мере изменения расчетного времени. В связи с этим можно сказать, что функциональное разделение коэффициентов исключает дублированность расчета одних и тех же коэффициентов, уменьшает тем самым избыточность общей модели и обеспечивает ее быстродействие. При разработке математических моделей с универсальными ОСЗ были приняты следующие общепринятые допущения: вентили идеальные, коммутация их мгновенная, намагничивающий ток силового трансформатора равен нулю.

В силу регулярности переключений вентиляей в квазиустановившемся режиме всегда можно выделить интервал повторяемости. В типовых АИТ этот интервал содержит один, два, три и более этапов, характеризующихся своими схемами замещения и явно выраженной внутренней обратной связью. Эти связи отражаются в виде зависимости длительности интервалов повторяемости от параметров схемы и её предыдущего состояния. В этом смысле можно говорить об АИТ, как о типичных представителях нелинейных вентиляных цепей с периодической структурой.

Качественный анализ электромагнитных процессов в указанных выше инверторах позволил свести их по количеству этапов на интервале повторяемости в три группы.

В первую группу отнесены инверторы, у которых на интервале повторяемости имеет место один этап с соответствующей этому этапу схемой замещения. К этой группе относятся параллельный, параллельно последовательный и последовательно параллельный инверторы.

Во вторую группу можно отнести инверторы, у которых на интервале повторяемости имеют место два этапа с соответствующими каждому этапу эквивалентными схемами замещения. Из рассматриваемых инверторов к этой группе относятся последовательные инверторы и параллельные инверторы с дополнительными индуктивностями для ограничения  $di/dt$  тиристором.

В третью группу сведены все инверторы с тремя и более этапами. Это инверторы с отсекающими вентилями, с двухступенчатой коммутацией и АИТ с КУ.

Представленная в работе методология исследования может быть использована для анализа электромагнитных процессов в параллельном, параллельно последовательном, последовательно параллельном, последовательном, а также в инверторах с отсекающими вентилями и с двухступенчатой коммутацией.

Разработка математических моделей исследуемых схем ВП в работе производится в следующей последовательности:

- а) определяется множество возможных типов схем замещения, имеющих место при выбранном способе возбуждения и стабилизации;
- б) составляются универсальные схемы замещения, выводятся изображения и оригиналы необходимых при расчете токов и напряжений;
- в) анализируются возможные пути развития процесса и выявляются последовательности смены типов схем замещения на интервалах тактирования, формируются граничные условия смены этапов развития процесса;
- г) составляется структурная схема алгоритма расчета переходного процесса на основе поиска выполнения граничных условий с учетом выбранного способа возбуждения и регулирования.

Во второй главе “Методика исследования переходных процессов вентиляных преобразователей в режимах источников питания постоянного напряжения” изложена методика исследования переходных процессов



стабилизированных источников питания постоянного напряжения, состоящих из последовательно соединенных между собой через трансформатор однофазных последовательного АИТ и выпрямителя. Нагрузкой может быть статический потребитель, двигатель постоянного тока или электронная лампа (со схемой замещения, состоящей из противо Э.д.с. и активного сопротивления). Регулирование выходного напряжения и, следовательно, стабилизация может осуществляться двумя способами: изменением частоты подаваемых импульсов на силовые тиристоры инвертора или регулированием посредством КУ, параллельно включенного к коммутирующему конденсатору. Анализ электромагнитных процессов показал, что в зависимости от принятого способа регулирования в развитии переходного процесса могут участвовать три ОСЗ при частотном регулировании или пять ОСЗ при регулировании посредством КУ. Для каждой ОСЗ получены рекуррентные соотношения искомых токов и напряжений с функциональным разделением коэффициентов.

Выведенные в данной главе формулы мгновенных значений токов и напряжений лежат в основе алгоритмов расчета переходных процессов в ВП на базе последовательного АИТ при частотном регулировании и с помощью КУ. Алгоритмы разработаны с учетом длительности существования и очередности следования ОСЗ эквивалентных структурам схемы, участвующих в переходном процессе.

На основе разработанных алгоритмов и программ были получены ряд графиков переходных процессов при пуске и изменении входного напряжения ВП на основе последовательного АИТ при обоих вышеуказанных способах регулирования. На рисунках 2 и 3 приведены кривые переходных процессов и осциллограммы токов и напряжений при пуске ВП.

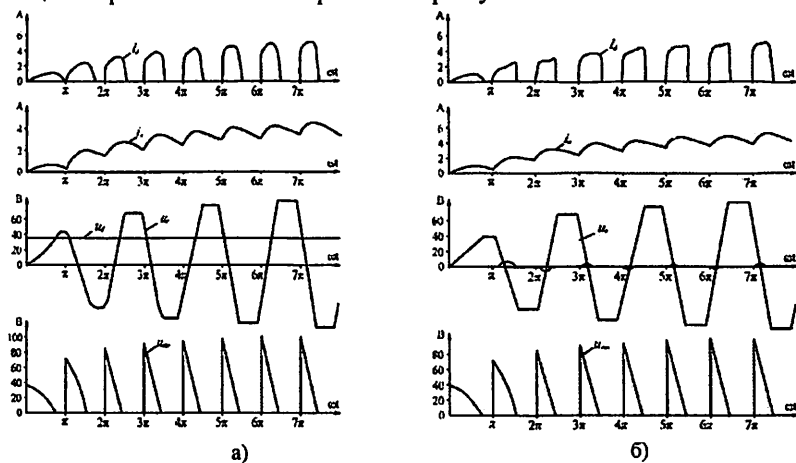


Рис.2. Временные диаграммы пуска ВП (последовательный АИТ):  
а) частотное регулирование; б) регулирование КУ

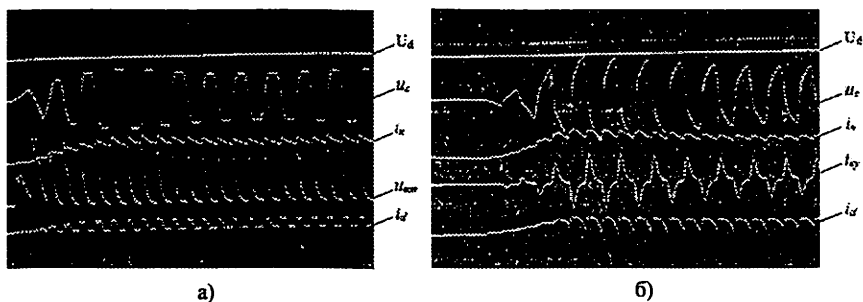


Рис. 3. Осциллограммы пуска ВП на базе последовательного АИТ:  
а) частотное регулирование; б) регулирование КУ

Выявлено, что регулирование посредством изменения частоты приводит к значительному увеличению частоты (сорок процентов), тогда как при регулировании посредством КУ частота остается неизменной т.е. ВП на базе последовательного инвертора с регулированием посредством применения КУ отличается лучшими динамическими показателями по сравнению с ВП при частотном регулировании. Отклонение результатов математического и физического моделирования по средним и действующим значениям токов и напряжений составило не более 8-10 процентов. Хорошее совпадение рассчитанных значений с осциллограммами позволяет судить о правильности разработанных алгоритмов и программ.

Также в главе были получены режимные характеристики ВП на базе последовательного АИТ для обоих способов стабилизации выходных параметров. На рис. 4 представлены режимные характеристики  $E_d^* = f(\omega^*)$  и  $E_d^* = f(\alpha^*)$  полученные при изменении входного напряжения  $E_d$  относительно  $E_{dном}$ , которые позволяют определить величину  $\omega$  или  $\alpha$ , обеспечивающие стабилизацию выходных параметров преобразователя при данном изменении  $E_d$ . Как видно из этого рисунка при изменении  $E_d$  в пределах + 40 % для поддержания режима стабилизации необходимо изменить  $\alpha$  в пределах 0,85 - 1,3 относительно  $\alpha_{ном}$ , тогда как  $\omega$  требуется изменить в пределах 0,65 - 1,6 относительно  $\omega_{ном}$  т.е. для поддержания режима стабилизации при частотном регулировании необходимо осуществлять изменение регулирующего параметра (частоты) в широких пределах.

Для определения значений угла восстановления  $\delta$  при данном изменении  $\omega^*$ ,  $\alpha^*$ , обеспечивающих стабилизацию сохранением коммутационной устойчивости преобразователя, на рис. 4, б) представлены кривые зависимости  $\delta = f(\alpha)$  и  $\delta = f(\omega)$ .

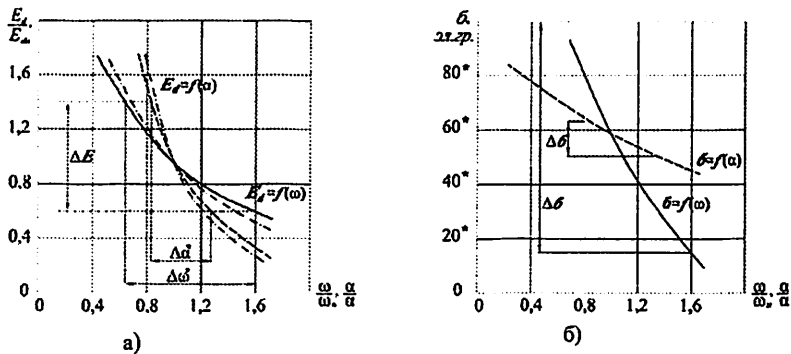


Рис. 3. Режимные характеристики ВП на базе последовательного АИТ при  $P=const$ :  
 а)  $E_d^* = f(\alpha^*)$ ;  $E_d^* = f(\omega^*)$ ; б)  $\delta = f(\alpha^*)$ ;  $\delta = f(\omega^*)$

Из этих кривых видно, что при одинаковом изменении  $E_d$  (40 % относительно  $E_{dном}$ ) угол восстановления при частотном регулировании меняется в пределах  $\Delta\delta = 86$  эл. градусов и приближается к критическому  $\delta_{min} = 14$  эл. градусов, тогда как при регулировании посредством изменения  $\alpha$  предел изменения составляет всего 10 эл. град., а  $\delta_{min} = 53$  эл. градусов.

В этой связи можно сказать, что ВП с регулированием посредством КУ обладает лучшими регулировочными и коммутационными свойствами, чем ВП с частотным регулированием. Так как при частотном регулировании необходимость обеспечения возможного большого диапазона изменения частоты относительно номинальной, приведет к ухудшению коммутационных свойств и завышению установленной мощности элементов преобразователя.

Полученные режимные характеристики позволяют определить величину диапазона регулирования, обеспечивающего стабилизацию выходного напряжения с сохранением коммутационной устойчивости и, тем самым, облегчают нахождение оптимальных параметров ВП.

Третья глава «Методика исследования переходных процессов вентильных преобразователей в режиме источников питания переменного напряжения» посвящена анализу переходных процессов в АИТ используемых в режимах стабилизации выходного напряжения ВП при возможных изменениях режимов нагрузки. Из множества схем и методов стабилизации для исследования выбраны схемы однофазных АИТ с компенсирующим устройством (КУ) выходного напряжения в виде регулируемой индуктивности  $L_k$  (рис. 5).

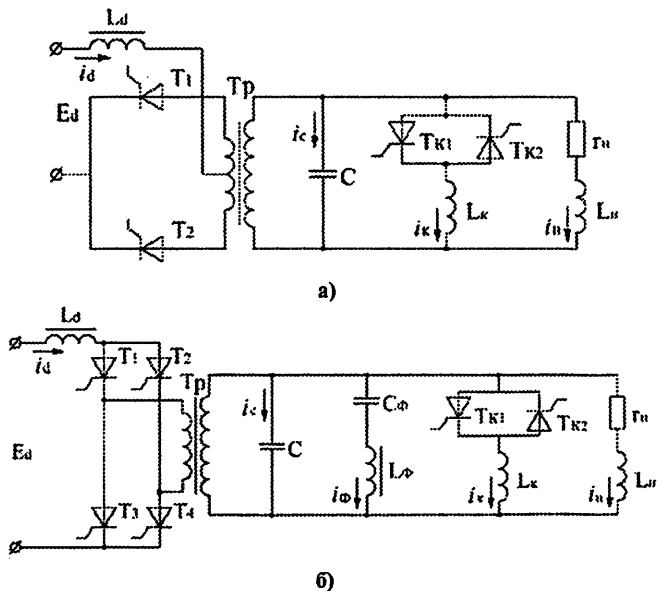


Рис.5. Схемы однофазных АИТ с компенсирующим устройством:  
а) полумостовая; б) мостовая

Анализ проводится для случаев включения фильтра переменного тока в выходные цепи и без них, а также в режимах непрерывных и прерывистых входных токов АИТ при включенном и отключенном в КУ. При регулировании выходного напряжения изменением  $\alpha$  - угла регулирования КУ показал, что в развитии переходного процесса, в зависимости от рабочего состояния КУ, могут участвовать шесть ОСЗ, которые были приведены к двум универсальным ОСЗ, отличающихся между собой рабочим состоянием КУ.

Для каждой ОСЗ решаются составленные по законам Кирхгофа уравнения искомых токов и напряжений, выводятся изображения, а затем в соответствии с теоремой разложения находятся оригиналы, которые имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 i_d(t) &= E_d/r_1 + (B_2/D_1)\exp(-\delta_2 t) + A_1 K_1 + B_1 K_2; \\
 i_H(t) &= E_d/r_1 + (B_4/D_2)\exp(-\delta_2 t) + A_3 K_3 + B_3 K_4; \\
 u_c(t) &= r_H E_d/r_1 + (B_4/D_1)\exp(-\delta_2 t) + A_3 K_1 + B_3 K_2.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Аналогично находятся оригиналы токов и напряжений для второй универсальной ОСЗ.

В главе получены расчетные формулы ВП с параллельным соединением и последовательным соединением  $r_H$  и  $L_H$  элементов нагрузки. Также была разработана математическая модель параллельного АИТ с КУ и  $L$ ,  $C$  фильтром. Конфигурация силовой схемы при этом изменяется таким образом, что во всех структурах силовой схемы, участвующих в развитии переходного

процесса, появляется дополнительная ветвь с последовательно соединенными индуктивностью и емкостью - LC фильтр. Поэтому исследование переходных процессов в схеме ВП (АИТ с КУ и фильтром) можно производить также на основе двух универсальных ОСЗ, зависящих от рабочего состояния КУ, как и в предыдущей схеме ВП (АИТ с КУ), но с дополнительной ветвью, учитывающей фильтр.

По разработанным алгоритмам и математическим моделям (программам) были осуществлены расчеты различных динамических режимов ВП на базе однофазных АИТ. Так, на рис. 6 приведены кривые переходных процессов при пуске и коммутациях нагрузки ВП на базе параллельного АИТ с КУ.

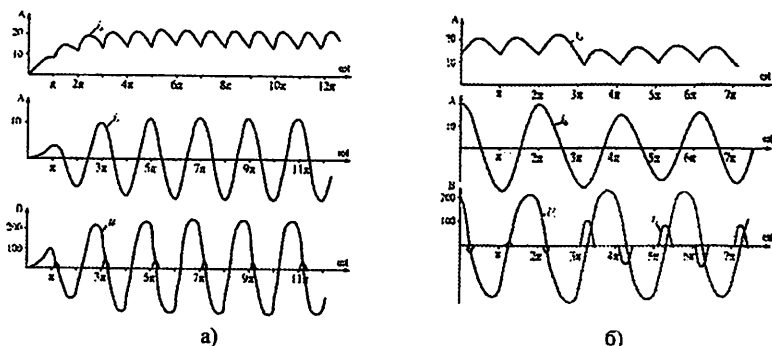


Рис. 6. Временные диаграммы ВП: а) при пуске; б) при коммутации нагрузки

Результаты компьютерных исследований показали, что при независимом способе возбуждения процесс стабилизации длится больше и увеличение амплитуды напряжения нагрузки на первом полупериоде после коммутации нагрузки больше чем при комбинированном способе возбуждения, что позволяет говорить о большей динамической устойчивости инвертора при комбинированном способе возбуждения.

Также в главе получены режимные характеристики ВП на базе параллельного АИТ с КУ. Стабилизация величины выходного напряжения осуществлялась за счет изменения  $\alpha$  - угла включения тиристорov КУ при изменении  $E_d$  нам,  $Z_{нам}$  или их одновременном изменении. На рис. 7 представлены режимные характеристики для различных  $\cos \varphi_n$ .

По кривым зависимости  $E_d = f_1(\alpha)$  (рис. 7, а) можно определить величину угла  $\alpha$ , обеспечивающую стабилизацию  $U_{вых}$  при данном изменении  $E_d$ , а по кривым (рис. 7, б) зависимости  $\delta = f_2(\alpha)$  можно определить диапазон регулирования угла  $\alpha$  в пределах изменения  $E_d$ , обеспечивающий стабилизацию  $U_{вых}$  с сохранением коммутационной устойчивости ВП.

По полученным кривым видно, что с уменьшением величины  $\cos \varphi_n$  ухудшаются регулировочные и коммутационные характеристики ВП, так для  $\cos \varphi_n = 0,2$  предельное значение угла  $\alpha$ , при котором угол  $\delta > 0$  не может быть меньше 35 эл. град., тогда как при  $\cos \varphi_n = 0,95$  условие коммутационной устойчивости

выполняется и при начальных значениях угла регулирования  $\alpha$ .

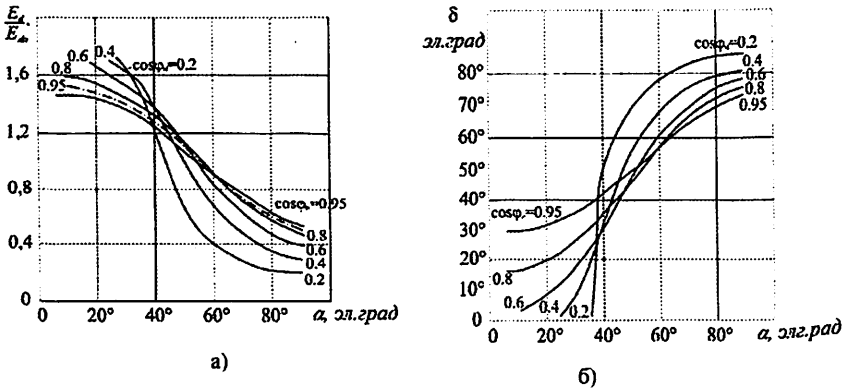


Рис. 7. Режимные характеристики параллельного АИТ с КУ при  $U_{вх}=\text{const}$ ,  $Z_n=\text{const}$ ,  $E_d=\text{varia}$ : а)  $E_d=f_1(\alpha)$ ; б)  $\delta=f_2(\alpha)$

Также были получены режимные характеристики для различных  $\cos \varphi_n$ , полученные при изменении параметров нагрузки и неизменном входном напряжении  $E_d$ , которые позволяют определить величину угла  $\alpha$ , обеспечивающую стабилизацию  $U_{вх}$  при данном изменении параметров нагрузки.

Кроме выше найденных показателей с помощью данной программы можно найти и другие показатели ВП, такие как реактивная мощность коммутирующего конденсатора  $Q_c$ , реактивная мощность компенсирующего устройства  $Q_{ку}$  суммарная реактивная мощность преобразователя  $Q_\delta$ , среднее значение входного тока  $I_d$ .

В главе было произведено исследование формы выходного напряжения инверторов, так как одним из важных факторов, определяющих энергетические параметры инверторов является степень не синусоидальности формы выходного напряжения на основании расчетных кривых выходного напряжения  $u_n$  и выходного тока  $i_n$  параллельного АИТ и АИТ с ОВ.

Анализ гармонического состава  $i_n$  и  $u_n$  параллельного АИТ и АИТ с ОВ показывает следующее:

- чем меньше величина емкости коммутирующего конденсатора, тем хуже коэффициент гармоник ( $K_2$ ) АИТ с ОВ по сравнению с параллельным АИТ;
- при больших величинах емкости коммутирующего конденсатора коэффициент гармоник ( $K_2$ ) АИТ с ОВ и параллельного АИТ почти сравниваются;
- при увеличении  $\cos \varphi_n$  формы кривых  $i_n$  и  $u_n$  начинают значительно отличаться от синусоиды.

Для более полного представления влияния индуктивности сглаживающего дросселя на характеристики инвертора получена кривая зависимости угла восстановления  $\delta = f(L_d^*)$ , представленная на рис. 8.

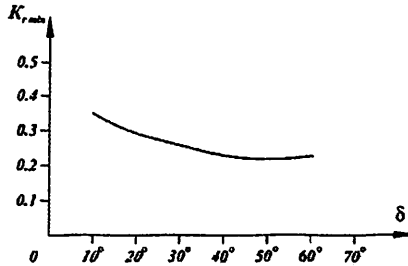


Рис. 8. Кривая зависимости  $K_{r, min} = f(\delta)$

Проведенные исследования показали, уменьшение индуктивности  $L_d$  в однофазном параллельном инверторе (начиная от больших значений) снижает гармоники тока инвертора. Такое снижение существенно при больших углах  $\delta$  и не существенно при малых. Минимальное значение высших гармоник достигается при значениях индуктивности  $L_d$ , близких к гранично-непрерывному режиму на номинальной нагрузке. Дальнейшее уменьшение приводит к ухудшению формы тока инвертора.

Разработанные в главе математические модели обеспечивает проведение исследований обеих силовых: схем инвертора (мостовой или схеме с нулевым выводом) по единой программе, так как рекуррентные соотношения, положенные в основу модели и, соответственно, её программная реализация получены в форме независимой от вида силовой схемы.

В четвертой главе «Методика исследования установившихся режимов автономных инверторов тока» представлены результаты разработки методики анализа установившихся режимов вентильных преобразователей с периодической структурой на примере следующих перспективных трехфазных инверторов тока: параллельного, параллельно-последовательного, последовательно-параллельного, последовательного, инвертора с отсекающими вентилями и инвертора с двухступенчатой коммутацией для двух типов нагрузки: статической и двигательной (асинхронный двигатель). Кроме того, была проведена оценка влияния индуктивностей для ограничения  $di/dt$  через тиристоры (на примере параллельного АИТ) на основные показатели АИТ.

При анализе электромагнитных процессов по изображениям для токов и напряжений  $i_L(p)$  и  $u_C(p)$  отыскиваются их оригиналы  $i_L(t)$  и  $u_C(t)$ , для которых с учетом граничных условий получается система уравнений для определения значения граничных токов и напряжений на каждом этапе. Далее, используя, разработанную на основании условия симметрии и повторяемости процессов в трехфазных ВП, матрицу соответствия (см. табл. 1) отыскиваются выражения для токов и напряжений на всем периоде выходного напряжения.

При выполнении указанной последовательности характер протекания электромагнитных процессов на интервале повторяемости в инверторах каждой группы определяющим образом влияет на вид системы уравнений. Так, при анализе инверторов первой группы для отыскания граничных

значений инерциальных величин получаем систему алгебраических уравнений вида:

$$\begin{aligned} f(I_i, U_j, \pi/m\omega) &= 0; \\ i &= 1 \dots k, j=1 \dots n, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $k$  - число индуктивностей;

$n$  - число емкостей в схеме замещения этапа;

$m$  - количество фаз;

$\pi/m\omega$  - длительность интервала повторяемости.

Система уравнений (2) линейна, что характерно для любых вентильных преобразователей с одной схемой замещения (одним этапом) на интервале повторяемости.

При анализе электромагнитных процессов в инверторах второй группы, в которых имеют место уже два этапа на интервале повторяемости, получаем систему уравнений в виде:

$$\begin{aligned} f_1(I_{нач. i}, U_{нач. j}, I_{\tau}, \tau) &= 0; \\ f_2(I_{кон. i}, U_{кон. j}, I_{\tau}, U_{\tau}, [(n/m\omega) - \tau]) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь первое уравнение для первого этапа с длительностью интервала  $\tau$ , а второе - для второго этапа с длительностью  $[(n/m\omega) - \tau]$ .

Производя подстановку значений переменных из уравнения  $f_1$  в  $f_2$  и учитывая, что  $I_{нач. i} = I_{кон. i} = I_{зр. i}$ ,  $U_{нач. \tau} = U_{кон. i} = U_{зр. j}$  получаем нелинейную систему:

$$f(I_{зр. i}, U_{зр. j}, \tau) = 0, \quad (4)$$

где параметр  $\tau$ , определяющий момент перехода от одного этапа к другому, входит в эту систему неявно, т.е. делает ее трансцендентной. Трансцендентность определяется наличием в (4) коэффициентов в виде показательных или тригонометрических функций от  $\tau$ .

При анализе электромагнитных процессов в инверторах третьей группы мы получаем систему уравнений вида:

$$\begin{aligned} f_1(I_{нач. i}, U_{нач. j}, I_{\tau 1}, U_{\tau 1}, \tau_1) &= 0; \\ f_2(I_{\tau 1}, U_{\tau 1}, I_{\tau 2}, U_{\tau 2}, \tau_2) &= 0; \\ f_3\{I_{\tau 2}, U_{\tau 2}, I_{кон. i}, U_{кон. j}, [(n/m\omega) - \tau_1 - \tau_2]\} &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Последовательной Гауссовой подстановкой, учитывая:

$$\begin{aligned} I_{нач. i} &= I_{кон. i} = I_{зр. i}; \\ U_{нач. j} &= U_{кон. j} = U_{зр. j}, \end{aligned}$$

получаем нелинейное уравнение вида

$$f(I_{зр. i}, U_{зр. j}, \tau_1, \tau_2) = 0, \quad (6)$$

с тем же смыслом параметров  $i, j$ , что и выше. В этой системе уже два параметра  $\tau_1$  и  $\tau_2$  входят неявно. Это принципиально связано с наличием трех этапов на интервале повторяемости и, соответственно, двух моментов времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ , связанных с переходом от первого этапа, ко второму и от второго к третьему.

Изучение разнообразных систем вида (3), (5) привело к возможности выделения в этих системах, являющихся по сути нелинейными, минимальной нелинейной системы. Показано, что минимальная система содержит



количество уравнений на единицу меньше числа этапов на интервале повторяемости, причем каждое из уравнений трансцендентно по всему вектору  $(\vec{\tau})$ . При решении полученной трансцендентной системы использовался метод итераций.

По разработанной методике расчета установившегося режима групп АИТ получены режимные характеристики: максимальное значение запирающего напряжения  $U_{обр,max}^* = U_{обр,max}/E_d$ , время записывания тиристоров  $\delta = \omega\tau_b$  и ток источника питания  $I_d^* = I_d Z_n / E_d$  в зависимости от степени нагрузки  $B = x_{cl}/Z_n$  при вариациях индуктивности сглаживающего дросселя  $L_d^* = L_d/L_n$ . Часть полученных характеристик представлена на рис. 9-12 для различных схем АИТ.

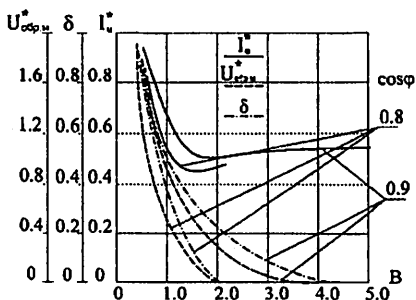


Рис. 9. Режимные характеристики параллельного АИТ

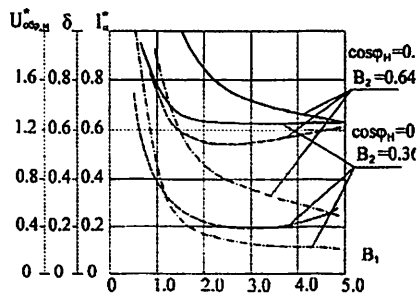


Рис. 10. Режимные характеристики параллельно-последовательного АИТ

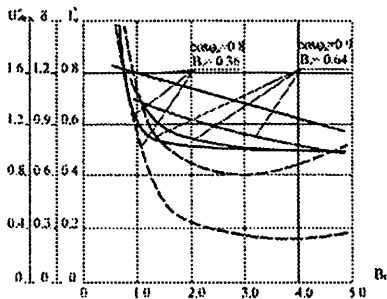


Рис. 11. Режимные характеристики последовательно-параллельного АИТ

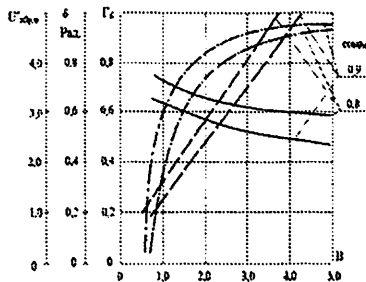


Рис. 12. Режимные характеристики последовательного АИТ

Анализ полученных кривых подтверждает идентичность режимных характеристик инверторов, входящих в одну группу.

В пятой главе «Методика исследования переходных режимов автономных инверторов тока» приводятся результаты анализа

электромагнитных процессов в трехфазных автономных инверторах тока в переходных режимах.

В начале расчета метод требует задания начальных значений инерциальных величин; в дальнейшем, при смене типа ОСЗ, конечные значения инерциальных величин предыдущего типа используются как начальные в расчете очередного типа.

В схемах трехфазных преобразователей, благодаря топологической симметрии по фазам, одна и та же схема замещения, как тип, оказывается справедливой и может быть использована для анализа процессов при одном и том же сочетании включенных вентилялей, имеющих разные номера. Поэтому операторные схемы замещения составляются для определенных сочетаний номеров включенных вентилялей и используются для расчета процесса в необходимом этапе для всех фаз, то есть всех элементов цепи. В главе предложено для облегчения процедуры программирования и расчета использовать матрицу соответствия, которая может быть использована и в расчетах интервалов тактирования, содержащих повторяющуюся последовательность типов. Здесь также используется тот факт, что на интервале тактирования процессы в различных фазах нагрузки могут быть описаны одними и теми же соотношениями с учетом перестановок обозначений и знаков, определяемых свойствами трехфазной системы.

Используя данную матрицу в главе были разработаны математические модели для расчета переходных процессов следующих трехфазных АИТ: параллельный, последовательный, АИТ с отсекающими вентилями (АИТ с ОВ) и АИТ с двухступенчатой коммутацией (АИТ с ДК). При разработке математической модели АИТ с ОВ для сокращения её размеров была использована общая схема замещения АИТ с ОВ (Рис. 13), из которой (в зависимости от включенного состояния ключей  $K_1-K_4$ ) могут быть определены все возможные варианты схем замещения в переходном процессе.

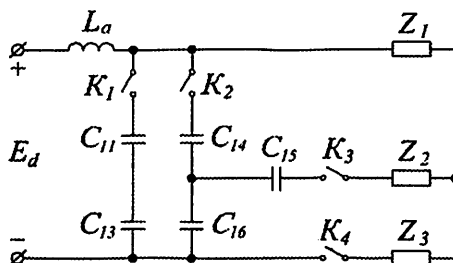


Рис. 13. Общая схема замещения АИТ с ОВ

Возможные варианты как типы с I по VIII с указанием ключей (диодов), которые должны быть замкнуты в исходной схеме для получения определенного типа представлены ниже в таблице 1.

Варианты возможных схем замещения АИТ с ОБ

Тип ОСЗ	Включаемые ключи	Тип ОСЗ	Включаемые ключи
I	$K_3$	V	$K_1, K_4$
II	$K_3, K_4$	VI	$K_2, K_3, K_4$
III	$K_4$	VII	$K_1, K_2, K_4$
IV	$K_2, K_3$	VIII	$K_1, K_3, K_4$

Общая схема замещения соответствует включенному состоянию пары тиристоров  $T_1$  и  $T_2$ . Рассматриваемые типы схем замещения появляются в переходном процессе и при других парах включенных тиристоров и других номерах включенных диодов. Однако тип схемы замещения от этого не меняется и это позволяет, используя матрицу соответствия и зная номер пары включенных тиристоров, вести расчет переходного процесса, используя только указанные восемь типов схем замещений.

Для всех вышеуказанных АИТ были разработаны алгоритмы расчета переходных процессов, основанные на выполнении граничных условий существования операторных схем замещения.

По результатам расчета построены кривые мгновенных значений токов и напряжений исследуемых схем АИТ. В качестве примера на рис. 14 приведены расчетные кривые и осциллограммы  $i_d(\omega t)$  и  $u_H(\omega t)$  переходного процесса трехфазного параллельного АИТ при  $r_H=10$  Ом,  $L_d=0,1$  Гн,  $L_H=0,011$  Гн,  $C=80$  мкФ,  $f=125$  Гц и  $E_d=100$  В.

Хорошее совпадение расчетных кривых с осциллограммами токов и напряжений АИТ в переходных режимах (5-8%) подтверждает правильность предложенной методики анализа переходных процессов в автономных инверторах тока.

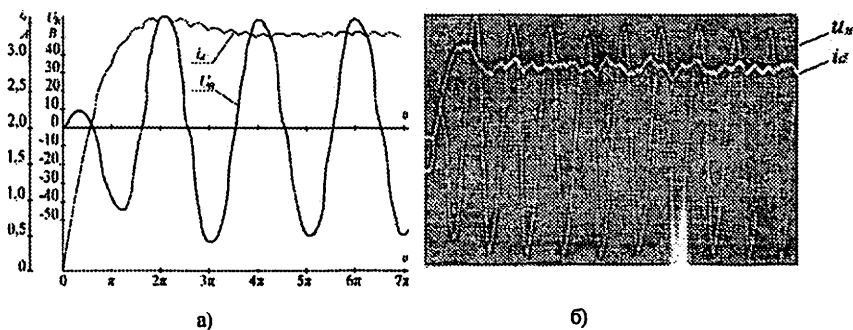


Рис. 14. Кривые мгновенных значений токов и напряжений (а) и осциллограммы (б) переходного процесса трехфазного параллельного АИТ

В главе также представлены результаты разработки принципиально нового подкласса вентильных преобразователей с переменной структурой на основе автономных инверторов, который обеспечивает возможность функционирования в режимах как инвертор тока и как инвертор напряжения

Идеей разработки является создание на базе известных однофазных схем АИТ и АИН структурной схемы инвертора (рис. 15), реализующей по требованию нагрузки автоматическое переключение элементов инвертора обеспечивающий переход от режима АИТ к режиму АИН или наоборот.

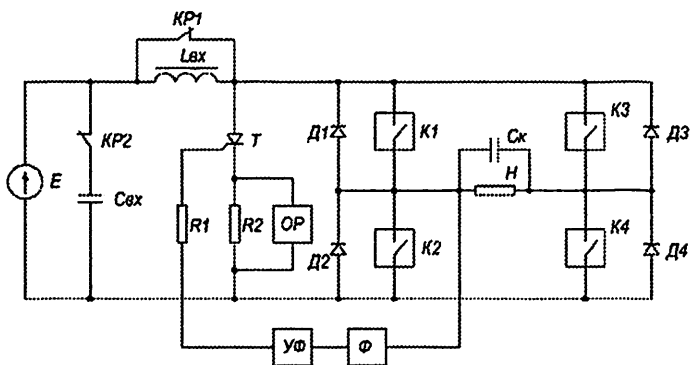


Рис. 15. Структурная схема преобразователя

Такой переход становится возможным при автоматическом переключении питающих источников тока в источник напряжения или наоборот при каждой смене знака угла  $\phi$  на противоположный. Переключение может быть реализовано с помощью контактов реле, включенных в базовые элементы источников и работающих синхронно с определителем знака угла  $\phi$ , включенными в узлы нагрузки.

Технический результат достигается тем, что устройство имеет возможность обеспечить по требованию нагрузки автоматическое переключение элементов инвертора от режима автономного инвертора тока в режим автономного инвертора напряжения или наоборот и функционировать за счет этого как инвертор тока или как инвертор напряжения, переходя из режима инвертора тока в режим инвертора напряжения при возникновении аварийной ситуации, связанной с уменьшением входного тока до нуля т.е. холостого хода или же отставания тока  $i_u$  от напряжения  $u_u$ .

Смена результирующего импеданса нагрузки на индуктивный характер для случая автономного инвертора тока соответствует аварийному режиму, предотвращение которого возможно в тремя способами: аварийным отключением инвертора; подключением дополнительной емкости параллельно нагрузке; переводом автономного инвертора тока в режим автономного инвертора напряжения, то есть подключением во входную цепь емкости  $C_{вх}$  и одновременным отключением входной индуктивности  $L_{вх}$ .

В схеме предусмотрен автоматический переход автономного инвертора тока в режим автономного инвертора напряжения и, таким образом, обеспечивается предотвращение аварийного режима и устройство начинает работать в режиме инвертора напряжения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты проведенных в диссертационной работе исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлено, что анализ и моделирование вентильных преобразователей с периодической структурой целесообразно выполнять при разделении их на специальные классы по признакам: общности принципов коммутации вентиляей; количества схем замещения на интервалах повторяемости; режимах преобразования энергии (тока или напряжения).

2. Для многообразия схем автономных инверторов тока, автономных инверторов напряжения и автономных резонансных инверторов соответствующие схемы замещения между периодами повторяемости определяются линейными дифференциальными соотношениями, отличающиеся друг от друга лишь коэффициентами при искомым переменных. Показано, что соотношения коэффициентов этих уравнений, в рассмотренных группах инверторов тока, являются основными факторами, влияющими на качественные показатели режимов работы автономных инверторов тока.

3. Показано, что учет в моделях и программах расчета вентильных преобразователей с периодической структурой процессов перераспределения энергии между источником и нагрузкой, а также между фазами инверторов в переходных режимах и в моменты коммутации вентиляей требует отдельного их рассмотрения от процессов, установившихся в пределах одного интервала повторяемости.

4. Разработана методология моделирования установившихся и переходных процессов вентильных преобразователей с периодической структурой, в которой с помощью использования унифицированных операторных схем замещения сокращается количество независимых переменных и коэффициентов в рекуррентных соотношениях моделей преобразователей.

5. Проведен анализ трех групп трехфазных автономных инверторов тока, выделенных по признакам коммутации вентиляей, а также по количеству анализируемых в них операторных схем замещения при работе их на активно-индуктивную нагрузку и асинхронные двигатели. Построены режимные характеристики автономных инверторов тока с одно- и двухступенчатой коммутацией, позволяющие судить об устойчивости коммутации вентиляей в выделенных группах автономных инверторов тока.

6. По полученным математическим моделям и составленным алгоритмам реализованы программы анализа различных схем автономных инверторов тока, работающих в режимах стабилизированных источников тока. Результаты разработок программ и алгоритмов подтверждены пятью свидетельствами (DGU) о

регистрации в государственном реестре программ, выданных Агентством интеллектуальной собственности при Министерстве юстиции Республики Узбекистан.

7. Результаты компьютерных экспериментов подтверждены результатами испытаний на реальных объектах. Хорошее совпадение кривых мгновенных значений токов и напряжений, полученных экспериментальным и расчетным путем (6-8%) иллюстрирует достоверность разработанных алгоритмов и программ.

8. Получен патент на полезную модель Агенства по интеллектуальной собственности при Министерстве юстиции Республики Узбекистан на преобразователь постоянного напряжения в переменное (FAP 01895; 2022 г.), в результате разработана схема инвертора, имеющая повышенную коммутационную устойчивость за счет автоматического переключения силовой схемы.

9. Результаты проведенных исследований внедрены на двух предприятиях кабельного производства ООО «NATIONAL HOLDINGS» и ИП ООО «NAVOI CABLE CONNECTOR» с суммарной экономической эффективностью 395 530 000 (триста девяносто пять миллионов пятьсот тридцать тысяч) сум.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSC.27.06.2017.T.03.03 ON THE AWARDING OF  
DEGREES AT THE TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY  
NAMED AFTER ISLAM KARIMOV**

---

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

**UMAROV SHUKHRAT BADREDDINOVICH**

**METHODOLOGY FOR INVESTIGATION OF MODES OF OPERATION OF  
VALVE CONVERTERS WITH A PERIODIC STRUCTURE**

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

**ABSTRACT OF THE DISSERTATION  
DOCTORS (DSC) TECHNICAL SCIENCES**

**Tashkent – 2022**

The theme of the doctoral dissertation (DSc) has been registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under B2022.1.DSc/TS08.

The dissertation has been prepared at Tashkent state technical university named after Islam Karimov.

The Abstract of dissertation is posted in Three languages (Uzbek, Russian, English (rezume)) is placed on the web page of Scientific Council ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) and Information and Educational Portal «ZiyoNet» ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

**Scientific supervisor:** Sapaev Khushnud Babajanovich  
Doctor of technical sciences, professor

**Official opponents:** Korovkin Nikolay Vladimirovich  
Doctor of technical sciences, professor  
(Russian Federation)

Toirov Olimjon Zuvurovich  
Doctor of technical sciences, professor

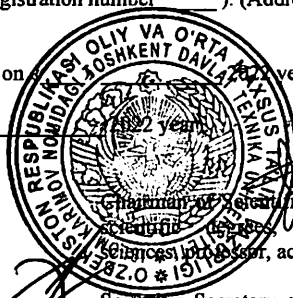
Aripov Nazirjon Mukaramovich  
Doctor of technical sciences, professor

**Leading organization:** Tashkent University of Information Technologies

Defense of dissertation will take place in « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 at \_\_\_\_ o'clock at a meeting of the scientific council DSc.03/30.12.2019.T. 03.03 at the Tashkent state technical university. (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz))

The doctoral dissertation could be reviewed at the Information-resource center of Tashkent state technical university (registration number \_\_\_\_). (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel: 246-03-41)

Abstract of dissertation sent out on \_\_\_\_ year.  
(mailing report № \_\_\_\_ on « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 year.)



**K.R. Allaev**  
Chairman of Scientific Council on 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. Gayibov**  
Chairman of the Academic Seminar under the Scientific Council on awarding scientific degrees, Doctor of technical sciences, professor.



## **INTRODUCTION (abstract of DSc dissertation)**

**The aim of the study** is to develop a methodology for investigating transient and steady-state modes of valve converters with a periodic structure and to develop a circuit of a valve converter with high switching stability.

### **Tasks of their search:**

1. Analysis of the current state and prospects for the development and modeling of valve converters with a periodic structure based on autonomous inverters;
2. Development of a methodology for modeling valve converters with a periodic structure, which provides the possibility of its application for all types of autonomous inverters and energy converters with a periodic sequence of changing the structure (topology) of the power circuit;
3. Development of mathematical models and algorithms for calculating transient and steady-state operating modes of valve converters when they operate on an active-inductive and motor load in the modes of continuous and intermittent input currents of inverters;
4. Obtaining the regime characteristics of inverters, allowing to determine the parameters of the elements of the power circuit of valve converters with a periodic structure, as well as the control range, which ensures the stabilization of the output voltage while maintaining its switching stability;
5. Development of valve converters with a periodic structure based on autonomous current and voltage inverters with high switching stability;
6. Practical implementation of the research results in the design of valve converters with a periodic structure.

**The object of research** is industrial cable enterprises: «NATIONAL HOLDINGS» LLC (Tashkent) and «NAVOI CABLE CONNECTOR» FE LLC (Navoi).

### **The scientific novelty of the work** is as follows:

a methodology for investigating modes of operation of valve converter with periodic structure based on mathematical models and algorithms of single- and three-phase autonomous current inverters has been developed;

a method for developing universal operator substitution diagrams equivalent to several states of power circuit sub-circuits has been developed;

operation characteristics of single- and three-phase autonomous current inverters developed taking into account a type of loading, a control method and a form of input current of inverters;

algorithms and software for calculating transient and steady state modes of valve inverters with periodical structure taking into account change of input voltage and load parameters have been developed;

mathematical models based on the improved Laplace transform to determine the technical characteristics of the elements of valve converter with periodical structure have been developed.

the scheme of valve converter with periodical structure based on combining the advantages of autonomous voltage and current inverters was developed.

**Implementation of research results.** Based on the scientific results obtained to develop a methodology for investigating the modes of operation of valve transducers with a periodic structure:

due to implementation of modernization method of wire drawing at the cable plant of “NATIONAL HOLDINGS” LTD (Information of Uzelteksanoat Association, December 30, 2021, № 04-3/2828) the copper waste level was reduced by 8%, service life of expensive equipment - natural diamond dies increased by 5% in average, machine time was extended by 12% that in total made total economic effect to the amount of 231 150 000 (two hundred and thirty one million one hundred and fifty thousand) sum;

due to implementation of modernization method of wire drawing at the enterprise cable production "NAVOI CABLE CONNECTOR" IE LLC (Information of Uzelteksanoat Association, June 16, 2022, № 04-3/1455) was reduced the level of copper waste by 6%, increased the life of expensive equipment - natural diamond dies on average of 4-5%, extended machine time by 10%, resulting in a total economic effect of 164 380 000 (one hundred sixty-four million three hundred eighty thousand) sum;

a utility model patent was granted by the Intellectual Property Agency of the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan for a DC-to-AC converter (FAP 01895; 2022), resulting in the development of an inverter circuit with increased switching stability through automatic switching of the power circuit.

**The structure and volume of the research work.** The structure of the dissertation consists of introduction, five chapter, conclusion, list of used literature and applications. The volume of the dissertation is 176 pages and a list of published works.

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

**I бўлим (Часть I; Part I)**

1. Сапаев Х.Б., Умаров Ш.Б. Исследование динамических режимов источников питания на основе автономных источников тока. // Монография. Изд. Университет, Ташкент, 2021 – 122 с.

2. Xoshimov O.O., Umarov Sh.B. Andozaviy sanoat mexanizmlarining avtomatlashtirilgan elektr yuritmalari. O'quv qo'llanma, Iqtisod moliya, Toshkent, 2015 - 142 bet.

3. Xoshimov O.O., Umarov Sh.B., Dusmatov R.K. Umumsanoat mexanizmlarining avtomatlashtirilgan elektr yuritmalari. Darslik, Universitet bosmaxonasi, Toshkent, 2022 - 192 bet.

4. Умаров Ш.Б. Математическая модель для расчета переходных процессов в стабилизированных источниках питания на базе однофазного последовательного инвертора тока. // Научно-технический журнал “Энергия ва ресурс тежаш муаммолари”. -2015, № 4. С. 112-115 (05.00.00; № 21).

5. Умаров Ш.Б. Математическая модель и алгоритм расчета переходных процессов вентильных преобразователей для частотнорегулируемого энергосберегающего электропривода. // Журнал “Вестник ТашГТУ”. Ташкент.-2018, № 4. С. 3-8 (05.00.00; № 16).

6. Khamudkhanov M.M., Umarov Sh. B. Equations and transfer functions of the main elements of a multi-motorized automated electric drive pumping unit. // Chemical technology control and management International scientific and technical journal. – 2018, № 4-5. P. 168-172 (05.00.00; № 12).

7. Umarov Sh. B. Mathematical Models of Stabilized Power Supplies Based On Current Inverters // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. India, 2019, Volume 6, Issue 8, August 2019. ISSN: 2350-0328. PP. 10341-10344 (05.00.00; № 8).

8. Умаров Ш.Б., Рахматов Д.Д. Расчет переходных процессов в стабилизированных источниках питания на базе однофазного последовательного инвертора тока. // Журнал “Вестник Туринского политехнического университета в городе Ташкенте”. Ташкент.- 2019, №3, С. 84-89 (50.00.00; № 25).

9. Sapaev X.B., Abduraimov E.Kh., Umarov Sh. B. Numerical calculation of electronic circuits with nonlinear elements. // Журнал “Technical science and innovation”. ISSN: 2181-0400. 2020, №4. С. 112-118 (50.00.00; № 16).

10. Сапаев Х.Б., Мочалов А.И., Умаров Ш.Б. О неадекватности модели трехфазного мостового выпрямителя при кусочно-линейной аппроксимации характеристик вентилей // Журнал “Электричество”. 2020. №6. С. 39–44. DOI:10.24160/0013-5380-2020-6-39-44 (50.00.00; № 94).

11. Сапаев Х.Б., Умаров Ш.Б. Эффективный способ математического моделирования для проектирования трехфазного параллельного инвертора с

отсекающими вентилями // Научно-технический журнал “Энергия ва ресурс тежаш муаммолари”. Ташкент, 2021.- Специальный выпуск. С. 198-203 (50.00.00; № 21).

12. Умаров Ш.Б. Методика исследования переходных процессов стабилизированных источников питания постоянного напряжения на основе однофазных последовательных автономных инверторов тока // Научно-технический журнал “Энергия ва ресурс тежаш муаммолари”. Ташкент, 2022.- № 2. С. 71-77 (05.00.00; № 21).

13. Умаров Ш.Б. Методика разработки математических моделей вентильных преобразователей с периодической структурой // Научно-технический журнал “Энергия ва ресурс тежаш муаммолари”. Ташкент, 2022.- Специальный выпуск. С. 69-74 (50.00.00; № 21).

14. Umarov Sh. B. Results of the Development of an Energy-effective Automated Solar Battery Cooling System With Frequency Control // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. India, 2022.- Volume 9, Issue 7, July 2022. ISSN: 2350-0328. PP. 19483-19486 (05.00.00; № 8).

15. Umarov Sh. B. Comparative Analysis of Two Modelling Methods for Autonomous Current Inverters// International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. India, 2022.- Volume 9, Issue 7, July 2022. ISSN: 2350-0328.PP. 19501-19504 (05.00.00; № 8).

## П бўлим (Часть II; PartII)

16. Умаров Ш.Б., Сапаев Х.Б. Преобразователь постоянного напряжения в переменное // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Патент FAP 01895 от 09.12.2020.

17. Умаров Ш.Б., Атажиев Ш.М. Программа расчета динамических процессов в вентильном преобразователе на базе однофазного автономного инвертора тока с компенсирующим устройством при независимом способе возбуждения// Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU № 07313 от 25.10.2019

18. Умаров Ш.Б., Сапаев Х.Б., Атажиев Ш.М. Компьютерная программа для определения динамических показателей инвертора тока с улучшенной формой выходного напряжения// Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU № 08337 от 13.03.2020

19. Умаров Ш.Б., Сапаев Х.Б., Компьютерная программа для расчета переходных процессов трехфазного автономного инвертора тока// Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU № 09920 от 09.12.2020

20. Абдуллабеков И.А., Сапаев Х.Б., Умаров Ш.Б., Атажиев Ш.М., Хамудханова Н.Б. Компьютерная программа для расчета оптимальных параметров насосной установки// Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU № 10441 15.02.2021.

21. Умаров Ш.Б., Сапаев Х.Б., Атажиев Ш.М. Компьютерная программа для расчета переходных процессов трехфазного последовательного автономного инвертора тока// Агентство по интеллектуальной собственности при Министерстве юстиции РУз. Свидетельство DGU № 13993 28.12.2021.

22. Миралиев М.Р., Умаров Ш.Б. Расчет переходных процессов в стабилизированных источниках питания на базе однофазного последовательного инвертора. Журнал: *Texnika yulduzlari*. №1, 2014 г.- Ташкент: ТашГТУ. С.48-52.

23. Умаров Ш.Б., Кучкаров А.В. Математическая модель и алгоритм расчета переходных процессов в стабилизированных источниках питания на базе однофазного параллельного инвертора тока. Журнал: *Texnika yulduzlari*. №2-3, 2015 г.- Ташкент: ТашГТУ. С. 7-11.

24. Умаров Ш.Б., Абдуллабеков И.А. Алгоритм расчета переходных процессов стабилизированного источника питания на базе однофазного последовательного автономного инвертора тока при частотном регулировании. Международный научный журнал. "Молодой учёный", 2016 № 21. С. 228-232.

25. Умаров Ш.Б. Методика моделирования переходных процессов стабилизированного однофазного параллельного инвертора тока в режиме прерывистого входного тока. *Universum: технические науки: научный журнал*. – № 8(65). М., Изд. «МЦНО», 2019. С.31-35.

26. Umarov Sh. B. Comparative analysis of possibilities of using the valve frequency converters for speed control of induction motors with squirrel-cage rotor. *European science review*, № 7–8, 2019. С. 70-73.

27. Сапаев Х.Б., Умаров Ш.Б., Атаджиев Ш.М., Бокижонов У.А., Муминов Х.А. Частотно-регулируемая автоматизированная система охлаждения солнечных батарей. *Universum: технические науки: научный журнал*. – № 6(75). М., Изд. «МЦНО», 2020. С.71-75.

28. Khushnud Sapaev, Shukhrat Umarov, Dilmurod Rakhmatov. Mathematical Model for Transient Calculation in a Three-Phase Current Inverter with Two-Stage Switching. *International Journal of Advanced Science and Technology*. Vol. 29, № 11s, (2020), pp. 1565-1571.

29. Умаров Ш.Б. Абдуллабеков И.А. Математическая модель для расчета переходных процессов в стабилизированных источниках питания на базе однофазного параллельного инвертора тока. Сб. науч. статей: *INNOVATION-2014*.- Тошкент: Янги аср авлоди. С.130-131.

30. Умаров Ш.Б. Математическая модель для расчета переходных и установившихся процессов в стабилизированных источниках питания на базе однофазного последовательного инвертора тока. Сб. науч. статей: *INNOVATION-2015*.- Тошкент: Янги аср авлоди. С.166-167.

31. Умаров Ш.Б. Метод разработки математических моделей стабилизированных источников питания на базе однофазных инверторов тока. Сборник материалов Республиканской научно-практической конференции "Научные проблемы энергоснабжения современного производства" Бухара,

2015. С.126-128

32. Умаров Ш.Б., Абдуллабеков И.А., Дусматов Р.К., Файзуллаев Б. Математические модели стабилизированных источников питания на базе инверторов тока. Современные технологии: Актуальные вопросы, достижения и инновации. Пенза 2017. С. 42-46.

33. Умаров Ш.Б. Повышение энергоэффективности электрического оборудования и электропривода котельного цеха Кунградского содового завода. Сборник статей. Республика илмий-техникавий анжуман "Мукобил энергия манбаларидан фойдаланишда энергия тежамкорлик муаммолари". Карши 2017. С. 154-156.

34. Умаров Ш.Б., Атаджиев Ш., Бакиров А., Хамудханов М. Методы управления технологическим процессом водоподачи насосных агрегатов. Сборник трудов XXVII научно-технической конференции молодых ученых, магистрантов и студентов «Умидли кимёгарлар - 2018». Ташкент 2018. С. 489-491.

35. Khamudkhanov M.M., Umarov Sh. B. Equations and transfer functions of the main elements of a multi-motorized automated electric drive pumping unit. Tenth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation, WCIS-2018. P. 146-150.

36. Умаров Ш.Б. Математическое моделирование частотных преобразователей для энергосберегающих автоматизированных электроприводов. Международная научно-практическая конференция "Инновация - 2018" Сборник научных статей. Ташкент 2018. С. 163-164.

37. Умаров Ш.Б., Хамудханов М.М., Атажиев Ш.А. Обобщенная математическая модель насосной установки систем машинного орошения агроландшафтов. В сб. материалов международной научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности использования электрической энергии в отраслях агропромышленного комплекса» II часть. Ташкент 2018. С.207-211

38. Умаров Ш.Б., Атажиев Ш.А., Умаров Д.Ш. Разработка математической модели и алгоритма расчета переходных процессов однофазного параллельного инвертора тока для энергосберегающего электропривода. В сб. материалов международной научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности работы современного производства и энерго-ресурсосбережения» II часть. Андижан 2018. С.255-259.

39. Умаров Ш.Б. Математическая модель для расчета переходных и установившихся процессов в двухтактных вентильных преобразователях на базе однофазного последовательного инвертора тока. Международная научно-практическая конференция "Инновация - 2019" Сборник научных статей. Ташкент 2019. С. 141-142.

40. Khushnud ,Sapaev, Shukhrat Umarov. Two approaches for automating analysis of electromagnetic processes in non-linear circuits with valves. Web of Conferences, 1085 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20191390 E 3S 139> (2019).

41. Khamudkhanov M. M., Sapaev KH. B., Umarov Sh. B. Multi-motor drive with common inverter for pumping unites. Web of Conferences, II International scientific conference. MIP: Engineering-2020: modernization, innovations, progress: advanced technologies in material science, mechanical and automation engineering. MIP: Engineering-2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 862 (2020) 062035 IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/862/6/062035

42. Umarov Sh. B., Rakhmatov D. D. Calculation of transition processes in stabilized power sources on the basis of a single-phase serial current inverter. Web of Conferences, II International scientific conference. MIP: Engineering-2020: modernization, innovations, progress: advanced technologies in material science, mechanical and automation engineering. MIP: Engineering-2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 862 (2020) 062032 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/862/6/062032

43. Умаров Ш.Б., Туляганов М.М., Собирова Ш.Ш. Использование электроприводов системах охлаждения энергетических установок. «Электр энергиясини ишлаб чикариш, узатиш ва тақсимлаш ҳамда ундан оқилона фойдаланишнинг долзарб муаммолари» мавзусида республика микёсида илмий-техникавий анжуман. Илмий ишлар туплами. Тошкент 2020. 271-272

44. Умаров Ш.Б., Махамматов Д., Бердиев Ш. Повышение энергоэффективности электрического электропривода канатной дороги. «Электр энергиясини ишлаб чикариш, узатиш ва тақсимлаш ҳамда ундан оқилона фойдаланишнинг долзарб муаммолари» мавзусида республика микёсида илмий-техникавий анжуман. Илмий ишлар туплами. Тошкент 2020.198-200

45. Сапаев Х.Б., Умаров Ш.Б. Метод разработки математических моделей стабилизированных источников питания на базе однофазных инверторов тока. «Электр энергиясини ишлаб чикариш, узатиш ва тақсимлаш ҳамда ундан оқилона фойдаланишнинг долзарб муаммолари» мавзусида республика микёсида илмий-техникавий анжуман. Илмий ишлар туплами. Тошкент 2020. 126-128.

46. Khushnud Sapaev, Shukhrat Umarov, Islombek Abdullabekov. Research energy and resource saving operating modes of the pump unit. E3S Web of Conferences 216, 01150 (2020). The Authors, published by EDP Sciences. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

47. Khushnud Sapaev, Shukhrat Umarov, Islombek Abdullabekov. Critical frequency of autonomous current inverter when operating on active-inductive load E3S Web of Conferences 216, 01153 (2020) The Authors, published by EDP Sciences. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

48. Umarov Shukhrat, Rakhimov Bakhtiyor. Mathematical model of the pumping station installation. Innovation in the modern education system: a collection scientific works of the International scientific conference (25th May,

2021) – Washington, USA: "CESS", 2021. Part 6. Pp. 25-31.

49. Umarov Shukhrat, Ismoilov Aziz. Increasing the energy efficiency of the electric boiler shop equipment and electric drive kungrat soda plant. Innovation in the modern education system: a collection scientific works of the International scientific conference (25th May, 2021) – Washington, USA: "CESS", 2021. Part 6. Pp. 132-136.

50. Umarov Shukhrat, Soataliyev Fazliddin. Increasing the energy efficiency of the fan mill of novoangrenskaya thermal power plant. Innovation in the modern education system: a collection scientific works of the International scientific conference (25th May, 2021) – Washington, USA: "CESS", 2021. Part 6. Pp. 144-148.

51. Umarov Shukhrat, Kuldoshev Maxmud, Ruzmatov Abduvoxid, Kenjaev Inom. Increasing the energy efficiency of the electric drive of the electric equipment of the almayk mining and metallurgical combinat. Innovation in the modern education system: a collection scientific works of the International scientific conference (25th May, 2021) – Washington, USA: "CESS", 2021. Part 6. Pp. 113-121.

52. Umarov Shukhrat, Ismoilov Aziz. Increasing the energy efficiency of the electric boiler shop equipment and electric drive kungrat soda plant. Innovation in the modern education system: a collection scientific works of the International scientific conference (25th May, 2021) – Washington, USA: "CESS", 2021. Part 6. Pp. 132-136.

53. Сапаев Х.Б., Умаров Ш.Б., Туляганов М.М., Назаров М.М., Нишонов Х.Р. Повышение производительности насосных станций. «Тенденция развития альтернативной и возобновляемой энергетики: проблемы и решения» Международная научно-техническая конференция. Сборник докладов. Ташкент 2021. С 365-372.

54. Umarov Shukhrat, Maxammatov Dilmurod, Akhunov Fayzulla and Qodirov Fazliddin. Mathematical model for calculating transient modes of a valve converter. AIP Conference Proceedings 2402, 060012 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0071554>. Published Online: 15 November 2021

55. Sapaev Khushnud, Umarov Shukhrat, Abdullabekov Islombek, Khamudkhanova Nargiza and Nazarov Maxamanazar. Scheme of effective regulation of pumping station productivity. AIP Conference Proceedings 2402, 060016 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0071557>. Published Online: 15 November 2021

56. Умаров Ш.Б., Исмоилов А., Рахимов Б., Соаталиев Ф. Математическая модель для расчета переходных процессов в частотно регулируемых асинхронных электроприводах на базе инвертора тока. Международная научно-практическая конференция "Инновация - 2021" Сборник научных статей. 2021. С.189-191

57. Умаров Ш.Б., Кулдошев М., Рўзматов А., Кенжаев И. Повышения энергоэффективности электропривода электрического оборудования Алмалыкского горнометаллургического комбината. Международная научно-



практическая конференция "Инновация - 2021" Сборник научных статей. 2021.С.174-176

58. Umarov Shukhrat, Atajiev Shohrux. Energy-efficient frequency-controlled automated solar cell cooling system. Fotoenergetikada nanostrukturali yarimo'tkazgich materiallar. II Xalqaro anjuman materiallari to'plami. 2021. P. 81-84

59. Сапаев Х.Б., Умаров Ш.Б., Умаров Д.Ш. Повышение энергоэффективности электропривода питательного насоса котельного цеха Кунградского содового завода. Сборник материалов Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы системы электроснабжения". Ташкент 2021. P. 92-93

60. Сапаев Х.Б., Умаров Ш.Б. Эффективный способ математического моделирования для проектирования трехфазного параллельного инвертора с отсекающими вентилями. Сборник материалов Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы системы электроснабжения". Ташкент 2021. P. 99-101

61. Umarov Sh.B., Karimjonov D. Avtonom tok inverterlarini modellashtirish usullarining solishtirma tahlili. Электротехника, электромеханика, электротехнологиялар ва электротехника материаллари» мавзусида Республика илмий-техник анжуман материаллари, Андижон 22 декабр 2021 йил. С. 30-32

62. Umarov Sh.B., Atajiev Sh. M. Quyosh batareyalarining sovutish tizimini mukamallashtirish. Электротехника, электромеханика, электротехнологиялар ва электротехника материаллари» мавзусида Республика илмий-техник анжуман материаллари, Андижон 22 декабр 2021 йил. С. 32-34

63. Умаров Ш.Б. Методика исследования переходных процессов стабилизированных источников питания постоянного напряжения на основе однофазных последовательных инверторов тока. Международная научно-техническая конференция "Актуальные вопросы энергоэффективности автоматизированных электромеханических и электротехнологических систем" 3-4 марта 2022 года. Сборник докладов. 2022. Часть I. С.49-53

64. Умаров Ш.Б., Каримжонов Д. Характеристики автономного инвертора тока с отсекающими вентилями, питающего асинхронный электропривод. Международная научно-техническая конференция "Актуальные вопросы энергоэффективности автоматизированных электромеханических и электротехнологических систем" 3-4 марта 2022 года. Сборник докладов. 2022. Часть I. С.149-152

65. Умаров Ш.Б., Кудлошов М.О., Рузматов А.З., Кенжаев И.Х.. Уменьшение углеродных выбросов за счет повышения энергоэффективности электропривода электрического оборудования алмалыкского горнометаллургического комбината Международная научно-техническая конференция "Актуальные вопросы энергоэффективности автоматизированных электромеханических и электротехнологических систем" 3-4 марта 2022 года. Сборник докладов. 2022. Часть II. С.73-76

66. Умаров Ш.Б., Рахимов Б.Ш., Исмоилов А.А., Соаталиев Ф.И. Автоном ток инвертори асосидаги асинхрон электр юритмани бошқариш тизимлари. Международная научно-техническая конференция "Актуальные вопросы энергоэффективности автоматизированных электромеханических и электротехнологических систем" 3-4 марта 2022 года. Сборник докладов. 2022. Часть II. С.76-78

Автореферат Тошкент давлат техника университети "ЭНЕРГИЯ ВА РЕСУРС ТЕЖАШ МУАММОЛАРИ" журнали тахририятида тахрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди.

---

Бичими: 84x60 1/16. Times New Roman гарнитураси.  
Рақамли босма усулида босилди.  
Шартли босма табоғи: 4 б.т. Адади 100 дона.

"Complex Print" босмахонасида чоп этилган.  
Гувоҳнома № 10-3606, 10.12.2016 г.  
Босмахона манзили: Тошкент ш., Навоий кўч., 24  
Тел: +99871 244-40-89, +99890 808-05-12  
e-mail: complex.print@mail.ru