

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.03/30.12.2019.T.03.02 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ

ЖУМАБОВ САРВАРБЕК ХАМРАЕВИЧ

**НАЗОРАТ ВА БОШҚАРУВ ТИЗИМЛАРИ УЧУН ТОКЛАР ФАРҚИНИ
ЎЛЧОВЧИ ИНДУКЦИОН ЎЗГАРТИРГИЧЛАР**

**05.01.06 – Ҳисоблаш техникаси ва бошқарув тизимларининг элементлари ва
қурилмалари**

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

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)

Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)

Жумабоев Сарварбек Хамраевич

Назорат ва бошқарув тизимлари учун тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичлар..... 3

Жумабоев Сарварбек Хамраевич

Индукционные преобразователи разности токов для систем контроля и управления..... 19

Jumaboev Sarvarbek Hamraevich

Inductive current-difference transducer for monitoring and control systems..... 35

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works..... 38

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМий ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.03/30.12.2019.T.03.02 РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ

ЖУМАБОЕВ САРВАРБЕК ХАМРАЕВИЧ

**НАЗОРАТ ВА БОШҚАРУВ ТИЗИМЛАРИ УЧУН ТОКЛАР ФАРҚИНИ
ЎЛЧОВЧИ ИНДУКЦИОН ЎЗГАРТИРГИЧЛАР**

**05.01.06 – Ҳисоблаш техникаси ва бошқарув тизимларининг элементлари ва
қурилмалари**

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

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2021.1.PhD/T1110 рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент давлат транспорт университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз тилида (резюме)) Илмий кенгаҳ саҳифасида (www.tdtu.uz) ва «ZiyoNet» Ахборот таълим порталида (www.ziyo.net) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Амиров Султон Файзуллаевич
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Сиддиқов Илхомжон Хакимович
техника фанлари доктори, профессор

Назаров Хайридин Нуритдинович
техника фанлари номзоди, профессор

Ётақчи ташкилот:

“Ўзбекэнерго” АЖ “Илмий-техника маркази”
масъулияти чекланган жамияти

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника университети ҳузуридаги DSc.03/30.12.2019.T.03.02 рақамли Илмий кенгаҳнинг 2021 йил «15» 06 соат 10⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

Диссертация билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (207 рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2. Тел.: (99871) 246-03-41).

Диссертация автореферати 2021 йил «02» 06 куни тарқатилди.
(2021 йил «27» 02 даги 3 рақамли реестр баённомаси).



Н.Р. Юсупбеков
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаҳ раиси,
т.ф.д., профессор, академик

У.Ф. Мамиров
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаҳ илмий котиби,
техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)

Х.З. Игамбердиев
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаҳ
қошидаги илмий семинар раиси
т.ф.д., профессор, академик

Кириш (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда замонавий технологияларнинг ривожланиши электр энергияси истемолчиларининг ортишига олиб келмоқда. Шу жиҳатдан, сифатли энергия етказиш тизимларини ишлаб чиқишда электр таъминоти тизимидаги қурилмаларни назорат ва бошқарув тизимлари самодорлигини оширишда аниқ ўлчов мезонларга асосланган ўлчов воситалари ҳамда автоматик бошқариш қурилмаларини такомиллаштириш муҳим вазифалардан ҳисобланмоқда. Бу борада электр энергиясининг йирик истемолчилари бўлган металлургия, кимё саноати, метрополитен, темир йўл транспортидаги технологик жараёнлар ва қурилмаларни назорат ва бошқарув тизимлари учун катта тоқлар ва уларнинг фарқини юқори аниқликда ўлчовчи ўзгартиргичларни ишлаб чиқиш муҳим аҳамият касб этмоқда.

Жаҳонда электр таъминоти қурилмаларини назорат ва бошқариш тизимлари самарадорлигини ошириш, уларда кенг фойдаланиладиган ўлчаш ўзгартиргичларини такомиллаштиришга йўналтирилган илмий тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. Бу борада электр тармоғини узмасдан монтаж ва демонтаж қилиш имкониятини яратувчи катта тоқлар фарқини ўлчовчи ўзгартиргичларни ишлаб чиқиш, тўғрилагич-инверторли ўзгартиргичлар параллель шиналаридаги ўзгармас тоқлар фарқини ва электротехник қурилмалар уч фазали занжирлардаги тоқлар носимметриясини ўлчаш ҳамда бир вақтнинг ўзида бир-биридан индуктив жиҳатдан боғланмаган бир нечта чиқиш сигналларини олиш имкониятига эга бўлган ўлчаш ўзгартиргичларини яратиш зарурати юзага келмоқда.

Республикада темир йўл транспортидаги электровоз ва электр ҳаракат таркиблари ҳаракатланишининг хавфсизлигини таъминловчи воситаларни такомиллаштириш, жумладан электр таъминоти тизимидаги тақсимлаш қурилмаларини назорат ва бошқарув тизимларини ишлаб чиқиш бўйича чора тадбиқлар амалга оширилмоқда. Ўзбекистон Республикасини ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида «... миллий иқтисодиётнинг рақобатбардошлигини ошириш, ... транспорт-коммуникация ва социал-инфратузилмавий лойиҳаларни ечишга йўналтирилган фаол инвестицион сиёсат, ... ишлаб чиқаришни техник ва технологик янгилаш, ... ишлаб чиқаришга энергия тежовчи технологияларни кенг тадбиқ этиш»¹ каби вазифалари белгилаб берилган. Мазкур вазифаларни амалга оширишда, жумладан катта тоқлар фарқини ўлчовчи янги индукцион ўзгартиргичларни ва уларнинг математик моделларини ишлаб чиқиш, тарқоқ параметрли электр ва магнит чизиқли ва нозизиқ занжирларни ҳисоблаш усулларини ишлаб чиқиш, тоқлар фарқини ўлчовчи ўзгартиргичларини ривожлантириш зарур ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 23 августдаги ПҚ-3238-сон «Замонавий энергия самарадор ва энергия тежайдиган

¹Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони.

технологияларни янада жорий этиш чора-тадбирлари тўғрисида», 2017 йил 13 ноябрдаги ПҚ-3384-сон «Электр энергияси ва табиий газ назорати ва ҳисобининг автоматлаштирилган тизимини жадал жорий этиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожлантиришининг II. «Энергетика, энергия ва ресурстежамкорлик» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Назорат ва бошқарув тизимлари учун тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичларни ишлаб чиқиш бўйича долзарб масалаларни бажаришга қаратилган илмий тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи илмий марказларида ва олий таълим муассасаларида, жумладан University of Michigan ва General Electric, Bergen Laboratories Ins. (АҚШ), Technical University of Ilmenau ва Siemens, Siemens ва Halke (Германия), HAWK ва Davy and United Instruments (Буюк Британия), Sony ва Tokyo Technology Institute, Toshiba (Япония), ASEA (Швеция), Kelk Electronics (Канада), Москва энергетика институти, Самара давлат техника университети, Самара аэрокосмик университети, Пенза давлат университети, Ульяновск давлат техника университети, Уфа давлат авиация техника университети (Россия), Киев автоматика институти (Украина), Тошкент давлат техника университети ва Тошкент давлат транспорт университети (Ўзбекистон)да олиб борилмоқда.

Жаҳон миқёсида олиб борилган илмий тадқиқотлар натижасида тоқлар фарқини контактсиз ўлчаш ўзгартиргичларини ривожлантиришга кўплаб хорижий олимлар, жумладан P.Ripka, M.Johnson, A.Bruno, C.Lei, R.Arey, J.Kubik, M.Woytasik, Ю.В.Афанасьев, И.М.Сирота, Б.С.Стогний, С.А.Спектор, В.В.Серков, Г.В.Джикаев, М.К. Казаков, В.Е.Казанский Г.В.Абрамзон, Г.И.Разин, А.П.Щелкин, Н.Г.Семенов, Ю.А.Гамазов, Ю.А.Андреев, В.Е.Баранова ва бошқалар ҳамда тоқлар фарқини ўлчовчи электромагнит ўзгартиргичларни такомиллаштириш илмий муаммоларини ечишга мамлакатимиз олимлари М.Ф.Зарипов, А.М.Плахтиев, Н.А.Ахраров, И.Х.Сиддиков, С.Ф.Амиров, Г.П.Петров, А.М.Сафаров, Н.Савридинов, Б.Х.Хушбоков, Н.Е.Балгаев, Ф.Д.Назаров, Д.Ш.Рустамов, Н.А.Атауллаев, И.Х.Холиддинов, А.Б.Абубакиров ва бошқалар ўзларининг ҳиссаларини қўшганлар. Ушбу олимларнинг саъй-ҳаракатлари билан тоқлар фарқини контактсиз ўлчовчи ўзгартиргичларни лойиҳалаш ва ҳисоблаш назарий асослари ишлаб чиқилган ва ривожлантирилган, мазкур ўзгартиргичларнинг такомиллашган конструкциялари ва схемаларига оид ечимлар таклиф қилинган ва ишлаб чиқаришга жорий этилган.

Шу билан бирга, тўғрилагич-инверторли ўзгартиргичлар параллель шиналаридаги ўзгармас тоқлар фарқини ва электротехник қурилмалар уч фазага занжирларидаги тоқлар носимметрияси ўлчаш ҳамда бир вақтнинг ўзида бир-бирдан индуктив жиҳатдан боғланмаган бир нечта чиқиш

сигналларини олиш имкониятига эга бўлган ўлчаш ўзгартиргичларини ишлаб чиқиш масалалари етарли даражада ўрганилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент темир йўл муҳандислари институти илмий-тадқиқот ишлари режаларининг 3-сон «Темир йўл транспорти учун электромагнит ўлчаш воситаларини такомиллаштириш» (2018-2020) ва 33-сон «Юқори тезликдаги электр транспортининг электр таъминотида носимметрик режимларни тадқиқ этиш» (2017-2020) мавзулардаги илмий лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади назорат ва бошқарув тизимлари учун ўзгармас тоқлар фарқини ва уч фазали занжирлардаги тоқлар носимметриясини ўлчаш ҳамда бир вақтнинг ўзида бир-биридан индуктив жиҳатдан боғланмаган бир нечта чиқиш сигналларини олиш имкониятига эга бўлган индукцион ўзгартиргичларни ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

замонавий босқичда тоқлар фарқини ўлчаш масалаларини ўрганиш ҳамда назорат ва бошқарув тизимлари томонидан тоқлар фарқини ўлчовчи ўзгартиргичларга қўйиладиган асосий талабларни аниқ ифодалаш;

тоқлар фарқини ўлчовчи мавжуд ўзгартиргичлар асосий техник тавсифларининг қиёсий таҳлилинини ўтказиш, турини танлаш ва асослаш;

тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичларнинг янги конструкцияларини ишлаб чиқиш;

тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичларнинг математик моделларини ишлаб чиқиш;

тоқлар фарқини ўлчовчи ўзгартиргичларнинг асосий тавсифларини тадқиқ этиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида электротехник ва электроэнергетик қурилмаларнинг назорат ва бошқарув тизимлари учун тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичлар олинган.

Тадқиқотнинг предмети электротехник ва электроэнергетик қурилмаларда тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичларни ишлаб чиқиш ва уларнинг асосий техник тавсифларини ўрганиш ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида йиғиқ ва тарқоқ параметрли занжирларни ҳисоблаш, мунтазам ва тасодифий хатоликларни аниқлаш, параметрик структура схемаси усулларида ва турли физик табиатли занжирлар энергоинформацион моделларида фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

ўзгармас тоқлар фарқини ва уч фазали занжирлардаги тоқлар носимметриясини ўлчашни таъминловчи ҳамда бир вақтнинг ўзида бир-биридан индуктив жиҳатдан боғланмаган бир нечта чиқиш сигналларини олиш имконини берадиган индукцион ўзгартиргичларнинг янги конструкциялари ишлаб чиқилган;

тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичлар магнит материали асосий магнитланиш эгри чизигининг нозичиқлигини чизикли элементар

звенолар орқали ҳисобга олиш усули ишлаб чиқилган;

тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичларни кўп контурли электромагнит занжирларининг йиғиқ ва тарқоқ параметрлари ҳамда ночизик элементлари хусусиятларини инобатга олган ҳолда ўзаро таъсири аниқланган;

тоқлар фарқини ўлчовчи янги индукцион ўзгартиргичларнинг магнитомодуляцион ва трансформатор режимларининг асосий боғланишлари аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

тоқлар фарқини ўлчовчи кўп контурли электромагнит занжирларига эга бўлган янги индукцион ўзгартиргичларнинг статик, динамик ва метрологик тавсифларини тадқиқ этиш учун уларнинг параметрик структура схемалари ишлаб чиқилган;

параллель шиналардан ўтаётган ўзгармас тоқлар фарқини ва уч фазали занжирлардаги тоқлар носимметриясини кучланишга ўзгартириб берувчи юқори сезгирлик, аниқлик ва кенг ўлчаш диапазониغا эга бўлган ўлчаш қурилмаси ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги йиғиқ ва тарқоқ параметрли занжирларни ҳисоблаш усулларини, электр ва магнит майдонларини Максвелл тенгламаларига асосланган ҳисоблаш усулларини ўринли равишда қўллаш, шунингдек назарий ва экспериментал натижаларнинг ўзаро мос келиши билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти яратилган индукцион ўзгартиргичларнинг статик, динамик ва метрологик тавсифлари тенгламалари улардаги электр ва магнит занжирлари параметрларининг тарқоқлиги ва ферромагнит материал магнитланиш эгри чизигининг ночизиклигини инобатга олган ҳолда ишлаб чиқилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти параметрларининг тарқоқлиги ва магнит материали магнитланиш асосий эгри чизигининг ночизиклигини инобатга олувчи ночизик занжирларни ҳисоблаш усулини такомиллаштирилгани ва ишлаб чиқилган параметрик структура схемалари катта тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичлар техник тавсифларини яхшилангани ва уларни лойиҳалаш вақтини қисқартиришни таъминлаши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Назорат ва бошқарув тизимлари учун катта тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичлар ва уларнинг электромагнит занжирларини такомиллаштирилган ҳисоблаш усули асосида:

индукцион ўзгартиргич қурилмаси «Ўзбекистон темир йўллари» АЖнинг ЭЧ-1 - «Тошкент» электр таъминоти дистанциясига қарашли ЭЧЭ-2 «Чуқурсой» тортувчи нимстанциясида катта тоқлар фарқини ўлчаш учун жорий этилган («Ўзбекистон темир йўллари» АЖнинг 2021 йил 12 январдаги 01/139-21-сон маълумотномаси). Натижада, тоқлар фарқини ўлчаш

аниқлигининг ортиши ва бир вақтнинг ўзида бошқарув тизимига юқори аниқликдаги бир нечта ўлчаш маълумотларини бера олиш ҳисобидан тортувчи нимстанциясидаги электр энергияси исрофларини 6% га камайтириш имконини берган;

тоқлар фарқини ўлчовчи янги индукцион ўзгартиргичларнинг магнитомодуляцион ва трансформатор режимлари учун ишлаб чиқилган умумлашган математик моделлари ва тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичлар магнит материали асосий магнитланиш эгри чизиғининг ночизиклигини чизикли элементар ўзгартиргичлар комбинацияси ёрдамида инобатга олиш усули «Ўзбекистон темир йўллари» АЖ тасарруфидаги ЭЧ-1 - «Тошкент» электр таъминоти дистанциясининг «Чукурсой» тортиш нимстанциясида куч трансформаторлардаги катта тоқлар фарқини ўлчаш учун жорий этилган («Ўзбекистон темир йўллари» АЖнинг 2021 йил 12 январдаги 01/139-21-сон маълумотномаси). Натижада, катта тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичларни қўллаш бошқариш тизими аниқлигини 2% ошириш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 4 та халқаро ва 4 та республика илмий-техник анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 18 та илмий иш, шундан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий нашрларда 10 та мақола, жумладан, 3 та хорижий ва 7 та республика журналларида нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш қисми, тўртта боб, хулоса, адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ишининг ҳажми 128 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ишнинг долзарблиги асосланган, масаланинг ҳолати ёритилган, тадқиқот мақсади ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот объекти ва предмети ифодаланган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялар ривожланиши устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, ишнинг ишончлилиги, назарий ва амалий аҳамияти асосланган, диссертация тадқиқоти натижаларининг ишлаб чиқаришга жорий қилиниши кўрсатилган.

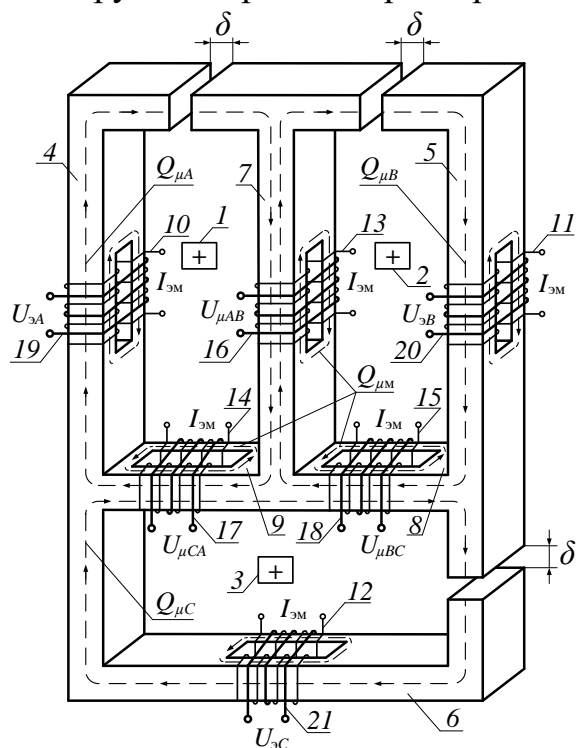
Диссертациянинг **“Масаланинг ҳолати ва тадқиқот вазифаларининг қўйилиши”** номли биринчи бобда ўтказилган технологик жараёнлардаги ўзгармас катта тоқларни назорат ва бошқарув тизимлари ва уч фазали занжирлардаги носимметрик режимни симметрияловчи автоматик қурилмалар таҳлили шуни кўрсатдики, уларда қўлланиладиган тоқлар фарқини ўлчовчи ўлчаш ўзгартиргичлари кенгайтирилган функционал имкониятларга, юқори сезгирлик, аниқликка ва ўлчаш диапазони бўйича чизикли ўзгартириш функциясига ҳамда экстремал шароитларда стабил характеристикаларга эга бўлиши аниқланди.

Катта тоқлар фарқини ўлчовчи ўзгартиргичлар асосий характеристикаларининг қиёсий таҳлили шуни кўрсатдики, технологик жараёнлардаги ўзгармас катта тоқларни назорат ва бошқарув тизимлари ва уч фазали занжирлардаги носимметрик режимни симметрияловчи автоматик қурилмалар талабларига кўп жиҳатдан индукцион ўзгартиргич(ИЎ)лар жавоб беради. Шу билан бирга, катта тоқлар фарқини ўлчовчи мавжуд ИЎ лар чекланган функционал имкониятларга эгаллиги аниқланди.

Адабиёт манбаларининг таҳлили натижалари ва қўйилган мақсадга мувофиқликдан келиб чиқиб, тадқиқотнинг асосий вазифалари белгиланди.

Диссертациянинг **“Тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичларнинг математик моделлари”** номли иккинчи бобда кенг функционал имкониятларга эга бўлган ИЎларнинг янги конструкциялари келтирилган, улар математик моделлари ишлаб чиқилган.

Уч фазали тоқлар носимметриясини ёки шиналардаги ўзгармас тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргич(ИЎ)нинг яратилган конструкцияларидан бири 1- расмда келтирилган.



1-расм. Тоқлар фарқини ўлчовчи янги электромагнит ўзгартиргич конструкцияси: 1, 2, 3 – тоқли шиналар; 4, 5, 6 ва 7, 8, 9 – уч контурли магнит ўтказгичнинг мос равишда ёндош бўлмаган ва ёндош стерженлари; 10, 11, 12 ва 13, 14, 15 – ёндош бўлмаган ва ёндош стерженлардаги модуляция чулғамлари; 16, 17, 18 ва 19, 20, 21 – мос равишда ёндош ва ёндош бўлмаган стерженлардаги ўлчаш чулғамлари; δ - ёндош бўлмаган стерженлардаги ҳаво оралиқлари

Яратилган ИЎнинг шу русумдаги мавжуд қурилмалардан афзал томонлари шундаки, биринчидан, у уч фазали ўзгарувчан ток занжирларидаги тоқлар носимметриясини ўлчашда ҳам, иккита шинадан ўтаётган ўзгармас тоқлар фарқини ўлчашда ҳам қўлланилиши мумкин, иккинчидан, қурилма бир вақтнинг ўзида ҳар бир шинадан ўтаётган токни ва шиналардаги тоқлар фарқини ўлчай олади, учинчидан, уч фазали ўзгарувчан ток занжирида бир-бири билан гальваник боғланмаган иккита чиқишдан занжирдаги тоқлар носимметрияси тўғрисида маълумот бера олади, тўртинчидан эса ёндош бўлмаган стерженлардаги ўлчаш занжирлари (ёндош бўлмаган стерженлардаги δ ҳаво оралиқлари мавжудлиги сабабли) деярли ўзаро индуктив боғланмаган.

Яратилган ИЎлар магнит занжирларининг математик моделларини ишлаб чиқишда улардаги ўлчанаётган тоқлар магнит оқимлари бирлашаётган

магнит занжирлари йиғиқ параметрли занжирлар туркумига, модуляция магнит занжирлари эса тарқоқ параметрли занжирлар туркумига мансуб деб ҳисоблаб, уларни ҳисоблашда магнит занжирларини тадқиқ этишда қабул қилинадиган чекловларни инобатга олган ҳолда занжирларнинг эквивалент алмашлаш схемаларини тузиш ҳамда дифференциал тенгламаларни тузиш ва ечишга асосланган классик усулларидан фойдаланилган.

Яратилган ИЎ ўлчанаётган тоқлар фарқларидан ҳосил бўлган магнит оқимлари бирлашадиган учта контурли ночизик магнит занжирининг қуйидаги математик модели ишлаб чиқилган:

$$l_{\mu x_{\text{пА}}} k_1 sh \left(k_2 \frac{Q_{\mu x A}}{S_{\mu x A}} \right) + \frac{Q_{\mu x A}}{1,1\mu_0 S_{\mu x A}} \delta + l_{\mu x_{\text{пАВ}}} k_1 sh \left[k_2 \frac{(Q_{\mu x A} - Q_{\mu x B})}{S_{\mu x A B}} \right] - l_{\mu x_{\text{сА}}} k_1 sh \left[k_2 \frac{(Q_{\mu x C} - Q_{\mu x A})}{S_{\mu x C A}} \right] = I_{\text{эА}}, \quad (1)$$

$$l_{\mu x_{\text{пВ}}} k_1 sh \left(k_2 \frac{Q_{\mu x B}}{S_{\mu x B}} \right) + \frac{Q_{\mu x B}}{1,1\mu_0 S_{\mu x B}} \delta - l_{\mu x_{\text{АВ}}} k_1 sh \left[k_2 \frac{(Q_{\mu x A} - Q_{\mu x B})}{S_{\mu x A B}} \right] - l_{\mu x_{\text{Вс}}} k_1 sh \left[k_2 \frac{(Q_{\mu x B} - Q_{\mu x C})}{S_{\mu x B C}} \right] = I_{\text{эВ}}, \quad (2)$$

$$l_{\mu x_{\text{пс}}} k_1 sh \left(k_2 \frac{Q_{\mu x C}}{S_{\mu x C}} \right) + \frac{Q_{\mu x C}}{1,1\mu_0 S_{\mu x C}} \delta + l_{\mu x_{\text{сА}}} k_1 sh \left[k_2 \frac{(Q_{\mu x C} - Q_{\mu x A})}{S_{\mu x C A}} \right] - l_{\mu x_{\text{Вс}}} k_1 sh \left[k_2 \frac{(Q_{\mu x B} - Q_{\mu x C})}{S_{\mu x B C}} \right] = I_{\text{эс}}, \quad (3)$$

бу ерда $Q_{\mu x A}$, $Q_{\mu x B}$, $Q_{\mu x C}$ – магнит занжирининг ёндош бўлмаган шохобчаларидаги магнит оқимлари, $[Wb]$; k_1 , k_2 – магнит материали асосий магнитланиш эгри чизиғи аппроксимация коэффициентлари, $[A/m]$; $[1/T]$; $l_{\mu x_{\text{пА}}}$, $l_{\mu x_{\text{пАВ}}}$, $S_{\mu x A}$, $S_{\mu x A B}$ – мос равишда магнит занжирининг ёндош бўлмаган ва ёндош шохобчалари узунликлари ва кесим юзалари, $[m]$; $[m^2]$.

(1) – (3) ночизик тенгламалар биргаликда Ньютоннинг сонли усули асосида ишлаб чиқилган дастурий восита ёрдамида Borland C++ Builder муҳитида ечилган. Ҳисоблаш натижалари шуни кўрсатадики, тадқиқ этилаётган учта контурли магнит занжирининг ёндош бўлмаган шохобчаларидаги δ ҳаво оралиқлари қийматининг камайиши билан магнит занжири магнит материали асосий магнитланиш эгри чизиғи ночизиклигининг таъсири сезиларли даражада ортиб боради.

Яратилган ИЎлар модуляция магнит занжирларининг улардаги электр ва магнит параметрлари тарқоқлигини инобатга олган ҳолда ишлаб чиқилган математик моделлари қуйидаги кўринишга эга бўлди:

$$Q_{\mu m}(x) = \frac{F_{\text{мп}}}{Z_{\mu \text{мп}}} - \frac{F_{\text{мп}}}{Z_{\mu \text{мп}} \Delta} \{sh[\gamma(X_m - x)] + sh(\gamma x)\} - \frac{2F_{\text{мп}}}{\gamma Z_{\mu \text{т}} \Delta} \{ch[\gamma(X_m - x)] + ch(\gamma x)\}, \quad (4)$$

$$U_{\mu m}(x) = \frac{2F_{\text{МП}}}{\gamma\Delta} \{ch(\gamma x) - ch[\gamma(X_m - x)]\} + \frac{2F_{\text{МП}}}{Z_{\mu\tau}C_{\mu\text{МП}}\Delta} \{sh(\gamma x) - sh[\gamma(X_m - x)]\}, \quad (5)$$

бу ерда $\Delta = \left[\left(1 + \frac{\gamma^2}{Z_{\mu\tau}^2 C_{\mu\text{МП}}^2} \right) sh(\gamma X_m) + \frac{\gamma}{Z_{\mu\tau} C_{\mu\text{МП}}} ch(\gamma X_m) \right], [-]; Q_{\mu m}(x), [Wb], U_{\mu m}(x), [A]$ - мос равишда ўзаро параллель ферромагнит стерженлардаги магнит оқими, ва улар орасидаги магнит кучланиш; $F_{\text{МП}}$ - модуляцияловчи чулғам магнит юритувчи куч(МЮК)ни магнит занжирининг узунлик бирлигига тўғри келадиган погон қиймати, $[A/m]; Z_{\mu\text{МП}} = 1/(\mu\mu_0 bh) = \rho_{\mu\ddot{y}p}/(bh), [1/(H \cdot m)]; C_{\mu\text{МП}} = \mu_0 b/\delta_m, [H/m]$ - мос равишда модуляция магнит занжиридаги ўзаро параллель жойлашган ферромагнит стерженлар магнит қаршиликлари ва улар орасидаги ҳаво оралиғи магнит сиғимини магнит занжирининг узунлик бирлигига тўғри келадиган погон қиймати; $\rho_{\mu\ddot{y}p} = \rho_{\mu\text{min}} + (\rho_{\mu\text{max}} - \rho_{\mu\text{min}})/2$ - ферромагнит стерженлар материали магнит қаршилигининг ўртача солиштирма қиймати, $[m^2/H]; \rho_{\mu\text{min}}$ ва $\rho_{\mu\text{max}}$ - стерженлар материали магнит қаршилиги солиштирма қийматининг ферромагнит стерженлардаги ишчи магнит индукциясининг мос равишда энг кичик ва энг катта қийматларига мос келувчи минимал ва максимал қийматлари; $Z_{\mu\tau}$ - узун параллель стерженларни ўзаро уловчи ферромагнит туташтиргич магнит қаршилиги, $[1/H]; \gamma = \sqrt{2Z_{\mu\text{МП}}C_{\mu\text{МП}}}, [1/m]$ - магнит оқимининг магнит занжири бўйлаб тарқалиш коэффициенти; x, X_m - координата ва унинг максимал қиймати, $[m]$.

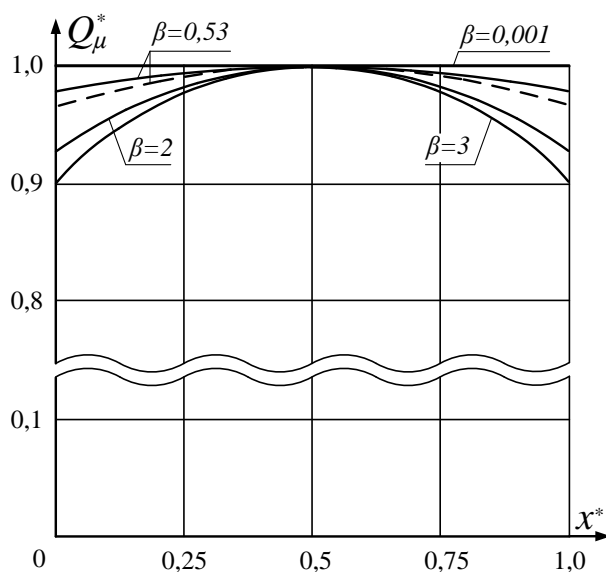
Магнит оқимининг магнит занжири бўйлаб сўниш коэффициенти ($\beta = \gamma X_m$)нинг турли қийматлари учун (4) ва (5) ифодалар ҳамда ўтказилган тажрибалар асосида қурилган $Q_{\mu m}^* = f(x^*)$ ва $U_{\mu m}^* = f(x^*)$ функциялар эгри чизиқлари (2- ва 3- расмлар) таҳлили шуни кўрсатдики, индуктив жиҳатдан ўзаро мос ва кетма-кет уланган ҳамда идеал бир хил иккита чулғами иккита идеал бир хил узун параллель ферромагнит стерженларда бир текис тақсимланган ҳолда жойлашган берк модуляция магнит занжирида ферромагнит стерженлардаги магнит оқими улар узунлигининг ўртасида максимум қийматга эга бўлиб, четларига томон β нинг қийматига боғлиқ равишда камайиб боради, ферромагнит стерженлар орасидаги магнит кучланиш қиймати эса улар узунлигининг ўртасида нолга тенг бўлиб, четларига томон β нинг қийматига боғлиқ равишда қарама-қарши ишоралар билан ортиб боради.

Яратилган ИЎнинг магнитомодуляцион ва трансформатор режимлари учун умумий бўлган математик модели қуйидаги кўринишга эга:

$$e_{\text{AB.чиқ}} = -w_{\ddot{y}l} S_{\mu\text{AB}} a_1 \left[\frac{\Delta H'_{xm} \omega_{\text{эх}} \cos(\omega_{\text{эх}} t + \varphi_{\mu x}) + H'_{\text{мм}} \omega_{\text{эм}} \cos(\omega_{\text{эм}} t + \varphi_{\mu m})}{\sqrt{1 + [\Delta H'_{xm} \sin(\omega_{\text{эх}} t + \varphi_{\mu x}) + H'_{\text{мм}} \sin(\omega_{\text{эм}} t + \varphi_{\mu m})]^2}} \right] -$$

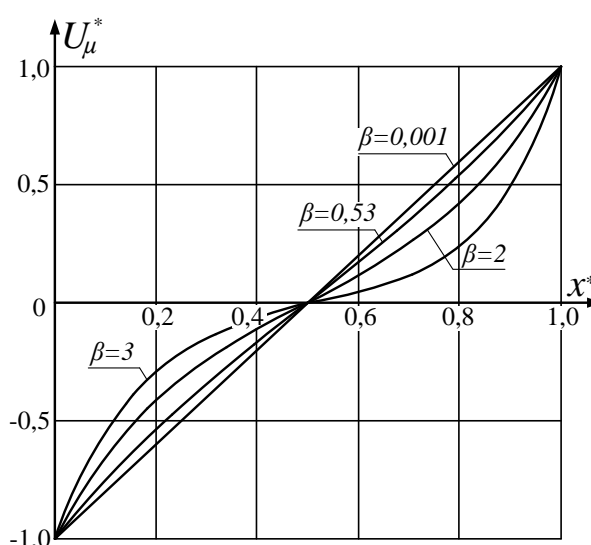
$$-w_{\text{ўл}} S_{\mu AB} a_1 \left[\frac{\Delta H'_{xm} \omega_{\text{эx}} \cos(\omega_{\text{эx}} t + \varphi_{\mu x}) - H'_{mm} \omega_{\text{эм}} \cos(\omega_{\text{эм}} t + \varphi_{\mu m})}{\sqrt{1 + [\Delta H'_{xm} \sin(\omega_{\text{эx}} t + \varphi_{\mu x}) - H'_{mm} \sin(\omega_{\text{эм}} t + \varphi_{\mu m})]^2}} \right], \quad (6)$$

бу ерда $w_{\text{ўл}}$ – ўлчаш чулғамининг ўрамлар сони; $a_1 = 1/k_2$; $\Delta H'_{xm} = \Delta H_{xm}/k_1$; $H'_{mm} = H_{mm}/k_1$; $\omega_{\text{эx}}$, $\varphi_{\mu x}$, $\omega_{\text{эм}}$, $\varphi_{\mu m}$ – мос равишда ёндош шиналардан ўтаётган тоқларни магнит занжирининг шиналар орасидаги шохобчасида ҳосил қилган магнит майдонлари кучланганликлари фарқи, шу шохобчадаги стерженларда модуляцияловчи ток ҳосил қилган магнит майдони кучланганлиги, бурчак частоталари ва уларнинг бошланғич фазалари, [A/m], [s^{-1}] ва [град].



2-расм. $Q_{\mu m}^*(x^*) = f(x^*)$

функциянинг β нинг турли қийматларидаги графиклари: узлукли эгри чизик – тажриба асосида олинган



3- расм. $U_{\mu m}^*(x^*) = f(x^*)$

функциянинг β нинг турли қийматларидаги графиклари

$H_x = \text{const}$ бўлганда, (6) ифода магнитомодуляцион режимда ишлайдиган ИЎ математик моделига, $H_x = H_{xm} \sin \omega_x t$ ва $H_m = 0$ бўлганда эса (6) ифода трансформатор режимда ишлайдиган ИЎ математик моделига ўтади.

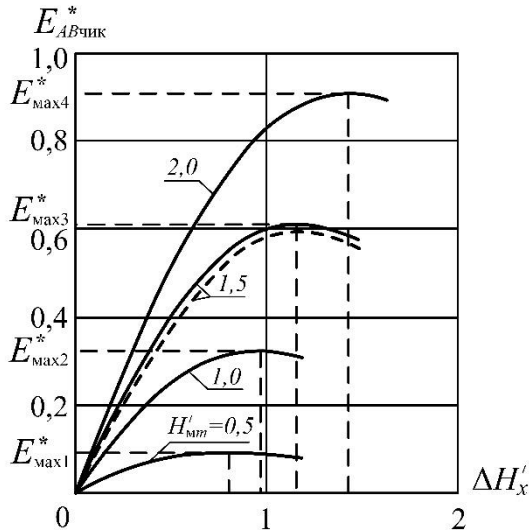
Диссертациянинг “**Тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичларнинг статик ва динамик характеристикалари**” номли учинчи боб ишлаб чиқилган ИЎларнинг магнитомодуляцион ва трансформатор режимлари учун статик ва динамик тавсифлари ўрганишга бағишланган.

Ўзгармас тоқлар фарқини ўлчаш режимда ишлаётган ИЎ статик характеристикасининг аналитик ифодаси қуйидагича ҳосил қилинди:

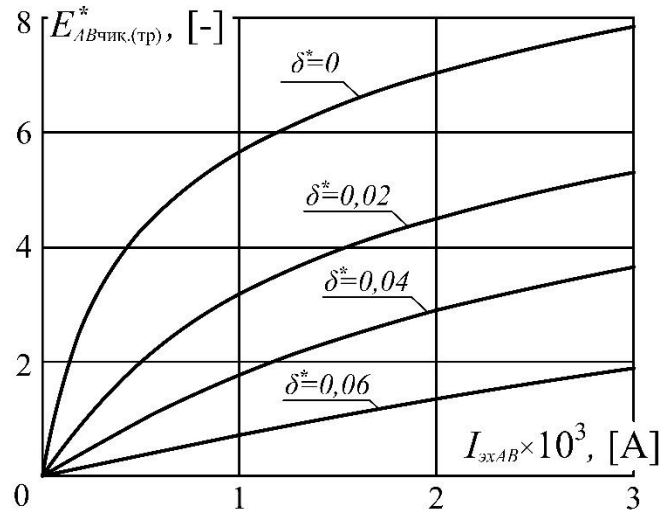
$$E_{\text{ABчик. (мм)}}^* = [2 \text{Arsh}(\Delta H'_x) - \text{Arsh}(\Delta H'_x + H'_{mm}) - \text{Arsh}(\Delta H'_x - H'_{mm})], \quad (7)$$

бу ерда $E_{\text{ABчик. (мм)}}^* = \frac{E_{\text{ABчик. (мм)}}}{E_0}$, [-]; $E_0 = \frac{2w_{\text{ўл}} S_{\mu AB}}{\pi k_2}$, [V].

(7) тенглама ва улар асосида қурилган графиклар (4- расм) таҳлили шуни кўрсатадики, модуляция чулғамига берилаётган ток (I_M) қийматининг ортиб бориши билан статик характеристикадаги функциянинг максимум қиймати ортиб боради ва у графикда ўлчанаётган тоқлар фарқи ($\Delta I_{\text{эx}}$) абсолют қийматининг ортиб бориши томонга қараб силжийди. Ўтказилган назарий ва экспериментал тадқиқотлар натижасида қурилган статик характеристикалар орасидаги фарқлар 8 – 12 % дан ошмаслиги аниқланди.



4- расм. Ўзгармас тоқлар фарқини ўлчовчи ИЎ статик характеристикалари



5- расм. Уч фазали занжирдаги тоқлар носимметриясини ўлчовчи ИЎнинг статик характеристикалари

Ўзгармас тоқлар фарқини ўлчовчи ИЎ сезгирлиги ва статик характеристикаси ночизиқлик даражасининг қуйидаги ифодалари олинди:

$$S_{(\text{мм})} = \frac{2}{\sqrt{1 + \Delta H'_x{}^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + (\Delta H'_x + H'_{\text{мт}})^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + (\Delta H'_x - H'_{\text{мт}})^2}} = 0, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{\text{мм}}, \% = \left\{ \frac{2\text{Arsh}\Delta H'_{x1} - \text{Arsh}(\Delta H'_{x1} - H'_{\text{мт}}) - \text{Arsh}(\Delta H'_{x1} + H'_{\text{мт}})}{[2\text{Arsh}\Delta H'_{x\text{max}} - \text{Arsh}(\Delta H'_{x\text{max}} - H'_{\text{мт}}) - \text{Arsh}(\Delta H'_{x\text{max}} + H'_{\text{мт}})]} - \frac{\Delta H'_{x1}}{2\Delta H'_{x\text{max}}} \right\} \cdot 100\%. \quad (9)$$

$\Delta H'_{x1} = 0,88$, $H'_{x\text{max}} = 0,92$ ва $H'_{\text{мт}} = 2,0$ қийматларда статик характеристика ночизиқлик даражаси $\varepsilon, \% = 2,45$ % ни ташкил этади.

Уч фазали тоқлар носимметриясини ўлчаш режимида ишлаётган ИЎ статик характеристикасининг аналитик ифодаси қуйидагича ҳосил қилинди:

$$E_{AB\text{чик(тр)}}^* = 2\text{Arsh} \left[\frac{I_{\text{эxAB}} Z_{\mu x2}}{l_{\mu AB} k_2 (Z_{\mu x1} + 3Z_{\mu x2})} \right], \quad (10)$$

бу ерда $I_{\text{эxAB}}$ – ёндош шиналардан ўтаётган ўзгарувчан тоқлар фарқи; $Z_{\mu x1} = W_{\mu x1} / \omega$; $Z_{\mu x2} = W_{\mu x2} / \omega$; $W_{\mu x1} = W_{\mu xp} + W_{\mu x\delta} = l_{\mu p} / (\mu \mu_0 S_{\mu}) + \delta / (\mu_0 S_{\mu})$; $W_{\mu x2} = l_{\mu 2} / (\mu \mu_0 S_{\mu})$ – мос равишда уч контурли магнит занжири ёндош бўлмаган ва ёндош шохобчаларининг магнит қаршилиги ва магнит қаттиқлиги.

(10) тенглама ва унинг асосида қурилган графиклар (5- расм) таҳлили шуни кўрсатадики, δ ҳаво оралиғининг нисбий қиймати ортиши билан статик характеристиканинг абцисса ўқи билан ҳосил қилган бурчаги камайиб боради ва унинг чизиқли қисмининг улуши ортиб боради.

Трансформатор режимида сезгирлиги ва статик характеристикаси ночизиқлик даражасининг қуйидаги ифодалари олинди:

$$S_{\text{тр}} = \frac{2l_{\mu AB}(Z_{\mu x1} + 3Z_{\mu x2})}{\sqrt{l_{\mu AB}^2(Z_{\mu x1} + 3Z_{\mu x2})^2 + a_1^2 Z_{\mu x2}^2 I_{\text{эх}AB}^2}}, \quad (11)$$

$$\varepsilon_{\text{тр}}, \% = \frac{\Delta H'_{x\text{max}} \text{Arsh}(\Delta H'_{x1}) - \Delta H'_{x1} \text{Arsh}(\Delta H'_{x\text{max}})}{2\Delta H'_{x\text{max}} \text{Arsh}(\Delta H'_{x\text{max}})} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Ўзгармас тоқлар фарқини ва уч фазали тоқлар носимметриясини ўлчаш режимларида ишлаётган янги ИЎнинг статик характеристикаларини параметрик структура усули ёрдамида тадқиқ этиш ҳамда унда биринчи марта магнит материали магнитланиш эгри чизиғининг ночизиқлигини чизиқли элементар ўзгартиргичларнинг тегишли комбинацияси орқали инобатга олиш услуби ишлаб чиқилди.

Магнитомодуляцион режимда ишлаётган ИЎнинг ПСС усули ёрдамида ҳосил қилинган чиқиш сигнали қуйидагига тенг:

$$U_{\text{э.чиқ.}(мм)}^{\text{ўр.}} = U_{\text{э.01}} \Delta I_{\text{эх}}^* - U_{\text{э.02}} \Delta I_{\text{эх}}^{*3}, \quad (13)$$

бу ерда $U_{\text{э.01}} = \pi w_{\text{чиқ.}} \omega_M U_{\mu\text{тт}}^2 (5K_3 U_{\mu\text{тт}}^2 - 3K_2) \Delta I_{\text{эх}max} = K_4 \Delta I_{\text{эх}max}$, [V];
 $U_{\text{э.02}} = 10\pi w_{\text{чиқ.}} \omega_M K_3 U_{\mu\text{тт}}^2 \Delta I_{\text{эх}max}^3 = K_5 \Delta I_{\text{эх}max}^3$, [V]; $\Delta I_{\text{эх}}^* = \frac{\Delta I_{\text{эх}}}{\Delta I_{\text{эх}max}}$, [-]
 $\Delta I_{\text{эх}max}$ – ИЎ ўлчаш диапазонининг юқори чегараси, [A].

(13) тенглама ва унинг асосида қурилган графиклар таҳлили шуни кўрсатадики, ПСС усули ёрдамида ҳосил қилинган статик характеристикалар натижалари тажриба натижаларидан 7÷13 % оралиғида фарқ қилади, холос.

Яратилган ИЎ динамик характеристикалари тадқиқ этилган. ИЎ ўзгармас тоқлар фарқини ўлчаш режимида ишлаганда, унинг кириш катталиги пульсацияланувчи қонуният билан ўзгарганда шиналар оралиғидаги магнит ўтказгичда ўрнатилган ўлчаш чулғамида ҳосил бўлган ўткинчи кучланиш учун қуйидаги ифода ҳосил қилди:

$$U_{\text{э}AB2}(t) = U_{\text{э}AB21} e^{-\frac{1}{T_{\mu x}} t} \sin 2\omega_M t + U_{\text{э}AB22} e^{-\frac{1}{T_{\mu M}} t} \sin 2\omega_M t - U_{\text{э}AB23} [\sin[(2\omega_M + \omega_x)t + \varphi] - \sin[(2\omega_M - \omega_x)t - \varphi]], \quad (14)$$

бу ерда $U_{\text{э}AB21} = \frac{C_{\mu\text{ўр}} \omega_M K_2 I_{\text{э}AB\text{т}} (R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} - C_{\mu 12} R_{\mu 2} C_{\mu 2}) R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2}}{(C_{\mu 12})^2 R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} + (R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2})^3 \omega_x^2 - (C_{\mu 12})^3 T_{\mu M} + (R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2})^2 C_{\mu 12} T_{\mu M} \omega_x^2}$, [V];

$U_{\text{э}AB22} = \frac{C_{\mu\text{ўр}} \omega_M K_2 I_{\text{э}AB\text{т}} (R_{\mu 2} C_{\mu 2} - T_{\mu M}) T_{\mu M}}{R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} + R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} (T_{\mu M})^2 \omega_x^2 - C_{\mu 12} T_{\mu M} - C_{\mu 12} (T_{\mu M})^3 \omega_x^2}$, [V];

$U_{\text{э}AB23} = \frac{C_{\mu\text{ўр}} \omega_M K I_{\text{э}AB\text{т}} \sqrt{M^2 + N^2}}{2Z^2}$, [V]; $\varphi = \arctg \frac{N}{M}$;

$$N = R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} T_{\mu M} \omega_x^2 - C_{\mu 12} - R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} R_{\mu 2} C_{\mu 2} \omega_x^2 - C_{\mu 12} T_{\mu M} R_{\mu 2} C_{\mu 2} \omega_x^2, [H];$$

$$M = R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} \omega_x + C_{\mu 12} T_{\mu M} \omega_x + R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} T_{\mu M} R_{\mu 2} C_{\mu 2} \omega_x^3 - C_{\mu 12} R_{\mu 2} C_{\mu 2} \omega_x, [H];$$

$$Z^2 = (R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2})^2 \omega_x^2 + (R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2})^2 T_{\mu M}^2 \omega_x^6 + (C_{\mu 12} \omega_x)^2 + C_{\mu 12}^2 T_{\mu M}^2 \omega_x^4, [\Omega^2];$$

$$R_{\mu 12}, [S]; R_{\mu 2}, [S]; C_{\mu 1}, [H]; C_{\mu 2}, [H]; T_{\mu x} = \frac{(R_{\mu 1} + R_{\mu 2}) C_{\mu 1} C_{\mu 2}}{3 C_{\mu 1} + C_{\mu 2}}, [s] - \text{ўлчаш магнит}$$

занжирининг мос равишда актив қаршиликлари, магнит сиғимлари ва вақт доимийси; $T_{\mu M} = R_{\mu M} C_{\mu M \text{ўр}}, [s] - C_{\mu M \text{ўр}}, [H] - \text{модуляция магнит занжирининг вақт доимийси, актив қаршилиги ва магнит сиғимининг ўртача қиймати}; K_2 - \text{пропорционаллик коэффиценти.}$

Киришига ω частотали уч фазали синусоидал ток берилган ИЎ битта ўлчаш чулғамидаги ўткинчи кучланиш:

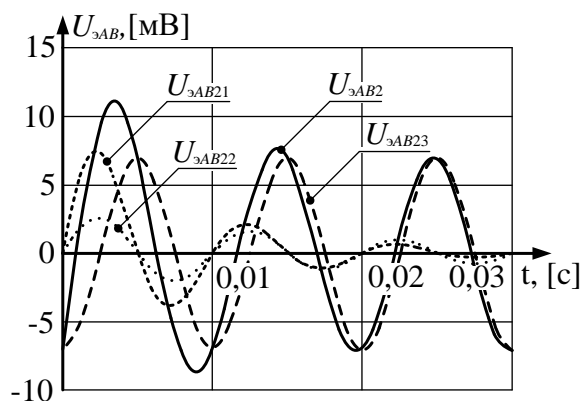
$$U_{\text{э}AB}(t) = U_{\text{э}AB1} e^{-\frac{t}{T_{\mu x}}} + U_{\text{э}AB2} \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right), \quad (15)$$

$$\text{бу ерда } U_{\text{э}AB1} = \frac{D[I_{\text{э}1} C_{\mu 12} - I_{\text{э}2} R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} \omega]}{R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} (C_{\mu 12}^2 + R_{\mu 12}^2 C_{\mu 1}^2 C_{\mu 2}^2 \omega^2)}, [V];$$

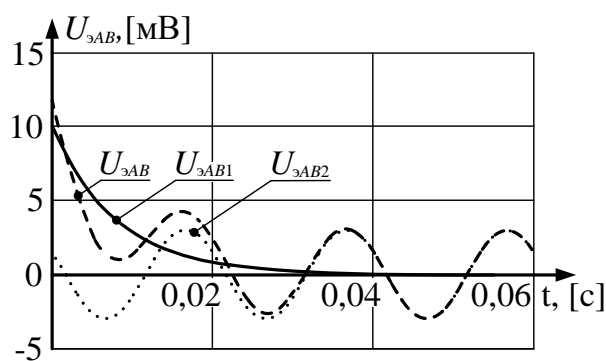
$$U_{\text{э}AB2} = \frac{K_{I_{\mu} U_{\text{э}}} C_{\mu 1} C_{\mu 2} \omega \sqrt{I_{\text{э}1}^2 + I_{\text{э}2}^2}}{\sqrt{(3C_{\mu 1} + C_{\mu 2})^2 + (R_{\mu 1} + 3R_{\mu 2})^2 C_{\mu 1}^2 C_{\mu 2}^2 \omega^2}}, [V]; D = K_{I_{\mu} U_{\text{э}}} C_{\mu 1} C_{\mu 2} C_{\mu 12}, [1/H^3];$$

$$\varphi = \arctg \frac{(3C_{\mu 1} + C_{\mu 2}) I_{\text{э}1} - (R_{\mu 1} + R_{\mu 2}) C_{\mu 1} C_{\mu 2} \omega I_{\text{э}2}}{(3C_{\mu 1} + C_{\mu 2}) I_{\text{э}2} - (R_{\mu 1} + R_{\mu 2}) C_{\mu 1} C_{\mu 2} \omega I_{\text{э}1}}.$$

(14) ва (15) тенгламалар ва унинг асосида қурилган графиклар таҳлили шуни кўрсатадики, магнитомодуляцион режимда ишлаётган ИЎ киришига ω_x частотали синусоидал ток берилганда, шиналар оралиғидаги магнит ўтказгичда ўрнатилган ўлчаш чулғами чиқишидаги ўткинчи кучланиш частотаси модуляцияловчи занжир токи иккиланган частотаси ($2\omega_M$) га тенг бўлган турғун ва экспоненциал сўнувчи, частоталари эса мос равишда $(2\omega_M + \omega_x)$ ва $(2\omega_M - \omega_x)$ га тенг бўлган иккита эркин гармоник ташкил этувчилар йиғиндисидан иборат бўлади (6- расм). Уч



6- расм. Киришига гармоник қонуният билан пульсацияланувчи ўзгармас тоқлар фарқи берилган ИЎ битта ўлчаш чулғамидаги ўткинчи кучланиш графиклари



7- расм. Киришига ω частотали уч фазали синусоидал ток берилган ИЎ битта ўлчаш чулғамидаги ўткинчи кучланиш графиклари

фазали тоқлар носимметриясини ўлчаш режимида ишлаётган ИЎ киришига уч фазали синусоидал ток берилганда, ўткинчи кучланиш синусоидал турғун ва экспоненциал сўнувчи эркин ташкил этувчилар йиғиндисидан иборат бўлади (7- расм).

Диссертация ишининг “**Тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичларнинг хатолиги ва ишончлилиги**” номли тўртинчи бобида магнитомодуляцион ва трансформатор режимлари учун яратилган ИЎларнинг хатолик манбаларини аниқлаш, уларни таҳлил этиш, баҳолаш, ИЎлар ишончлилиги масалалари ўрганилган ҳамда уларнинг асосий техник характеристикалари келтирилган.

Тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичлар хатолик манбаларини аниқлаш шуни кўрсатдики, ташқи ўзгарувчан ва ўзгармас магнит майдонлари, ҳарорат ҳамда модуляция занжирини таъминлаб турувчи манба токи параметрларининг нормал қийматларидан оғиши тадқиқ этилаётган ИЎда аддитив ва мультипликатив хатоликлар мунтазам ва тасодифий ташкил этувчиларининг манбалари ҳисобланади. Магнитомодуляцион режимида ишлаётган яратилган индукцион ўзгартиргичлар келтирилган хатолигининг мунтазам ва тасодифий ташкил этувчилари мос равишда 0,68% ва 1,28% дан, шу ўзгартиргич трансформатор режимида ишлаётганда эса - мос равишда 0,57% ва 1,06% дан ошмаслиги аниқланди.

Тадқиқот ишида яратилган ИЎларнинг ишончлилиги ўрганилган. Уларнинг ишдан чиқишига сабаб бўлувчи модуляция ва ўлчаш чулғамларида симларнинг рухсат этилган қизиш ҳарорати ($T_{рух.} = 90^{\circ}\text{C}$) ва унинг ўзгариши $20^{\circ}\text{C} \div 110^{\circ}\text{C}$ ораликда бўлганда ишонччилик ($0,98 \div 0,83$) ораликда, $T_{рух.} = 140^{\circ}\text{C}$ ва ҳарорат юқорида келтирилган ораликда ўзгарганда эса - ($0,98 \div 0,92$) ораликда бўлиши аниқланди.

Тортиш нимстанцияси фидерларидаги тоқлар фарқини ўзгартириш учун ишлаб чиқилган ИЎни қўллаш бошқарув аниқлигини ошириш имконини берди. Кутилаётган иқтисодий самарадорлик 130,8 млн. сўмни ташкил этди.

Диссертация иловаларида турли физик табиатга эга занжирлари энергоинформацион моделларининг асосий мезонлари ва параметрик структура схемалари аппаратининг элементлари, ИЎлар характеристикаларини тадқиқ этишда фойдаланилган физик-техник эффектлар ва параметрлар маълумотлари, шунингдек диссертация натижаларини ишлаб чиқаришга жорий этиш акти ва маълумотномаси келтирилган.

ХУЛОСА

“Назорат ва бошқарув тизимлари учун тоқлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичлар” диссертация ишини бажариш жараёнида қуйидаги илмий натижалар олинган:

1. Технологик жараёнлардаги ўзгармас катта тоқларни назорат ва бошқарув тизимлари ва уч фазали занжирлардаги носимметрик режимни симметрияловчи автоматик қурилмалар таҳлили шуни кўрсатдики, уларда қўлланиладиган тоқлар фарқини ўлчовчи ўлчаш ўзгартиргичлари

кенгайтирилган функционал имкониятларга, юқори сезгирликка, аниқликка ва ўлчаш диапазони бўйича чизиқли ўзгартириш функциясига ҳамда экстремал шароитларда мутадил характеристикаларга эга бўлиши, ушбу талабларга кўп жиҳатдан индукцион ўлчаш ўзгартиргичлари жавоб бериши аниқланди.

2. Токлар фарқини ўлчовчи индукцион ўзгартиргичлар янги конструкциялари ишлаб чиқилди. Улар бир вақтнинг ўзида ҳар бир шинадан ўтаётган токни ва шиналардаги токлар фарқини ўлчай олиши ҳамда бир-бири билан гальваник боғланмаган иккита чиқишдан занжирдаги токлар фарқи тўғрисида маълумот бера олиши билан мавжуд ўзгартиргичлардан афзал эканлиги аниқланди.

3. Яратилган индукцион ўзгартиргичлар ўлчанаётган токлар чизиқли ва ночизиқ магнит занжирларининг ҳамда модуляция магнит занжирларининг математик моделлари электр ва магнит занжирлари параметрларининг тарқоқлигини инобатга олган ҳамда магнитомодуляцион ва трансформатор режимлари учун умумий бўлган математик моделлари ишлаб чиқилди.

4. Ўзгармас токлар фарқини ўлчаш (магнитомодуляцион) режимида ишлаётган янги индукцион ўзгартиргич статик характеристикаси графикларининг таҳлили шуни кўрсатдики, модуляция чулғамига берилаётган ток қийматининг ортиб бориши билан статик характеристика графигидаги максимум қиймати ортиб боради ва у графикда ўлчанаётган токлар фарқи абсолют қийматининг ортиб бориши томонга қараб силжийди. Натижада индукцион ўзгартиргичларни лойиҳалаш жараёнини соддалаштириш имконини беради.

5. Ўзгармас токлар фарқини ва уч фазали токлар носимметриясини ўлчаш режимларида ишлаётган янги индукцион ўзгартиргичнинг статик характеристикаларини параметрик структура усули ёрдамида тадқиқ этиш ҳамда унда магнит материали магнитланиш эгри чизиғининг ночизиқлигини элементар ўзгартиргичларнинг тегишли комбинацияси орқали инобатга олиш услуги ишлаб чиқилди.

6. Ўзгармас токлар фарқини ўлчаш режимида ишлаётган янги индукцион ўзгартиргич киришига сакраб ўзгарувчи ўзгармас ток берилганда шиналар оралиғидаги магнит ўтказгичда ўрнатилган ўлчаш чулғами чиқишидаги ўткинчи кучланиш частотаси иккиланган модуляция частотасига тенг бўлган турғун ва амплитудалари мос равишда ўлчаш ва модуляция магнит занжирлари вақт доимийларига боғлиқ ҳолатда экспоненциал сўнувчи иккита эркин гармоник ташкил этувчилар йиғиндисидан иборат бўлади. Натижада индукцион ўзгартиргич динамик режимларини танлаш имконини беради.

7. Магнитомодуляцион режимида ишлаётган яратилган индукцион ўзгартиргичлар келтирилган хатолигининг мунтазам ва тасодифий ташкил этувчилари мос равишда 0,68% ва 1,28% дан, шу ўзгартиргич трансформатор режимида ишлаётганда эса - мос равишда 0,57% ва 1,06% дан ошмаслиги аниқланди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.Т.03.02 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ЖУМАБОВ САРВАРБЕК ХАМРАЕВИЧ

**ИНДУКЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ РАЗНОСТИ ТОКОВ ДЛЯ
СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

**05.01.06 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем
управления**

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

Ташкент – 2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2021.1.PhD/Т1110.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном транспортном университете.

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

Научный руководитель:

Амиров Султон Файзуллаевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Сиддиқов Илхомжон Хақимович
доктор технических наук, профессор

Назаров Хайридин Нуритдинович
кандидат технических наук, профессор

Ведущая организация:

ООО «Научно-технический центр»
АО «Ўзбекэнерго»

Защита диссертации состоится «15» 06 2021 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.T.03.02 при Ташкентском государственном техническом университете (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (зарегистрировано №207). (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 246-03-41).

Автореферат диссертации разослан «02» 06 2021 года.
(реестр протокола рассылки № 3 от «27» 02 2021 года).



Н.Р. Юсупбеков
Председатель Научного совета
по присуждению учёных степеней,
д.т.н., профессор, академик

У.Ф. Маиров
Ученый секретарь Научного совета
по присуждению учёных степеней,
доктор философии (PhD) по техническим наукам

Х.З. Игамбердиев
Председатель научного семинара
при Научном совете по присуждению учёных степеней,
д.т.н., профессор, академик

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Во всем мире развитие современных технологий приводит к увеличению потребителей электроэнергии. Исходя из этого, совершенствование измерительных приборов, основанных на критериях точного измерения, и устройств автоматического управления является важной задачей при разработке систем поставки качественной энергии и повышении эффективности систем контроля и управления устройств в системе электроснабжения. В этой связи, большое значение имеет разработка высокоточных измерительных преобразователей разности больших токов в системах контроля и управления технологическими процессами и устройствами для основных потребителей электроэнергии в металлургии, химической промышленности, метрополитена и железнодорожного транспорта.

В мире ведутся научные исследования по созданию систем контроля и управления устройствами электроснабжения с измерительными преобразователями. В связи с этим, разработка измерительных преобразователей разности больших токов, позволяющие производить монтаж и демонтаж без отключения от электрической сети, измерять разности постоянных токов в параллельных шинах выпрямительно-инверторных преобразователей и несимметрию токов в трехфазных цепях электротехнических устройств, а также имеющих возможность одновременного получения нескольких выходных сигналов, индуктивно не связанных между собой является одним из важнейших задач.

В республике осуществляются мероприятия по усовершенствованию средств, обеспечивающих безопасность движения электровозов и электроподвижных составов железнодорожного транспорта, в том числе разработка систем контроля и управления распределительных устройств системы электроснабжения. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан поставлены задачи «... повышение конкурентоспособности национальной экономики, ... осуществление активной инвестиционной политики, направленной на решение транспортно-коммуникационных и социально-инфраструктурных проектов, ... техническое и технологическое обновление производства, ... широкое внедрение в производство энергосберегающих технологий»¹. Реализация данных целей, а также разработка новых индукционных преобразователей и их математических моделей для измерения разности больших токов, разработка методов расчета линейных и нелинейных электрических и магнитных цепей с распределенными параметрами, совершенствование измерительных преобразователей разности токов является одним из важнейших задач.

Данное диссертационное исследование в определенной мере служит осуществлению поставленных нормативно-правовых задач, а именно: Указ

¹ Указ Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года “О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан”.

Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 г. № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановление № ПП-3238 от 23 августа 2017 года «О мерах по дальнейшему внедрению современных энергоэффективных и энергосберегающих технологий», Постановление № ПП-3384 от 13 ноября 2017 года «О мерах по ускоренному внедрению автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии и природного газа» и другими нормативными актами, относящимися к данной деятельности.

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».

Степень изученности проблемы. Научные исследования, направленные на решение актуальных задач, связанных с разработкой индукционных преобразователей разности больших токов для систем контроля и управления, ведутся в ряде ведущих научных центров и высших учебных заведениях мира, в том числе: University of Michigan и General Electric, Bergen Laboratories Ins. (США), Technical University of Ilmenau и Siemens, Siemens и Halke (Германия), HAWK и Davy and United Instrumets (Великобритания), Sony и Tokyo Technology Institute, Toshiba (Япония), ASEA (Швеция), Kelk Electronics (Канада), Московском энергетическом институте, Самарском государственном техническом университете, Самарском государственном аэрокосмическом университете, Пензенском государственном университете, Ульяновском государственном техническом университете, Уфимском государственном авиационно-техническом университете (Россия), Киевском институте автоматики (Украина), Ташкентском государственном техническом университете и Ташкентском государственном транспортном университете (Узбекистан).

В результате научных исследований, проводимых во всем мире, определенный вклад в решение научных проблем, связанных с развитием преобразователей, позволяющих бесконтактно измерять разность токов, внесли иностранные ученые, такие как P.Ripka, M.Johnson, A.Bruno, C.Lei, R.Arey, J.Kubik, M.Woytasik, Ю.В.Афанасьев, И.М.Сирота, Б.С.Стогний, С.А.Спектор, В.В.Серков, Г.В.Джикаев, М.К.Казаков, В.Е.Казанский, Г.В.Абрамзон, Г.И.Разин, А.П.Щелкин, Н.Г.Семенко, Ю.А.Гамазов, Ю.А.Андреев, В.Е.Баранова и другие, а так же, для решения научных задач по усовершенствованию электромагнитных преобразователей, измеряющих разность токов, внесли свой вклад и отечественные ученые М.Ф.Зарипов, А.М.Плахтиев, Н.А.Ахраров, И.Х.Сиддигов, С.Ф.Амиров, Г.П.Петров, А.М.Сафаров, Н.Савридинов, Б.Х.Хушбоков, Н.Е.Балгаев, Ф.Д.Назаров, Д.Ш.Рустамов, Н.А.Атауллаев, И.Х.Холиддинов, А.Б.Абубакиров и другие. Усилиями этих ученых были разработаны и усовершенствованы теоретические основы проектирования и расчета бесконтактных измерительных преобразователей разности токов, предложены и внедрены в производство оригинальные конструкции и схемы данных преобразователей.

Вместе с тем, недостаточно изучены вопросы разработки измерительных преобразователей, способных измерять разность постоянных токов в параллельных шинах электрооборудования выпрямительно-инверторных преобразователей и несимметрию токов в трехфазных цепях электротехнических устройств, а также позволяющих получать одновременно несколько выходных сигналов, индуктивно не связанных между собой.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта №3 «Совершенствование электромагнитных измерительных средств для железнодорожного транспорта» (2018-2020) и в рамках научных проектов по теме № 33 «Исследование несимметричных режимов при электроснабжении высокоскоростного электрического транспорта» (2017-2020 гг.).

Целью исследования является разработка индукционных преобразователей, обеспечивающих измерение разности переменных токов и несимметрию токов в трехфазных цепях, а также имеющих возможность одновременного получения нескольких выходных сигналов, индуктивно не связанных между собой для систем контроля и управления.

Задачи исследования:

изучение вопросов измерения разности токов на современном этапе и четкая формулировка основных требований систем контроля и управления к преобразователям разности больших токов;

проведение сравнительного анализа основных технических характеристик, выбор и обоснование типа существующих преобразователей разности токов;

разработка новых конструкций индукционных преобразователей разности токов;

разработка математических моделей индукционных преобразователей разности токов;

исследование основных характеристик индукционных преобразователей разности токов.

Объектом исследования выбраны индукционные преобразователи разности токов для систем контроля и управления электротехническими и электроэнергетическими устройствами.

Предметом исследования является разработка индукционных преобразователей разности токов электротехнических и электроэнергетических устройств и исследование их основных технических характеристик.

Методы исследования. В процессе исследования использованы методы расчета электрических и магнитных цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами, методы определения систематических и случайных погрешностей, энергоинформационные модели цепей различной физической природы и метод параметрических структурных схем.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработаны новые конструкции индукционных преобразователей разности токов, обеспечивающих измерение разности постоянных токов и несимметрию токов в трехфазных цепях, а также имеющих возможность одновременного получения нескольких выходных сигналов, индуктивно не связанных между собой;

разработан метод учета нелинейности основной кривой намагничивания магнитного материала индукционных преобразователей разности токов с использованием линейных элементарных звеньев;

установлено взаимодействие многоконтурных электромагнитных цепей для индукционных преобразователей разности токов с учетом их сосредоточенных и распределенных параметров, а также особенности их нелинейных элементов;

выявлены основные зависимости магнитомодуляционных и трансформаторных режимов новых индукционных преобразователей разности токов.

Практические результаты исследования:

разработаны параметрические структурные схемы для исследования статических, динамических и метрологических характеристик новых индукционных преобразователей разности токов с многоконтурными электромагнитными цепями;

разработано устройство для преобразования разности постоянных токов в параллельных шинах и несимметрии токов в трехфазных цепях в напряжение с высокой чувствительностью, точностью и широким диапазоном.

Достоверность полученных результатов исследования обосновывается корректным применением методов расчета цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами, методов расчета электромагнитного поля на основе уравнений Максвелла, а также подтверждается соответствием теоретических и экспериментальных результатов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования характеризуется полученными уравнениями статических, динамических и метрологических характеристик с учетом распределенности параметров электромагнитных цепей и нелинейности кривой намагничивания ферромагнитного материала.

Практическая значимость результатов исследований заключается в совершенствовании методики расчета нелинейных цепей с учетом распределенности параметров и нелинейности кривой намагничивания магнитного материала. Разработанные параметрические структурные схемы способствуют улучшению технических характеристик индукционных преобразователей разности больших токов и обеспечивают сокращение сроков их проектирования.

Внедрение результатов исследований. На основе индукционных преобразователей разности больших токов для систем контроля и управления и усовершенствованной методики расчета их электромагнитных цепей:

индукционный преобразователь внедрен для измерения разности

больших токов на тяговой подстанции ЭЧЭ-2 «Чукурсой» дистанции электроснабжения ЭЧ-1- «Ташкент» АО «Ўзбекистон темир йўллари» (Справка № 01/139-21- от 12 января 2021 г. АО «Ўзбекистон темир йўллари»). В результате появляется возможность снижения потери электроэнергии на тяговой подстанции на 6% за счет повышения точности измерения разности токов и возможности одновременного предоставления в систему управления несколько высокоточной измерительной информации;

обобщенные математические модели новых индукционных преобразователей разности токов для магнитомодуляционных и трансформаторных режимов, а также метод учета нелинейности основной кривой намагничивания магнитного материала индукционных преобразователей разности токов с использованием комбинаций линейных элементарных преобразователей внедрены для измерения больших токов в силовых трансформаторах на тяговой подстанции ЭЧЭ-2 «Чукурсой» дистанции электроснабжения ЭЧ-1- «Ташкент» АО «Ўзбекистон темир йўллари» (Справка № 01/139-21- от 12 января 2021 г. АО «Ўзбекистон темир йўллари»). Применение индукционных преобразователей разности токов, позволило повысить точность системы контроля и управления на 2%.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационного исследования докладывались, обсуждались и получили одобрение и поддержку на 4 международных и на 4 республиканских конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них 10 в журнальных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, в том числе 3 в иностранных и 7 в республиканских журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем диссертации составляет 128 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, освещено состояние вопроса, сформулированы цель и задачи исследования, характеризуется объект и предмет исследования, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологии республики, излагаются научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов научных исследований в производство.

В первой главе диссертации «**Состояние проблемы и постановка исследовательских задач**» был проведен анализ автоматических устройств контроля и управления постоянными большими токами в технологических процессах, позволяющих симметризовать несимметричный режим в трехфазных цепях, где было выявлено, что используемые в данных системах преобразователи, измеряющие разность токов, обладают расширенными

функциональными возможностями, точностью и линейной функцией преобразования во всем диапазоне измерения, а также стабильными характеристиками в экстремальных условиях.

Сравнительный анализ основных характеристик измерительных преобразователей разности больших токов показал, что индукционные преобразователи (ИП) во многом удовлетворяют требованиям систем контроля и управления технологических процессов с постоянными большими токами и автоматических устройств, позволяющих симметризовать несимметричный режим в трехфазных цепях. Вместе с тем, было выявлено, что существующие ИП, измеряющие разность больших токов, имеют ограниченные функциональные возможности.

Исходя из результатов анализа литературных источников и поставленной цели, были определены основные задачи исследования.

Во второй главе диссертации «**Математические модели индукционных преобразователей разности токов**» представлены новые конструкции ИП с широкими функциональными возможностями, разработаны их математические модели.

Одна из конструкций индукционного преобразователя (ИП), измеряющая несимметрию трехфазных токов и разность постоянных токов на шинах, показана на рисунке 1.

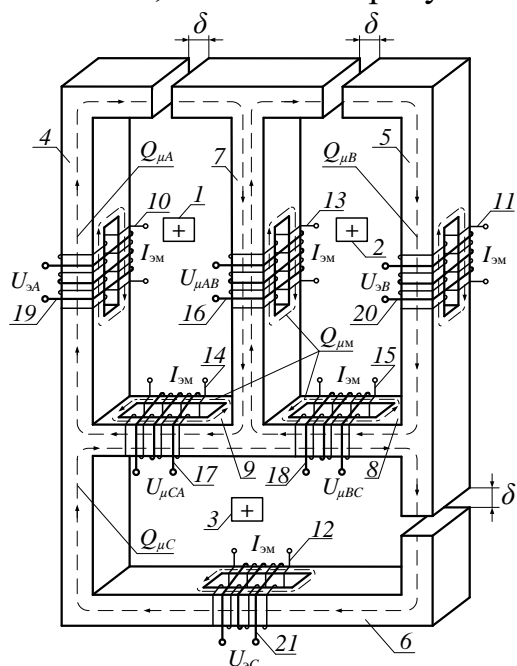


Рис.1. Конструкция нового электромагнитного преобразователя, измеряющего разность токов: 1, 2, 3 – токовые шины; 4, 5, 6 и 7, 8, 9 – несмежные и смежные стержни трехконтурного магнитопровода соответственно; 10, 11, 12 и 13, 14, 15 – модуляционные обмотки на несмежных и смежных стержнях; 16, 17, 18 и 19, 20, 21 – измерительные обмотки на смежных и несмежных стержнях соответственно; δ – воздушный зазор в несмежных стержнях

Преимущество созданного ИП перед существующими устройствами данного типа заключаются в том, что, во-первых, с его помощью можно измерить несимметрию токов в трехфазных цепях переменного тока, а также измерить разность постоянных токов, проходящих через две шины, во-вторых, устройство одновременно может измерять ток, проходящий по каждой шине и разность токов на шинах, в третьих, оно может дать информацию о несимметрии токов в трехфазной цепи переменного тока от двух выходов, которые гальванически не связаны друг с другом, и, в-четвертых, измерительные цепи на несмежных стержнях (из-за наличия δ

зазоров в несмежных стержнях) практически индуктивно не связаны между собой.

При разработке математических моделей магнитных цепей созданных ИП цепи, по которым замыкаются магнитные потоки измеряемых токов, относятся к цепям с сосредоточенными параметрами, а модуляционные цепи – к цепям с распределенными параметрами. При их расчете использовались метод эквивалентных схем замещения и классические методы, основанные на составлении и решении дифференциальных уравнений с учетом допущений, принимаемых при исследовании подобных магнитных цепей.

Разработана следующая математическая модель трехконтурной нелинейной магнитной цепи, объединяющей магнитные потоки, создаваемые разностью измеренных токов:

$$l_{\mu x \Pi A} k_1 sh \left(k_2 \frac{Q_{\mu x A}}{S_{\mu x A}} \right) + \frac{Q_{\mu x A}}{1,1 \mu_0 S_{\mu x A}} \delta + l_{\mu x \Pi AB} k_1 sh \left[k_2 \frac{(Q_{\mu x A} - Q_{\mu x B})}{S_{\mu x AB}} \right] - l_{\mu x CA} k_1 sh \left[k_2 \frac{(Q_{\mu x C} - Q_{\mu x A})}{S_{\mu x CA}} \right] = I_{\Delta A}, \quad (1)$$

$$l_{\mu x \Pi B} k_1 sh \left(k_2 \frac{Q_{\mu x B}}{S_{\mu x B}} \right) + \frac{Q_{\mu x B}}{1,1 \mu_0 S_{\mu x B}} \delta - l_{\mu x AB} k_1 sh \left[k_2 \frac{(Q_{\mu x A} - Q_{\mu x B})}{S_{\mu x AB}} \right] - l_{\mu x BC} k_1 sh \left[k_2 \frac{(Q_{\mu x B} - Q_{\mu x C})}{S_{\mu x BC}} \right] = I_{\Delta B}, \quad (2)$$

$$l_{\mu x \Pi C} k_1 sh \left(k_2 \frac{Q_{\mu x C}}{S_{\mu x C}} \right) + \frac{Q_{\mu x C}}{1,1 \mu_0 S_{\mu x C}} \delta + l_{\mu x CA} k_1 sh \left[k_2 \frac{(Q_{\mu x C} - Q_{\mu x A})}{S_{\mu x CA}} \right] - l_{\mu x BC} k_1 sh \left[k_2 \frac{(Q_{\mu x B} - Q_{\mu x C})}{S_{\mu x BC}} \right] = I_{\Delta C}, \quad (3)$$

где $Q_{\mu x A}$, $Q_{\mu x B}$, $Q_{\mu x C}$ - магнитные потоки в несмежных ветвях магнитной цепи, [Wb]; k_1 , k_2 - коэффициенты аппроксимации основной кривой намагничивания магнитного материала, [A/m]; [1/T]; $l_{\mu x \Pi A}$, $l_{\mu x \Pi AB}$, $S_{\mu x A}$, $S_{\mu x AB}$ - длина и поверхность сечения несмежных и смежных ветвей магнитной цепи соответственно, [m]; [m²].

Нелинейные уравнения (1) – (3) были решены в среде Borland C ++ Builder с использованием программного инструмента, разработанного на основе численного метода Ньютона. Результаты расчетов показывают, что с уменьшением величины воздушных зазоров δ в несмежных ветвях исследуемой трехконтурной магнитной цепи, существенно возрастает влияние нелинейности основной кривой намагничивания магнитного материала магнитной цепи.

Математические модели модулированных магнитных цепей, разработанные с учетом распределенности их электрических и магнитных параметров, имеют следующий вид:

$$Q_{\mu m}(x) = \frac{F_{\mu \Pi}}{Z_{\mu \Pi}} - \frac{F_{\mu \Pi}}{Z_{\mu \Pi} \Delta} \{sh[\gamma(X_m - x)] + sh(\gamma x)\} -$$

$$-\frac{2F_{\text{МП}}}{\gamma Z_{\text{MT}} \Delta} \{ch[\gamma(X_M - x)] + ch(\gamma x)\}, \quad (4)$$

$$U_{\mu\text{M}}(x) = \frac{2F_{\text{МП}}}{\gamma \Delta} \{ch(\gamma x) - ch[\gamma(X_M - x)]\} + \\ + \frac{2F_{\text{МП}}}{Z_{\text{MT}} C_{\mu\text{МП}} \Delta} \{sh(\gamma x) - sh[\gamma(X_M - x)]\}, \quad (5)$$

где $\Delta = \left[\left(1 + \frac{\gamma^2}{Z_{\text{MT}}^2 C_{\mu\text{МП}}^2} \right) sh(\gamma X_M) + \frac{\gamma}{Z_{\text{MT}} C_{\mu\text{МП}}} ch(\gamma X_M) \right], [-];$ $Q_{\mu\text{M}}(x), [Wb],$
 $U_{\mu\text{M}}(x), [A]$ - магнитный поток во взаимно параллельных ферромагнитных стержнях и магнитное напряжение между ними; $F_{\text{МП}}$ - погонное значение магнитодвижущей силы (МДС) модулирующей обмотки на единицу длины магнитной цепи, $[A/m];$ $Z_{\mu\text{МП}} = 1/(\mu\mu_0 bh) = \rho_{\mu\text{ср}}/(bh), [1/(H \cdot m)]$ и $C_{\mu\text{МП}} = \mu_0 b/\delta_M, [H/m]$ - магнитное сопротивление ферромагнитных стержней, параллельно расположенных в модуляционной магнитной цепи и погонное значение магнитной ёмкости воздушного зазора между ними на единицу длины магнитной цепи соответственно; $\rho_{\mu\text{ср}} = \rho_{\mu\text{мин}} + (\rho_{\mu\text{макс}} - \rho_{\mu\text{мин}})/2$ - среднее удельное значение магнитного сопротивления материала ферромагнитного стержня, $[m^2/H];$ $\rho_{\mu\text{мин}}$ и $\rho_{\mu\text{макс}}$ - минимальное и максимальное значения удельного значения магнитного сопротивления материала стержня, соответствующее минимальному и максимальному значениям рабочей магнитной индукции в ферромагнитных стержнях соответственно; Z_{MT} - магнитное сопротивление ферромагнитного соединителя, соединяющий длинные параллельные стержни, $[1/H];$ $\gamma = \sqrt{2Z_{\mu\text{МП}} C_{\mu\text{МП}}}, [1/m]$ - коэффициент распространения магнитного потока по магнитной цепи; x, X_M - координата и ее максимальное значение, $[m].$

Анализ кривых (рис. 2 и 3) функций $Q_{\mu\text{M}}^* = f(x^*)$ и $U_{\mu\text{M}}^* = f(x^*),$ построенные на основе выражений (4) и (5) для различных значений коэффициента затухания магнитного потока ($\beta = \gamma X_M$) в магнитной цепи показал, что магнитный поток в ферромагнитных стержнях имеет максимальное значение между их длинами и уменьшается в зависимости от значения β по направлению к краям в замкнутой модулирующей магнитной цепи, в которой индуктивно две идеально одинаковые обмотки с двумя идеально идентичными длинными параллельными ферромагнитными стержнями равномерно распределены, в то время как значение магнитного напряжения между ферромагнитными стержнями равно нулю в середине их длины и возрастает с противоположными знаками в зависимости от значения β по направлению к краям.

Общая математическая модель ИП, разработанная для магнитомодуляционных и трансформаторных режимов, имеет следующий вид:

$$e_{AB.\text{вых.}} = -w_{\text{из}} S_{\mu AB} a_1 \left[\frac{\Delta H'_{xm} \omega_{\text{эx}} \cos(\omega_{\text{эx}} t + \varphi_{\mu x}) + H'_{m\text{т}} \omega_{\text{эм}} \cos(\omega_{\text{эм}} t + \varphi_{\mu\text{M}})}{\sqrt{1 + [\Delta H'_{xm} \sin(\omega_{\text{эx}} t + \varphi_{\mu x}) + H'_{m\text{т}} \sin(\omega_{\text{эм}} t + \varphi_{\mu\text{M}})]^2}} \right] -$$

$$-w_{из} S_{\mu AB} a_1 \left[\frac{\Delta H'_{xm} \omega_{\text{эx}} \cos(\omega_{\text{эx}} t + \varphi_{\mu x}) - H'_{Mm} \omega_{\text{эм}} \cos(\omega_{\text{эм}} t + \varphi_{\mu m})}{\sqrt{1 + [\Delta H'_{xm} \sin(\omega_{\text{эx}} t + \varphi_{\mu x}) - H'_{Mm} \sin(\omega_{\text{эм}} t + \varphi_{\mu m})]^2}} \right], \quad (6)$$

где $w_{из}$ - количество витков измерительной обмотки; $a_1 = 1/k_2$; $\Delta H'_{xm} = \Delta H_{xm}/k_1$; $H'_{Mm} = \Delta H_{xm}/k_1$; $\omega_{\text{эx}}$, $\varphi_{\mu x}$, $\omega_{\text{эм}}$, $\varphi_{\mu m}$ - соответственно разности напряженностей магнитных полей в ветви магнитной цепи между шинами, создаваемых токами смежных шин, напряженность магнитного поля, создаваемое током модулирующей обмотки в параллельных стержнях этой ветви, а также их угловые частоты и начальные фазы, [A/m], [s^{-1}] и [град].

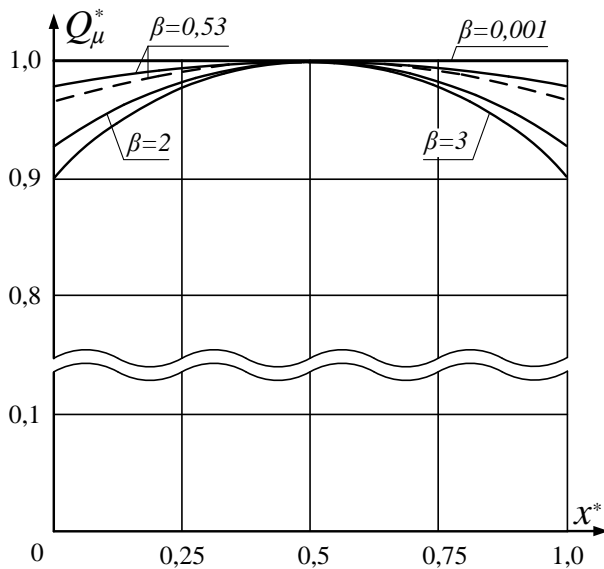


Рис. 2. Графики функции $Q_{\mu m}^*(x^*) = f(x^*)$ при различных значениях β : пунктирная кривая – экспериментальная линия

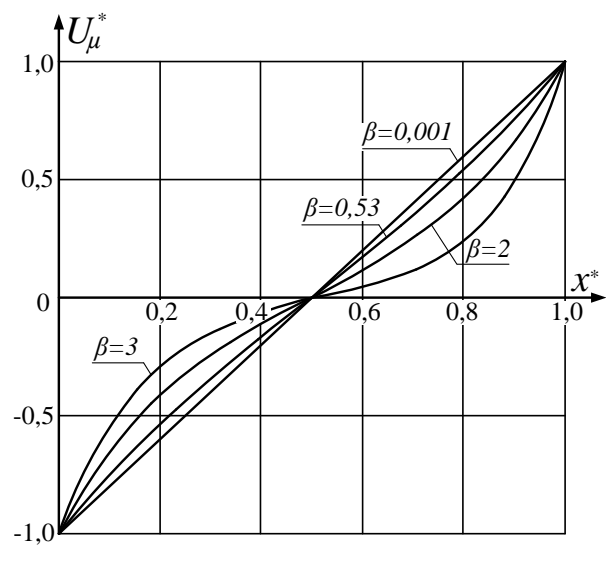


Рис. 3. Графики функции $U_{\mu m}^*(x^*) = f(x^*)$ при различных значениях β

При $H_x = const$ выражение (6) переходит в математическую модель ИП, работающего в магнитомодуляционном режиме, а при $H_x = H_{xm} \sin \omega_x t$ и $H_M = 0$ выражение (6) переходит в математическую модель ИП, работающего в трансформаторном режиме.

Третья глава диссертации «Статические и динамические характеристики индукционных преобразователей разности токов» посвящена исследованию статических и динамических характеристик разработанных ИП для магнитомодулирующих и трансформаторных режимов.

Аналитическое выражение статической характеристики ИП, работающего в режиме измерения разности постоянных токов, формируется в следующем виде:

$$E_{ABVЫХ.(ММ)}^* = [2Arsh(\Delta H'_x) - Arsh(\Delta H'_x + H'_{Mm}) - Arsh(\Delta H'_x - H'_{Mm})], \quad (7)$$

где $E_{ABVЫХ.(ММ)}^* = \frac{E_{ABVЫХ.(ММ)}}{E_0}$, [-]; $E_0 = \frac{2w_{из} S_{\mu AB}}{\pi k_2}$, [V].

Анализ уравнения (7) и графиков, построенных на ее основе (рис. 4), показывает, что по мере увеличения значения тока (I_M), приложенного к модуляционной обмотке, максимальное значение функции статической характеристики увеличивается и движется по направлению к увеличивающемуся по абсолютному значению разности токов ($\Delta I_{\text{эx}}$), показанных на графике. Установлено, что разница между статическими характеристиками, построенными по результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований, не превышает 8-12%.

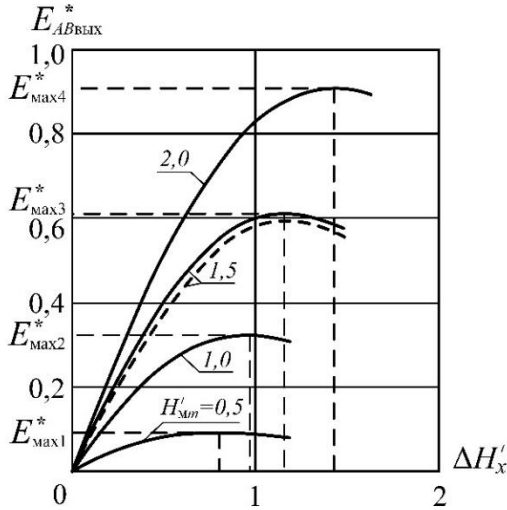


Рис. 4. Статические характеристики созданных ИП, измеряющих разность постоянных токов

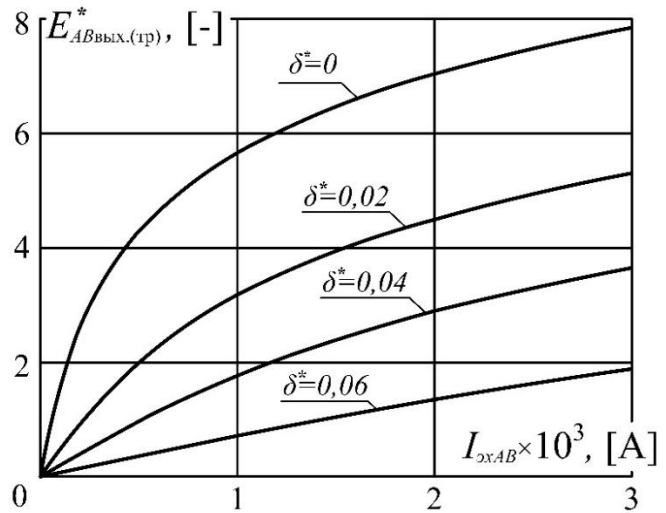


Рис. 5. Статические характеристики созданных ИП, предназначенных для измерения несимметрии токов в трехфазной цепи

Получены следующие выражения чувствительности и степени нелинейности статической характеристики ИП, работающего в режиме измерения разности постоянных токов:

$$S_{(MM)} = \frac{2}{\sqrt{1 + \Delta H'_{x2}}} - \frac{1}{\sqrt{1 + (\Delta H'_x + H'_{mm})^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + (\Delta H'_x - H'_{mm})^2}} = 0, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{MM}, \% = \left\{ \frac{2Arsh\Delta H'_{x1} - Arsh(\Delta H'_{x1} - H'_{mm}) - Arsh(\Delta H'_{x1} + H'_{mm})}{[2Arsh\Delta H'_{x\text{max}} - Arsh(\Delta H'_{x\text{max}} - H'_{mm}) - Arsh(\Delta H'_{x\text{max}} + H'_{mm})]} - \frac{\Delta H'_{x1}}{2\Delta H'_{x\text{max}}} \right\} \cdot 100\%. \quad (9)$$

При значениях $\Delta H'_{x1} = 0,88$, $H'_{x\text{max}} = 0,92$ и $H'_{mm} = 2,0$ степень нелинейности статической характеристики равна $\varepsilon, \% = 2,45$ %.

Аналитическое выражение статической характеристики ИП, работающего в режиме измерения несимметрии трехфазных токов, получено в следующем виде:

$$E_{AB\text{вых.}(тр)}^* = 2Arsh \left[\frac{I_{\text{эx}AB} Z_{\mu x2}}{l_{\mu AB} k_2 (Z_{\mu x1} + 3Z_{\mu x2})} \right], \quad (10)$$

где $I_{\text{эx}AB}$ - разность переменных токов, проходящих через смежные шины; $Z_{\mu x1} = W_{\mu x1} / \omega$; $Z_{\mu x2} = W_{\mu x2} / \omega$; $W_{\mu x1} = W_{\mu xp} + W_{\mu x\delta} = l_{\mu p} / (\mu \mu_0 S_{\mu}) + \delta / (\mu_0 S_{\mu})$; $W_{\mu x2} = l_{\mu 2} / (\mu \mu_0 S_{\mu})$ - магнитное сопротивление и магнитная жесткость несмежных и смежных ветвей трехконтурной магнитной цепи соответственно.

Анализ уравнения (10) и графиков, построенных на ее основе (рис.5), показывает, что с увеличением относительной величины δ^* воздушного зазора в несмежных ветвях, угол, образованный между осью абсциссы и статической характеристики уменьшается, а доля линейной части этой характеристики увеличивается.

Получены следующие выражения уровня нелинейности чувствительности и статических характеристик в трансформаторном режиме:

$$S_{\text{тр}} = \frac{2l_{\mu AB}(Z_{\mu x1} + 3Z_{\mu x2})}{\sqrt{l_{\mu AB}^2(Z_{\mu x1} + 3Z_{\mu x2})^2 + a_1^2 Z_{\mu x2}^2 I_{\text{эxAB}}^2}}, \quad (11)$$

$$\varepsilon_{\text{тр}}, \% = \frac{\Delta H'_{x\text{max}} \text{Arsh}(\Delta H'_{x1}) - \Delta H'_{x1} \text{Arsh}(\Delta H'_{x\text{max}})}{2\Delta H'_{x\text{max}} \text{Arsh}(\Delta H'_{x\text{max}})} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Исследованы статические характеристики нового ИП, работающего в режимах измерения разности постоянного тока и несимметрии трехфазного тока, с использованием метода параметрической структурной схемы (ППС). Разработан метод учета нелинейности кривой намагничивания магнитного материала с использованием соответствующей комбинации линейных элементарных преобразователей.

Выходной сигнал, полученный с помощью метода ПСС ИП, работающего в магнитомодуляционном режиме, равен:

$$U_{\text{э.ВЫХ.}(MM)}^{\text{ср.}} = U_{\text{э.01}} \Delta I_{\text{эx}}^* - U_{\text{э.02}} \Delta I_{\text{эx}}^{*3}, \quad (13)$$

где $U_{\text{э.01}} = \pi w_{\text{ВЫХ.}} \omega_M U_{\mu\text{mm}}^2 (5K_3 U_{\mu\text{mm}}^2 - 3K_2) \Delta I_{\text{эxmax}} = K_4 \Delta I_{\text{эxmax}}, [V];$

$U_{\text{э.02}} = 10\pi w_{\text{ВЫХ.}} \omega_M K_3 U_{\mu\text{mm}}^2 \Delta I_{\text{эxmax}}^3 = K_5 \Delta I_{\text{эxmax}}^3, [V]; \Delta I_{\text{эx}}^* = \frac{\Delta I_{\text{эx}}}{\Delta I_{\text{эxmax}}}, [-]$

$\Delta I_{\text{эxmax}}$ – верхний предел диапазона измерения ИП, [A].

Анализ уравнения (13) и графиков, построенных на ее основе, показывает, что результаты статических характеристик, полученные с помощью метода ПСС, отличаются от экспериментальных результатов всего на $7 \div 13\%$.

Исследованы динамические характеристики созданных ИП. Когда ИП работает в режиме измерения разности постоянного тока, его входная величина изменяется по закону пульсации, что приводит к следующему выражению для переходного напряжения, создаваемого в измерительной обмотке, установленной на магнитопроводе между шинами:

$$U_{\text{эAB2}}(t) = U_{\text{эAB21}} e^{-\frac{1}{T_{\mu x}} t} \sin 2\omega_M t + U_{\text{эAB22}} e^{-\frac{1}{T_{\mu\text{M}}} t} \sin 2\omega_M t - U_{\text{эAB23}} [\sin[(2\omega_M + \omega_x)t + \varphi] - \sin[(2\omega_M - \omega_x)t - \varphi]], \quad (14)$$

где $U_{\text{эAB21}} = \frac{C_{\mu\text{ср}} \omega_M K_2 I_{\text{эABm}} (R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} - C_{\mu 12} R_{\mu 2} C_{\mu 2}) R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2}}{(C_{\mu 12})^2 R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} + (R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2})^3 \omega_x^2 - (C_{\mu 12})^3 T_{\mu\text{M}} + (R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2})^2 C_{\mu 12} T_{\mu\text{M}} \omega_x^2}, [V];$

$U_{\text{эAB22}} = \frac{C_{\mu\text{ср}} \omega_M K_2 I_{\text{эABm}} (R_{\mu 2} C_{\mu 2} - T_{\mu\text{M}}) T_{\mu\text{M}}}{R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} + R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} (T_{\mu\text{M}})^2 \omega_x^2 - C_{\mu 12} T_{\mu\text{M}} - C_{\mu 12} (T_{\mu\text{M}})^3 \omega_x^2}, [V];$

$$U_{\text{э}AB23} = \frac{C_{\mu\text{мср}}\omega_m K I_{\text{э}AB} m \sqrt{M^2 + N^2}}{2Z^2}, [V]; \varphi = \arctg \frac{N}{M};$$

$$N = R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} T_{\mu\text{м}} \omega_x^2 - C_{\mu 12} - R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} R_{\mu 2} C_{\mu 2} \omega_x^2 - C_{\mu 12} T_{\mu\text{м}} R_{\mu 2} C_{\mu 2} \omega_x^2, [H];$$

$$M = R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} \omega_x + C_{\mu 12} T_{\mu\text{м}} \omega_x + R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} T_{\mu\text{м}} R_{\mu 2} C_{\mu 2} \omega_x^3 - C_{\mu 12} R_{\mu 2} C_{\mu 2} \omega_x, [H];$$

$$Z^2 = (R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2})^2 \omega_x^2 + (R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2})^2 T_{\mu\text{м}}^2 \omega_x^6 + (C_{\mu 12} \omega_x)^2 + C_{\mu 12}^2 T_{\mu\text{м}}^2 \omega_x^4, [\Omega^2];$$

$$R_{\mu 12}, [S]; R_{\mu 2}, [S]; C_{\mu 1}, [H]; C_{\mu 2}, [H]; T_{\mu x} = \frac{(R_{\mu 1} + R_{\mu 2}) C_{\mu 1} C_{\mu 2}}{3C_{\mu 1} + C_{\mu 2}}, [s] - \text{соответственно}$$

активные сопротивления, магнитные емкости и постоянная времени измерительной магнитной цепи; $T_{\mu\text{м}} = R_{\mu\text{м}} C_{\mu\text{мср}}, [s]$ - $C_{\mu\text{мср}}, [H]$ - среднее значение постоянной времени, активного сопротивления и магнитной емкости модулирующей магнитной цепи; K_2 - коэффициент пропорциональности.

Переходное напряжение в одной измерительной обмотке ИП, с заданным трехфазным синусоидальным током частотой ω на входе:

$$U_{\text{э}AB}(t) = U_{\text{э}AB1} e^{-\frac{t}{T_{\mu x}}} + U_{\text{э}AB2} \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right), \quad (15)$$

где $U_{\text{э}AB1} = \frac{D[I_{\text{э}1} C_{\mu 12} - I_{\text{э}2} R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} \omega]}{R_{\mu 12} C_{\mu 1} C_{\mu 2} (C_{\mu 12}^2 + R_{\mu 12}^2 C_{\mu 1}^2 C_{\mu 2}^2 \omega^2)}, [V];$

$$U_{\text{э}AB2} = \frac{K I_{\mu} U_{\text{э}} C_{\mu 1} C_{\mu 2} \omega \sqrt{I_{\text{э}1}^2 + I_{\text{э}2}^2}}{\sqrt{(3C_{\mu 1} + C_{\mu 2})^2 + (R_{\mu 1} + 3R_{\mu 2})^2 C_{\mu 1}^2 C_{\mu 2}^2 \omega^2}}, [V]; D = K I_{\mu} U_{\text{э}} C_{\mu 1} C_{\mu 2} C_{\mu 12}, [1/H^3];$$

$$\varphi = \arctg \frac{(3C_{\mu 1} + C_{\mu 2}) I_{\text{э}1} - (R_{\mu 1} + R_{\mu 2}) C_{\mu 1} C_{\mu 2} \omega I_{\text{э}2}}{(3C_{\mu 1} + C_{\mu 2}) I_{\text{э}2} - (R_{\mu 1} + R_{\mu 2}) C_{\mu 1} C_{\mu 2} \omega I_{\text{э}1}}.$$

Анализ уравнений (14) и (15), а также графиков, построенных на их основе, показывает, что при подаче на вход ИП синусоидального тока с частотой ω_x , работающего в магнитомодуляционном режиме, переходное напряжение на выходе измерительной обмотки, установленной в магнитопроводе между шинами, состоит из суммы установившегося составляющего с частотой, равной удвоенной частоте тока в модуляционной цепи и двух экспоненциально затухающих свободных составляющих с частотами, равными соответственно $(2\omega_m + \omega_x)$ и $(2\omega_m - \omega_x)$ (рис.6). При

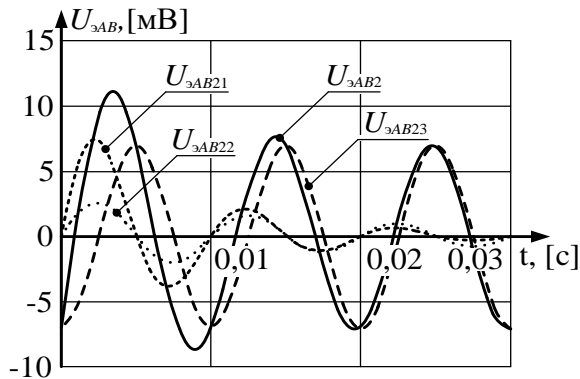


Рис. 6. Графики переходных напряжений в одной измерительной обмотке ИП с заданной разностью пульсирующих постоянных токов

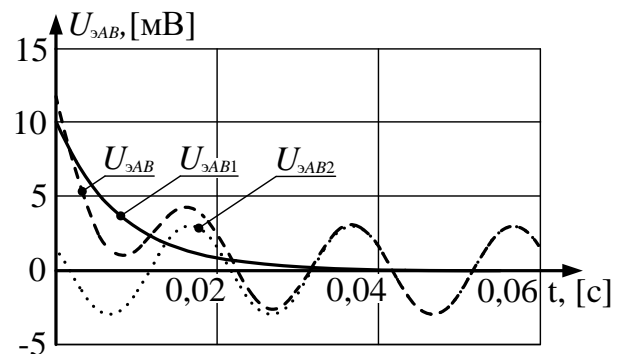


Рис. 7. Графики переходных напряжений в одной измерительной обмотке ИП при трехфазном синусоидальном токе частотой ω на входе

подаче трехфазного синусоидального тока на вход ИП, работающего в режиме измерения несимметрии трехфазных токов, переходное напряжение состоит из суммы установившегося составляющего с частотой, равной удвоенной частоте тока в модуляционной цепи и свободного экспоненциально затухающего составляющего (рис.7).

В четвертой главе диссертации «**Погрешность и надежность индукционных преобразователей разности токов**» исследуются источники погрешностей ИП для магнитомодуляционных и трансформаторных режимов, их анализ, оценка и основные технические характеристики.

Определение источников погрешностей в индукционных преобразователях измерения разности токов показал, что внешние переменные и постоянные магнитные поля, температура, а также отклонение источника тока в модуляционной обмотке являются источниками систематических и случайных составляющих аддитивной и мультипликативной погрешностей исследуемых ИП. Установлено, что систематическая и случайная составляющие погрешности созданных ИП, работающих в магнитомодуляционном режиме, не превышают 0,68% и 1,28% соответственно, а при работе преобразователя в трансформаторном режиме - 0,57% и 1,06% соответственно.

В проведенных исследованиях была изучена надежность созданных ИП. Установлено, что их надежность находится в интервале $(0,98 \div 0,83)$ при допустимой температуре нагрева проводов ($T_{\text{доп.}} = 90^{\circ}\text{C}$) и ее изменение в диапазоне $20^{\circ}\text{C} \div 110^{\circ}\text{C}$ в обмотках модуляции, вызывает их выход из строя, а при $T_{\text{доп.}} = 140^{\circ}\text{C}$ в указанном диапазоне надежность равна $(0,98 \div 0,92)$.

Применение ИП, предназначенного для измерения разности больших токов на фидерах тяговой подстанции, позволило повысить точность управления. При этом ожидаемая экономическая эффективность составит 130,8 млн. сумов.

В приложении диссертации приведены основные критерии, элементы энергоинформационных моделей цепей различной физической природы и аппарат параметрических структурных схем, данные физико-технических эффектов и параметров, использованных при исследовании основных характеристик ИП, а также акты внедрения и справки об использовании результатов научных исследований в производстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения диссертационной работы «Индукционные преобразователи разности токов для систем контроля и управления» получены следующие научные результаты:

1. Анализ систем контроля и управления технологическими процессами с большими постоянными токами и автоматических симметрирующих устройств несимметричных режим в трехфазных цепях показал, что используемые в данных системах преобразователи разности токов должны обладать высокой точностью и линейной функцией преобразования во всем диапазоне измерения, а также стабильными характеристиками в

экстремальных условиях. Было установлено, что наиболее полно этим требованиям удовлетворяют индукционные измерительные преобразователи.

2. Разработаны новые конструкции индукционных преобразователей разности токов. Было установлено, что они превосходят существующие преобразователи в том, что могут одновременно измерять ток, протекающий через каждую шину и разность токов на шинах, а также предоставлять информацию о разности токов в цепи из двух гальванически не связанных выходов.

3. Разработаны математические модели линейных и нелинейных магнитных цепей измеряемых токов и модуляционных магнитных цепей созданных индукционных преобразователей с учетом распределенности параметров, а также их обобщенные математические модели для магнитомодуляционного и трансформаторного режимов.

4. Анализ графиков статических характеристик нового индукционного преобразователя, работающего в режиме измерения разности постоянных токов показал, что с увеличением значения тока, подаваемого на обмотку модуляции, увеличивается значение максимума на графике статической характеристики и оно движется в сторону нарастания абсолютного значения разности измеряемых токов. В результате чего появилась возможность упрощения процесса проектирования индукционных преобразователей.

5. Исследованы статические характеристики нового индукционного преобразователя, работающего в режимах измерения разности постоянного тока и несимметрии трехфазного тока с использованием метода параметрической структурной схемы, а также разработан метод учета нелинейности кривой намагничивания магнитного материала, соответствующей комбинации элементарных преобразователей.

6. При подаче скачкообразного постоянного тока на вход индукционного преобразователя, работающего в режиме измерения разности постоянных токов, частота переходного напряжения на выходе измерительной обмотки, установленной в магнитопроводе между шинами, будет равна соответственно двойной частоте модуляции, которая состоит из суммы двух свободных гармонических составляющих экспоненциально затухающих относительно постоянных времени модулирующих магнитных цепей и амплитуд. В результате появляется возможность выбора динамических режимов индукционного преобразователя.

7. Установлено, что систематическая и случайная составляющие погрешности созданных индукционных преобразователей, работающих в магнитомодулирующем режиме не превышают 0,68% и 1,28% соответственно, а при работе того же преобразователя в трансформаторном режиме - 0,57% и 1,06% соответственно.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.T.03.02 ON THE
ADMISSION OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE
TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

JUMABOEV SARVARBEK KHAMRAEVICH

**INDUCTIVE CURRENT-DIFFERENCE TRANSDUCER FOR
MONITORING AND CONTROL SYSTEMS**

05.01.06 – Elements and device of the computing machinery and managerial system

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

Tashkent - 2021

The theme of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan in num B2021.1.PhD/T1110.

The dissertation has been prepared at Tashkent State Transport University.

The Abstract of dissertation is posted in Three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) is placed on the web page of Scientific Council (www.tdtu.uz) and Information and Educational Portal «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor: **Amirov Sulton Fayzullaevich**
Doctor of Technical Sciences, Professor

Official opponents: **Siddikov Ilhomjon Hakimovich**
Doctor of technical sciences, professor

Nazarov Khayriddin Nuritdinovich
Candidate of technical sciences, professor

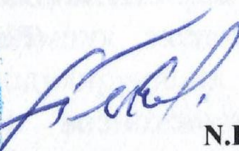
Leading organization: **OOO "Scientific and Technical Center"**
JSC "Uzbekenergo"

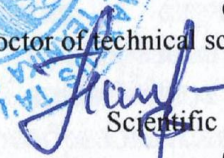
Defense of dissertation will take place in « 15 » 06 2021 at 10⁰⁰ o'clock at a meeting of the scientific council DSc.03/30.12.2019.T.03.02 at the Tashkent state technical university. (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).


The doctoral dissertation could be reviewed at the Information-resource center of Tashkent State Technical University (registration number 207). (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 246-03-41.)

Abstract of dissertation sent out on « 02 » 06 2021 year.
(mailing report № 3 on « 27 » 02 2021 year).




N.R. Yusupbekov
Chairman of Scientific Council
on awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor, academician


U.F. Mamirov
Scientific Secretary of Scientific Council
on awarding scientific degrees,
PhD in technical sciences


H.Z. Igamberdiev
Chairman of the Academic Seminar
under the Scientific Council on awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor, academician

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

The aim of the research work is the development of inductive converters that measure the difference in alternating currents and current asymmetry in three-phase circuits, as well as having the ability to simultaneously receive several output signals that are not inductively coupled to each other for monitoring and control systems.

The object of the research work are induction modifiers measuring the difference of currents for control and management systems were obtained.

The scientific novelty of the research is as follows:

new designs of inductive current difference converters have been developed that provide measurement of the DC current difference and current asymmetry in three-phase circuits, as well as having the ability to simultaneously receive several output signals that are inductively unrelated to each other;

a method for accounting for the nonlinearity of the main magnetization curve of magnetic material of induction current difference converters using linear elementary converters has been developed;

the interaction of multi-circuit electromagnetic circuits for induction current difference converters is established, taking into account their concentrated and distributed parameters, as well as the features of their nonlinear elements;

the main generalized dependences of the magnetomodulation and transformer modes of the new induction current difference converters are revealed.

Implementation of research results. On the basis of new inductive large current-difference transducer for monitoring and control systems and an improved method for calculating their electromagnetic circuits:

the developed induction converter was introduced at the traction substation “Chukursoy” of the distance of power supply ECH-1- “Toshkent” of JSC “Uzbekiston Temir Yullari” (reference of JSC “Uzbekiston Temir Yullari” №01/139-21- dated January 12, 2021). As a result, it is possible to reduce the loss of electricity at the traction substation by 6% by increasing the accuracy of measuring the difference in currents and the possibility of simultaneously submitting several high-precision measurement information to the control system;

generalized mathematical models of new inductive current-difference transducers for magnetic modulation and transformer modes, as well as a method for taking into account the nonlinearity of the main magnetization curve of the magnetic material of inductive current-difference transducers using combinations of linear elementary converters were introduced at the Chukursoy traction substation of the ECH-1- “Toshkent” power supply division JSC “Uzbekiston Temir Yullari” (reference of JSC “Uzbekiston Temir Yullari” № 01/139-21- dated January 12, 2021). The use of induction current difference converters, developed as a result of scientific research, has increased the accuracy of the control and control system by 2%.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introductory part, four chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The volume of the dissertation is 128 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (Часть I; Part I)

1. Safarov A., Sattarov K., Jumaboyev S. Mathematical modeling of static characteristics of electromagnetic current converter to detect current asymmetry of the traction power supply system // International Conference on Information Science and Communications Technologies Applications, Trends and Opportunities ICISCT 2019, Tashkent, 4-6 November, 2019 <http://www.icisct2019.org/> (3, Scopus, Олий аттестация комиссиясининг 2019 йил 30 сентябрдаги 01-06/1747-сон маълумотномаси)
2. Патент РУз (UZ) № IAP 06465. Устройство для измерения токов в проводах трехфазной высоковольтной линии/ Амиров С.Ф., Жумабоев С.Х., Файзуллаев Ж.С., Бабаназарова Н.К.//Расмий ахборотнома, 2021. - №4.
3. Амиров С.Ф., Атауллаев А.О., Жумабоев С.Х. Суюклик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичлар магнит занжирларининг математик моделлари // ТошТЙМИ Хабарномаси – Тошкент, 2019. – №2. 143-147- бет. (05.00.00; №11)
4. Амиров С.Ф., Сафаров А.М., Жумабоев С.Х. Измерительное устройство для выявления несимметричности трехфазных токов в системах тягового электроснабжения // Проблемы информатики и энергетики – Ташкент, 2019. – №4. – С. 63-67. (05.00.00; №5)
5. Амиров С.Ф., Жумабоев С.Х. Выявление несимметричности фаз электромагнитными преобразователями тока на магнитомодуляционном эффекте // Мухаммад ал-Хоразмий авлодлари, Ташкент, 2020, – №2(12). – С. 91-93. (05.00.00; №10)
6. Сафаров А.М., Жумабоев С.Х. Магнитмодуляцион эффектдаги ток ўзгартгич ишига ўзгарувчан магнит майдон таъсирини тадқиқ қилиш // ТошТЙМИ Хабарномаси – Тошкент, 2020. – №2. 76-83 бет. (05.00.00; №11)
7. Амиров С.Ф., Жумабоев С.Х., Юлдашев Н.Р. Ўзгармас тоқлар фарқини ўлчовчи янги магнитомодуляцион ўзгартиргичнинг динамик характеристикалари // ТошТЙМИ Хабарномаси – Тошкент, 2020. – №2. 116-125 бет. (05.00.00; №11)
8. Амиров С.Ф., Жумабоев С.Х., Юлдашев Н.Р. Уч фазали ток носимметриясини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичининг динамик характеристикалари // ТошТЙМИ Хабарномаси – Тошкент, 2020. – №3. 86-92 бет. (05.00.00; №11)
9. Амиров С.Ф., Мухсимов Ш.С., Болтаев О.Т., Жумабоев С.Х. Диапазони автоматик ростланувчи ток трансформатори учун тузатиш коэффициентини аниқлаш // ТошТЙМИ Хабарномаси – Тошкент, 2020. – №3. 116-121 бет. (05.00.00; №11)
10. Amirov S.F., Jumaboyev S.X., Yuldashev N.R. Dynamic characteristics of a new electromagnetic converter of three-phase current non-symmetry // Solid State Technology, Volume 63, Issue: 6, 2020, – pp. 12188-12199. (5, Global

II бўлим (Часть II; Part II)

11. Рустамов Д.Ш., Жумабоев С.Х. Вопросы несимметричности токов в трехфазных тяговых сетях и устройство для ее измерения // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: Тез. докл. Респ. научно–технической конференции с участием зарубежных ученых. – Ташкент, 2017.– С. 170-172.

12. Рустамов Д.Ш., Жумабоев С.Х. Измерительный преобразователь тока// Сборник материалов республиканской научно – технической конференции Перспективы развития транспортно-дорожного комплекса на юге республики. Термиз, 2017. – С. 326-328.

13. Амиров С.Ф., Жумабоев С.Х., Умаров М.Г. Электромагнитный преобразователь несимметрии тока в напряжение с плоской измерительной обмоткой // Актуальные проблемы современной науки, Москва, 2018. №6. – С 246-248.

14. Жумабоев С.Х. Ўзгарувчан ток тортиш тармоғида носимметрикликни камайтириш // “Темир йўл транспортида ресурс тежамкор технологиялар” мавзусидаги хорижий олимлар иштирокидаги республика илмий – техника анжумани, Тошкент, 2018. 210-212 бет.

15. Safarov A.M., Jumaboyev S.KH., Sattarov K.A. Device for detection of the phase current asymmetry in the three-phase lines of non-traction consumers // MIST: Aerospace 2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 734 (2020) pp. 1-3. 012196 doi: 10.1088/1757-899X/734/1/012196, P. 4 (3, Scopus)

16. Safarov A., Sattarov K., Jumaboyev S. Device for conversion of equalizing current at the site of the traction ac network // E3S Web of Conferences 139, 01034 (2019) RSES 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901034>, P.3. (3, Scopus)

17. Амиров С.Ф., Жумабоев С.Х. Электр тармоқларидаги носимметриялар таснифи // “Темир йўл транспортида ресурс тежамкор технологиялар” мавзусидаги хорижий олимлар иштирокидаги республика илмий – техника анжумани, Тошкент, 2019. 245-246 бет.

18. Жумабоев С.Х., Бабаназарова Н.К. Дистанционный электромагнитный преобразователь больших токов трехфазных высоковольтных линий // II Международная научно-техническая конференция, посвященная 90- летию со дня рождения профессора Зарипова Мадияра Фахритдиновича. 19-20 сентября 2019 г., Уфа, Россия, 2019. - С. 131 –136.

19. Жумабоев С.Х., Мухсимов Ш.С. Электромагнитный преобразователь несимметричности трехфазного тока // II Международная научно-техническая конференция, посвященная 90- летию со дня рождения профессора Зарипова Мадияра Фахритдиновича. 19-20 сентября 2019 г., Уфа, Россия, 2019. - С. 144 –148.

Автореферат «Транспорт хабарномаси» илмий-амалий журнали
тахририятида таҳрирдан ўтказилди ва матнларни мослиги текширилди

Қоғоз бичими 84×60-1/16. Ризограф босма усули. Times гарнитураси
Шартли босма табағи: 2,5 б.т. Адади: 100 нусха.
Буюртма № 43-3/2021 Нашрга рухсат этилди: 31.05.2021 й.

Тошкент давлат транспорт университети босмахонасида chop этилган.
Босмахона манзили: 100167, Тошкент шаҳар, Темирийўлчилар кўчаси, 1-уй.