

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ**  
**ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ**  
**DSc.15/31.08.2022.Т.73.07 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**МАМАДАЛИЕВ УЛУҒБЕК ШУХРАТОВИЧ**

**ҚЎЗГАЛУВЧАН ҚИСМИНИНГ ФАОЛ ЮЗАСИ ЎЗГАРУВЧАН**  
**БЎЛГАН БУРЧАК СИЛЖИШЛАРИНИ ЎЛЧОВЧИ**  
**ТРАНСФОРМАТОР ЎЗГАРТИРГИЧЛАР**

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

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

**Тошкент – 2025**

**Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)**

**Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)**

**Мамадалиев Улуғбек Шухратович**

Кўзгалувчан қисмининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган бурчак  
силжишларини ўлчовчи трансформатор ўзгартиргичлар..... 3

**Мамадалиев Улуғбек Шухратович**

Трансформаторные преобразователи угловых перемещений с  
переменной активной площадью подвижной части..... 21

**Mamadaliyev Ulugbek Shukhratovich**

Angular displacement transformer converter with a variable active area of the  
movable core..... 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works..... 43

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ**  
**ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ**  
**DSc.15/31.08.2022.T.73.07 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**МАМАДАЛИЕВ УЛУҒБЕК ШУХРАТОВИЧ**

**ҚЎЗГАЛУВЧАН ҚИСМИНИНГ ФАОЛ ЮЗАСИ ЎЗГАРУВЧАН**  
**БЎЛГАН БУРЧАК СИЛЖИШЛАРИНИ ЎЛЧОВЧИ**  
**ТРАНСФОРМАТОР ЎЗГАРТИРГИЧЛАР**

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

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

**Тошкент – 2025**

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Олий таълим, фан ва инновациялар вазирлиги хузуридаги Олий аттестация комиссиясида № В2023.4.PhD/Т4179 ракам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент давлат транспорт университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз тилида (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида ([www.tashiit.uz](http://www.tashiit.uz)) ва «ZiyoNet» ахборот таълим порталида ([www.ziyo.net.uz](http://www.ziyo.net.uz)) жойлаштирилган

<b>Илмий раҳбар:</b>	<b>Амиров Султон Файзуллаевич</b> техника фанлари доктори, профессор
<b>Расмий оппонентлар:</b>	<b>Сиддиков Илҳомжон Ҳакимович</b> техника фанлари доктори, профессор <b>Халиков Содикжон Салихджанович</b> техника фанлари номзоди, доцент
<b>Етакчи ташкилот:</b>	<b>Ислом Каримов номидаги Тошкент</b> давлат техника университети

Диссертация химояси Тошкент давлат транспорт университети хузуридаги DSc.15/31.08.2022.Т.73.07 ракамли Илмий кенгашнинг 2025 йил «12» март соат 15<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100167, Тошкент ш., Темирийўлчилар кўчаси, 1-уй. Тел.: (99871) 299-00-01; факс: (99871) 293-57-54; e-mail: [rektorat@mail.ru](mailto:rektorat@mail.ru).)

Диссертация билан Тошкент давлат транспорт университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (227 раками билан рўйхатга олинган). Манзил: 100167, Тошкент шаҳри, Темирийўлчилар кўчаси, 1-уй. Тел.: (99871) 299-05-66

Диссертация автореферати 2025 йил «27» феврал куни таркатилди.

(2025 йил «27» февралдаги №023 ракамли реестр баённомаси).



**Р.В. Рахимов**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш раиси, т.ф.д., профессор

**Я.О. Рузметов**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш илмий котиби, т.ф.д., профессор

**Р.М. Мирсаатов**  
Илмий даражалар берувчи илмий  
кенгаш қошидаги илмий семинар раиси  
т.ф.д., профессор

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

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда электр ҳаракат таркиби хавфсиз, узлуксиз ҳаракатланиши ва унинг ток олиш сифатини яхшилашни таъминловчи техник восита ва илғор технологияларини ишлаб чиқиш етакчи ўринни эгалламоқда. Ушбу йўналишда темир йўллар электр таъминоти тизимидаги бурчак силжишларни назорат қилувчи қурилмаларини такомиллаштириш муҳим вазифалардан ҳисобланмоқда. Бу борада темир йўлларнинг айланма йўлларида контакт тармоғи ўтказувчи таянчларидаги консолларни, тортувчи нимстанциялардаги трансформаторнинг юклама остида ростланувчи қурилмасини ва контакт тармоғи симлари таранглигини автоматик назорат қилувчи тизимлари учун бурчак силжишларини юқори аниқликда ўлчовчи ўзгартиргичларни ишлаб чиқиш муҳим аҳамият касб этмоқда.

Жаҳонда темир йўл транспорти объектларини назорат қилиш ва бошқариш тизимларининг сигналларни ўлчовчи, таққословчи, ўзгартирувчи, кучайтирувчи ва ижро этувчи элементлари ҳамда қурилмалари схема ва конструкцияларини такомиллаштиришга йўналтирилган илмий тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. Бу борада, жумладан, бурчак силжишларини ўлчовчи трансформатор ўзгартиргичлари магнит занжирларида магнит оқимлари чизиқли тақсимланишини амалга оширувчи алмашлаш схемалари ва уларни юқори аниқликда ҳисоблаш имкониятини берувчи математик моделларини ишлаб чиқишга катта аҳамият берилмоқда. Шу билан биргаликда, темир йўл транспорти объектларининг бурчак силжишларини назорат қилишда кенг фойдаланиладиган сезгирлиги ва аниқлиги юқори, тузилиши содда ҳамда чиқиш қуввати юқори бўлган ҳамда чизиқли ўзгартириш функциясига эга бўлган ўлчаш ўзгартиргичларини яратиш зарурати юзага келмоқда.

Республикамизда турли транспорт соҳаларини, жумладан темир йўл транспорти инфратузилмасини ривожлантириш, юқори тезликда ҳаракатланувчи таркиб участкаларини кенгайтириш, мавжуд темир йўл ҳудудларини электрлаштириш чора тadbирлари амалга оширилмоқда. 2022-2026 йилларга мўлжалланган янги Ўзбекистоннинг Тараққиёт стратегиясида, жумладан «... иқтисодийнинг энергия самарадорлигини 20 фоизга ошириш, ... транспорт катновлари асосида манзилга етиб бориш ва қайтиб келиш имкониятини яратиш»<sup>1</sup> вазифалари белгилаб берилган. Мазкур вазифаларни амалга оширишда, жумладан бурчак силжишларини юқори сезгирлик ва аниқлик билан ўлчай оладиган ҳамда чизиқли ўзгартириш тавсифларига эга бўлган янги трансформатор ўзгартиргичларни ва уларнинг математик моделларини ишлаб чиқиш, чизиқли ва ночизиқ магнит занжирларини ҳисоблаш усулларини ишлаб чиқиш зарур ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 22 январдаги ПФ-60-сон «2022 йилларга мўлжалланган янги Ўзбекистоннинг Тараққиёт стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 23 августдаги ПҚ-3238-сон «Замонавий энергия самарадор ва энергия тежайдиган технологияларни янада

---

<sup>1</sup> Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон «2022-2026 йилларга мўлжалланган янги Ўзбекистоннинг Тараққиёт стратегияси тўғрисида» ги Фармони

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 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 технологиялар ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурстежамкорлик» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Технологик жараёнлар ва ишлаб чиқариш объектларини назорат ва бошқарув тизимлари учун силжишларни ўлчовчи трансформатор ўзгартиргичларни ишлаб чиқиш бўйича долзарб масалаларни ечишга қаратилган илмий тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи илмий марказларида ва олий таълим муассасаларида, жумладан Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica ва University of Campania “Luigi Vanvitelli” (Италия), Worcester Polytechnic Institute, Wright State University, University of Michigan ва University of California (АҚШ), Seoul National University (Жанубий Корея), University Malaysia Perlis (Малайзия), Forschungslaboratorien der Siemens AG (Германия), Universidade Federal de Campina Grande (Бразилия), University of Manitoba (Канада), Электродинамика институти ва Киев автоматика институти (Украина), Самара давлат техника университети, Пенза давлат университети, Ульяновск давлат техника университети ва Уфа давлат авиация техника университети (Россия), Тошкент давлат техника университети, “Тошкент ирригация ва қишлоқ хўжалигини механизациялаш муҳандислари институти” миллий тадқиқот университети ва Тошкент давлат транспорт университети (Ўзбекистон)да олиб борилмоқда.

Дунёда силжишларни ўлчовчи трансформатор ўзгартиргичларни ишлаб чиқиш бўйича долзарб муаммоларни ҳал қилишга қаратилган бир қатор илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бу йўналишда John G. Webster, Stephen A. Dyer, David S. Nyce, Pavel Ripka, Richard Boll, Д.И. Агейкин, Л.Ф. Куликовский, Н.Е. Конюхов, М.А. Ураксеев, Я.Р. Абдуллаев, А.В. Федотов ва бошқалар катта ҳисса қўшишган.

Мамлакатимизда бурчак силжишларини ўлчовчи трансформатор ўзгартиргичларни такомиллаштириш бўйича илмий муаммоларни ҳал қилишга маҳаллий олимлардан М.Ф. Зарипов, Р.К. Азимов, И.Х. Сиддиқов, С.Ф. Амиров, Р.Ж. Баратов ва бошқалар катта ҳисса қўшишган. Бу олимларнинг саъй-ҳаракатлари билан трансформатор ўзгартиргичларини лойиҳалаш ва ҳисоблашнинг назарий асослари ишлаб чиқилган ва ривожлантирилган, мазкур ўзгартиргичларнинг оригинал конструкциялари ва схематик ечимлари таклиф қилинган ва ишлаб чиқаришга жорий қилинган.

Бироқ, шу билан бирга, сезгирлиги юқори, тузилиши содда ва чиқиш қуввати юқори бўлган ҳамда чизиқли ўзгартириш функциясига эга бўлган бурчак силжишларини ўлчовчи трансформатор ўзгартиргичларни ишлаб чиқишга, шунингдек уларни ҳисоблаш усулларини такомиллаштириш бўйича тадқиқотлар етарли даражада олиб борилмаган.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат транспорт университети илмий-тадқиқот ишлар режаларининг 3-сон «Темир йўл транспорти учун электромагнит ўлчаш воситаларини такомиллаштириш» (2019-2023) мавзусидаги илмий лойиҳа доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** сезгирлиги ва аниқлиги юқори, диапазони кенгайтирилган ҳамда чизикли ўзгартириш функциясига эга бурчак силжишларини ўлчовчи трансформатор ўзгартиргичларини ишлаб чиқишдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

замонавий босқичда бурчак силжишларини ўлчаш масалаларини тадқиқ этиш ва силжиш ўзгартиргичларига бўлган асосий талабларни шакллантириш;

бурчак силжишларини ўлчовчи мавжуд ўзгартиргичлар асосий техник характеристикаларининг қиёсий таҳлилинини ўтказиш ва ўзгартиргич турини танлаш ва уни асослаш;

сезгирлиги ва аниқлиги юқори, диапазони кенгайтирилган ҳамда чизикли ўзгартириш функциясига эга бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичларини ишлаб чиқиш;

бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичлар математик моделларини ишлаб чиқиш;

бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичлар асосий характеристикаларини тадқиқ этиш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичлар олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичларни яратиш ва уларнинг асосий техник тавсифларини тадқиқ этишни ташкил этади.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Тадқиқот жараёнида тарқоқ параметрларга эга бўлган электр ва магнит занжирлар назарияси, турли физик табиатли занжирларнинг энергия-ахборот моделлари ва параметрик структура схемалари аппарати, асосий ва кўшимча хатоликларни аниқлаш усуллари ҳамда ишончлилиқ назарияси усулларида фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

ишчи ҳаво оралиқларида жойлаштирилган чулғам, ферромагнит ўзак ёки экранини ўроқсимон ҳалқа кўринишида яшаш орқали сезгирлиги ва аниқлиги юқори, кенг диапазонли ҳамда статик характеристикаси чизикли бўлган бурчак силжишларини ўлчовчи трансформатор ўзгартиргич ишлаб чиқилган;

битта ўқда жойлаштирилган иккита берк ҳалқасимон магнит ўтказгич қалинлигини уларни туташтиргич билан уланган нуқтасидан унга қарама-қарши диаметрал нуқтасига томон чизикли камайиб борадиган қилиб яшаш орқали ўзгартириш функцияси чизикли бўлган бурчак силжишларини ўлчовчи трансформатор ўзгартиргич ишлаб чиқилган;

янги трансформатор ўзгартиргичларнинг узун ферромагнит стерженлари, ишчи ҳаво оралиқлари ва фаол юзаси ўзгарувчан бўлган чулғами, ўзаги ва экран параметрлари тарқоқлигини инобатга олган ҳолда математик моделлари ишлаб чиқилган;

чулғами, ферромагнит ўзаги ва экранининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган янги трансформатор ўзгартиргичлар магнит занжирларини фаол юзаси ўзгарувчан элементгача, шу элементнинг ўзи ва ундан кейинги участкаларга бўлаклаб ҳисоблаш методикаси ишлаб чиқилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичлар статик, динамик ва метрологик тавсифларини тадқиқ этиш учун аналитик боғлиқликлар ҳосил қилинган;

сезгирлиги ва аниқлиги юқори, диапазони кенгайтирилган ҳамда чизикли ўзгартириш функциясига эга бўлган бурчак силжишларини ўлчовчи иккита қурилма ишлаб чиқилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончилиги** тарқоқ параметрли электр ва магнит занжирлари асосий қонунларининг асосли равишда қўлланилиши, шунингдек, назарий ва тажриба натижаларининг ўзаро мос келиши билан асосланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичлар асосий характеристикаларини назарий тадқиқ этиш имкониятини берувчи узун ферромагнит стерженлари, ишчи ҳаво ораликлари ва фаол юзаси ўзгарувчан бўлган чулғами, ўзаги ва экран параметрлари тарқоқлигини ҳисобга олган ҳолда ишлаб чиқилган математик моделлари билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти бурчак силжишларини ўлчовчи трансформатор ўзгартиргичлар янги конструкцияларини яратиш мақсадида умумлашган усулларни, уларнинг ҳисоблаш услубини магнит занжирлари параметрларининг тарқоқликларини ҳисобга олган ҳолда ишлаб чиқилиши ва тузилган параметрик структура схема орқали трансформатор ўзгартиргичлар динамик характеристикаларини тадқиқ этишни соддалаштириши ҳамда ушбу ўзгартиргичларни лойиҳалаш вақтини қисқартиришни таъминлаши билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий этилиши.** Бурчак силжишларини ўлчовчи трансформатор ўзгартиргичларни ишлаб чиқиш бўйича олинган натижалар асосида:

трансформатор ўзгартиргич қурилмаси учун Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги “Интеллектуал мулк маркази” давлат муассасасидан ихтирога патент олинган (№IAP 07519; 2023 й.). Натижада, ўзгартириш функцияси чизикли бўлган эга бўлган бурчак силжишларини ўлчовчи қурилма яратилган;

трансформатор ўзгартиргич қурилмаси учун Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги “Интеллектуал мулк маркази” давлат муассасасидан ихтирога патент олинган (№IAP 07683; 2024 й.). Натижада, сезгирлиги ва аниқлиги юқори, диапазони кенгайтирилган ҳамда чизикли ўзгартириш функциясига эга бўлган бурчак силжишларини ўлчовчи қурилма яратилган;

сезгирлиги ва аниқлиги юқори, диапазони кенгайтирилган ҳамда чизикли ўзгартириш функциясига эга бўлган бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргич қурилмаси “Темирйўлинфратузилма” акциядорлик жамияти “Ховос” электр таъминоти дистанциясига қарашли “Янгиер” контакт тармоғи участкаси(ЭЧК-8)да контакт осмасининг тебраниш ҳолати ҳақидаги аниқ маълумотларни олиш ва унда автотебраниш ҳодисаси

вужудга келганлигини ўз вақтида аниқлаш мақсадида қўлланилган (“Темирйўлинфратузилма” АЖнинг 2024 йил 12-ноябрдаги 4/Е1538-сон маълумотномаси). Натижада, контакт осмасининг тебраниш ҳолатини автоматик назорат қилиш ва электровоз ҳаракатланиши учун хавfli бўлган автотебраниш ҳодисасини ўз вақтида аниқлаш ҳамда тебраниш амплитудалари ҳақидаги аниқ маълумотларни олишга эришилган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Мазкур тадқиқот натижалари 7 та илмий-амалий анжуманларда, шу жумладан 4 та халқаро ва 3 та республика анжуманларида апробациядан ўтказилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича жами 19 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, 1 та хорижий ва 9 та республика журналларида нашр этилган. Шунингдек 2 та ихтирога Ўзбекистон Республикаси “Интеллектуал мулк маркази” давлат муассасасидан патент олинган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ҳажми 117 бетни ташкил қилади.

## ДИССЕРТАЦИЯ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш қисмида** ишнинг долзарблиги асосланган, масаланинг ҳолати ёритиб берилган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот объекти ва предмети тавсифи берилган, тадқиқотнинг республика фан ва технологияларни ривожлантириш устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари тавсифланган, тадқиқотнинг ишончлилиги, назарий ва амалий аҳамияти асосланган, илмий тадқиқотлар натижаларини ишлаб чиқаришга жорий этиш маълумотлари келтирилган.

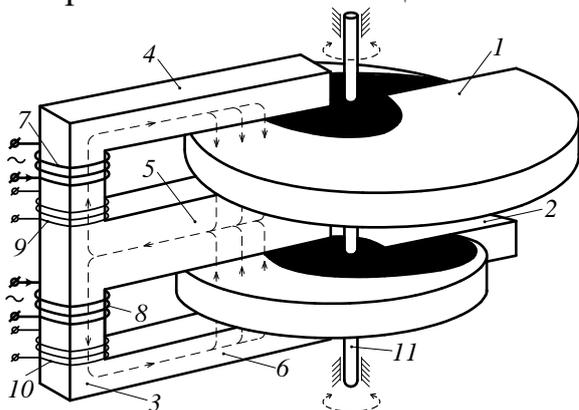
Диссертациянинг **“Муаммонинг ҳолати ва тадқиқот вазифаларини қўйилиши”** деб номланган биринчи бобида бурчак силжишлари фарқини ўлчаш ўзгартиргичларидан фойдаланиладиган назорат ва бошқарув тизимлари схемаларини таҳлил этиш асосида ушбу тизимлардаги ўлчаш ўзгартиргичлари юқори сезгирлик, аниқлик ва чиқиш қувватига, кенг ўлчаш диапазониغا, оғир эксплуатация шароитларида мутадил техник характеристикаларга ҳамда чизикли ўзгартириш функциясига эга бўлиши лозимлиги аниқланди.

Бурчак силжишини ўлчашда мавжуд ўлчаш ўзгартиргичлари асосий характеристикаларини қиёсий таҳлили трансформатор ўлчаш ўзгартиргич(ТЎЎ)лари назорат ва бошқарув тизимлари талабларига нисбатан тўлиқ жавоб беришини кўрсатди. Шу билан бирга, мавжуд ТЎЎ лари сезгирлиги ва аниқлиги пастлиги, ўлчаш диапазони нисбатан тор ҳамда статик характеристикаси ночизик эканлиги аниқланди.

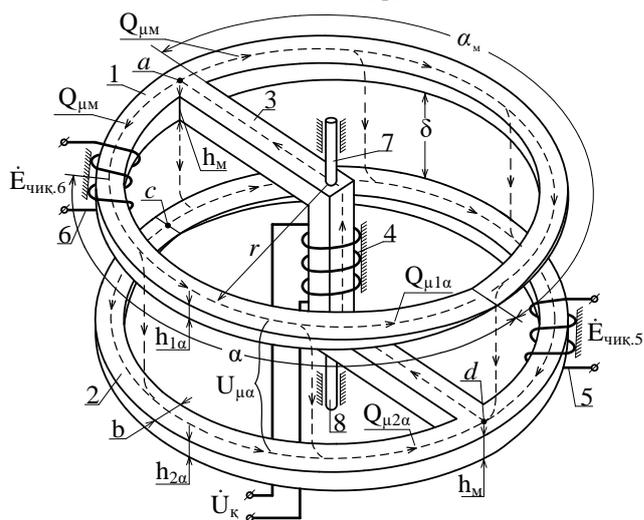
Адабиёт манбаларини таҳлил қилиш натижалари ва қўйилган мақсаддан келиб чиққан ҳолда, тадқиқотнинг асосий вазифалари белгиланди.

Диссертациянинг **“Бурчак силжишларини ўлчовчи трансформатор ўзгартиргичларни такомиллаштириш”** деб номланган иккинчи бобида техник ижодиётнинг энергия-ахборот усулидан фойдаланган ҳолда сезгирлиги ва аниқлиги юқори, диапазони кенгайтирилган ҳамда чизикли ўзгартириш функциясига эга бурчак силжишларини ўлчовчи трансформатор ўзгартиргичларнинг янги конструкциялари ишлаб чиқилган.

Тўў конструкцияларини такомиллаштиришда техник ижодиётнинг энергия-ахборот усулидан фойдаланиш физик табиатидан катъий назар ҳодисалар бир хил русумдаги аналитик тенгламалар билан тавсифлаш, ҳар қандай табиатли занжирда бир хил (тўртта) катталиқ ҳамда (олтита асосий ва уларнинг ҳосилалари) параметрларга таяниш, Тўў ларидаги турли физик табиатли мураккаб физик жараёнлар физик-техник эффект (ФТЭ) деб номланувчи элементар ўзгартиргичларга бўлаклаш ва уларнинг маълум қоидалар билан ўзаро уланган параметрик структура схема (ПСС) деб номланувчи схемага бирлаштириш имконини берди. Иккинчи янги Тўў (2-расм)да маълум бир ишчи ҳаво оралиғи билан ўзаро остин-устун жойлаштирилган иккита берк ҳалқасимон магнит ўтказгич қалинлигини уларнинг туташтиргич билан уланган нуқтасидан унга қарама-қарши диаметрль нуқтасига томон чизиқли  $h_{\alpha} = h_m \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_m}\right)$  (бу ерда  $h_m$  – берк ҳалқасимон магнит ўтказгич қалинлигининг максимал қиймати;  $\alpha$ ,  $\alpha_m$  – бурчак кординатаси ва унинг максимал қиймати) қонуният билан камайиб борадиган қилиб яшаш ўзгартиргични унинг прототипига нисбатан статик характеристикасининг чизиқлилигини таъминлаш имконини берди.



1- расм. Янги Тўў конструктив схемаси: 1, 2 – ўроқсимон магнит ўтказгичлар; 3, 4, 5, 6 – Е – симон магнит ўтказгич стерженлари; 7, 8 ва 9, 10 – чулғамлар секциялари; 11 – ўк

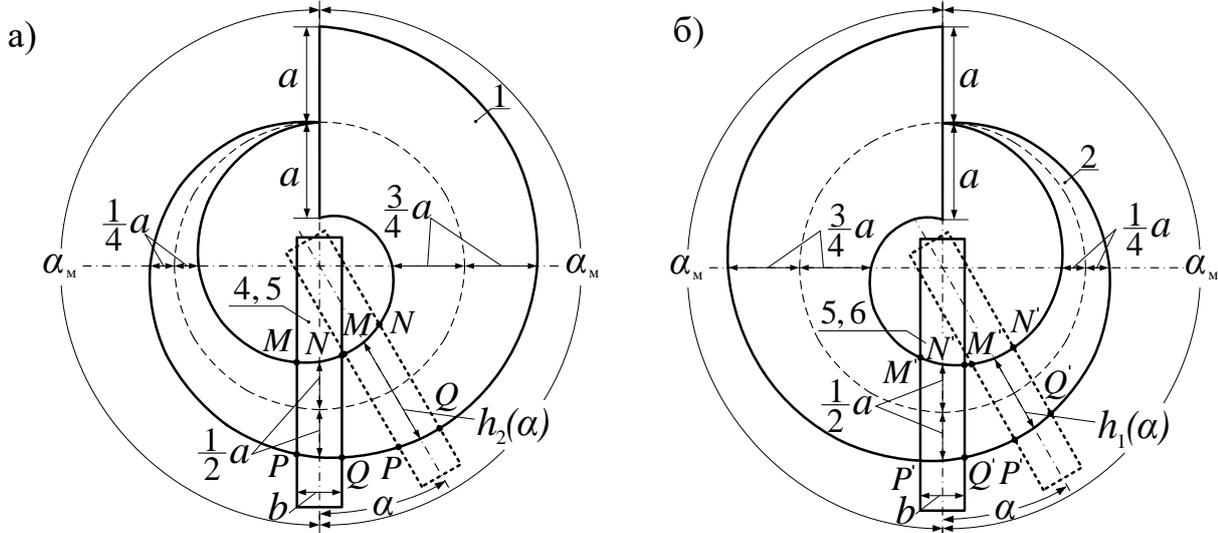


2- расм. Янги Тўў конструктив схемаси: 1, 2 – берк ҳалқасимон магнит ўтказгичлар; 3 – Z – симон ферромагнит туташтиргич; 4 – кўзғатиш чулғами; 5, 6 – ўлчаш чулғамининг секциялари; 7, 8 – ўклар;  $Q_{\mu m}$  – кўзғатиш чулғами ҳосил қилган магнит оқимининг ярми;  $Q_{\mu 1\alpha}$ ,  $Q_{\mu 2\alpha}$  – ишчи магнит оқимлари;  $E_{чик.5}$ ,  $E_{чик.6}$  – чиқиш ЭЮК лари;  $U_{\mu\alpha}$  – кўзғатиш чулғами кучланиши;  $b$ ,  $r$  – ҳар бир берк ҳалқасимон магнит ўтказгичнинг эни ва радиуси;  $\delta$  – берк ҳалқасимон магнит ўтказгичлар орасидаги ишчи ҳаво оралиғи

Яратилган Тўў ларининг биринчи конструкцияси 1- расмда ишчи ҳаво оралиқларида жойлаштирилган чулғам, ферромагнит ўзак ёки электромагнит экран фаол (кўзғалмас ва кўзғалувчан қисм(ҚК)лар орасидаги) юзасини бурчак координатаси  $\alpha$  бўйича чизиқли  $S_{\mu\delta_{иш1}}(\alpha) = \frac{ba}{\pi}(\alpha_m + \alpha)$  (1) ва

$S_{\mu\delta_{\text{иш}2}}(\alpha) = \frac{ba}{\pi}(\alpha_m - \alpha)$  (2) (бу ерда  $a$  – кўзгалувчан ўроқсимон магнит ўтказгич максимал қалинлигининг ярми) қонуният билан ўзгарадиган ўроқсимон ҳалқа кўринишида яшаш ушбу ўзгартиргичларни уларнинг сезгирлиги ва аниқлигини ошириш, диапазони кенгайтириш ва статик характеристикасининг чизиқлилигини таъминлаш имконини берди.

Бурчак силжиши назорат қилинаётган объектга иккита ярим ўқ орқали маҳкамланган кўзгалувчан ўроқсимон магнит ўтказгичлар маълум йўналишда, масалан, соат мили ҳаракатига қарама-қарши йўналишда  $\alpha$  бурчакка бурилганда 4 ва 5 стерженлар билан магнит ўтказгич 1 ўртасидаги ишчи ҳаво оралиғининг фаол юзаси  $S_{\mu\delta_{\text{иш}1}}(\alpha) = \frac{ba}{\pi}(\alpha_m + \alpha)$  қонуният билан (ҚҚ  $\alpha$  бурчакка бурилганда 4 ва 5 стерженлар оралиғига магнит ўтказгич 1 нинг қалинроқ қисми кириб бориши сабабли) чизиқли ортиши ҳисобига уни кесиб ўтаётган магнит оқими  $Q_{\mu1}$  ортади (3- расм, а да 4 ва 5 стерженларнинг ҳолати узук чизиқлар билан кўрсатилган), 5 ва 6 стерженлар билан магнит ўтказгич 2 ўрталаридаги ишчи ҳаво оралиғи фаол юзаси  $S_{\mu\delta_{\text{иш}2}}(\alpha) = \frac{ba}{\pi}(\alpha_m - \alpha)$  қонуният билан (ҚҚ  $\alpha$  бурчакка бурилганда 5 ва 6 стерженлар оралиғига магнит ўтказгич 2 нинг юпқароқ қисми кириб бориши сабабли) чизиқли камайиши ҳисобига уни кесиб ўтаётган оқим  $Q_{\mu2}$  камаяди (3- расм, б да 5 ва 6 стерженларнинг ҳолати узук чизиқлар билан кўрсатилган).



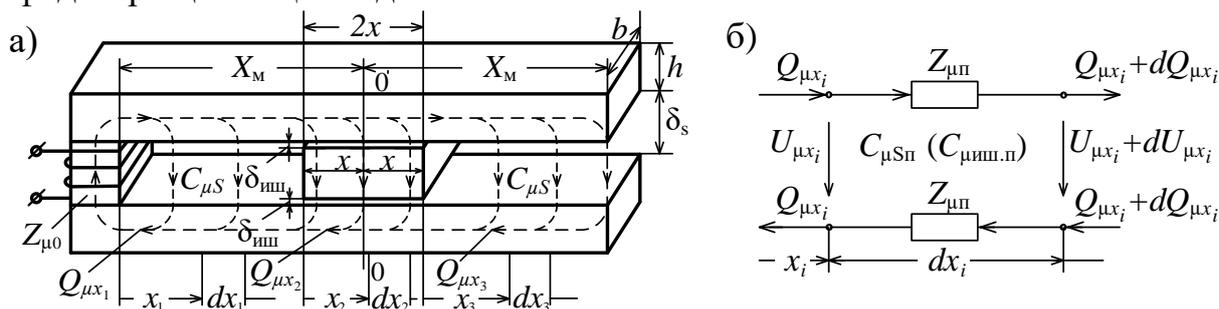
**3- расм. Янги ТЎЎ даги Е- симон магнит ўтказгич 4 ва 5 стерженлари билан магнит ўтказгич 1 (а) ҳамда унинг 5 ва 6 стерженлари билан магнит ўтказгич 2 (б) да ҳосил бўладиган фаол юзаларни ўлчанаётган бурилиш бурчаги координатасига боғлиқлик аналитик ифодасини аниқлашга оид чизмалар**

Бунинг натижасида ўлчаш чулғамининг иккала секциясида улардан ўтаётган магнит оқимларига пропорционал бўлган ЭЮК лар индукцияланади. Ўлчаш чулғамининг секциялари ўзаро кетма-кет ва индуктив жиҳатдан қарама-қарши, яъни дифференциал схема бўйича уланганлиги сабабли ушбу чулғам чиқишида магнит оқимлари ўзгаришига ва, бинобарин, ҚҚ бурилиш бурчагига пропорционал бўлган иккиланган сигнал ҳосил бўлади.

Диссертациянинг “Бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичлар математик моделлари” деб номланган учинчи бобида чулғами, ферромагнит ўзаги ва экранининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган янги ТЎЎ лар математик моделлари ишлаб чиқилган.

Янги ТЎЎ лар математик моделларни ишлаб чиқишда қуйидаги чекловлар қабул қилинган: 1) магнит занжири чизикли, яъни занжир унда магнит ўтказгич сифатида қўлланиладиган ферромагнит материал магнит характеристикасининг тўғри чизикли қисмида ишлайди; 2) ферромагнит ўтказгичларнинг чет қисмлари, ён томонлари ва қирралари орқали бирлашадиган сочилган магнит оқимлари ҳамда йиғиқ ҳолда жойлашган кўзғатиш ва ўлчаш чулғамларининг ўлчамлари ҳисобга олинмайди; 3) янги ТЎЎ лар магнит занжирларидаги ҳар бири иккитадан ясалган П- ва ҳалқасимон магнит ўтказгичлар, фаол юзалари ўзгарувчан ўроқ(спирал)симон чулғамлар, ферромагнит ўзақлар ҳамда электромагнит экранлар бир хил хосса ва ўлчамларга эга деб ҳисобланади. Янги ТЎЎ лар магнит занжирларини назарий тадқиқ этишда кўзғалувчан қисм(КҚ)га эга бўлган тарқоқ параметрли магнит занжирларини ҳисоблашда энг қулай ва аниқлиги юқори бўлган усул - магнит занжирларини характерли бўлақларга ажратиб ҳисоблаш усулидан фойдаланилди. Бунда занжирнинг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган элементи гача бўлган бўлагидаги координата  $x_1$ , шу элементдаги координата  $x_2$  ва элементдан кейинги бўлагидаги координата эса  $x_3$  билан белгиланди ҳамда  $x_1$  координата бошини магнит занжирининг кўзғатиш чулғами ўрнатилган қисмидан олинди (4- расм, а).

Чулғами, ферромагнит ўзаги ва экранининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган янги ТЎЎ лар магнит занжирларини юқорида қайд этилган усул ёрдамида ҳисоблашда ҳар бир ҳолат учун занжирнинг тегишли участкалари (4- расм, б)га оид дифференциал тенгламалар тузиш ва уларни чегаравий шартларни инобатга олган ҳолда ечиш орқали ишчи магнит оқимлари ифодалари ҳосил қилинди.



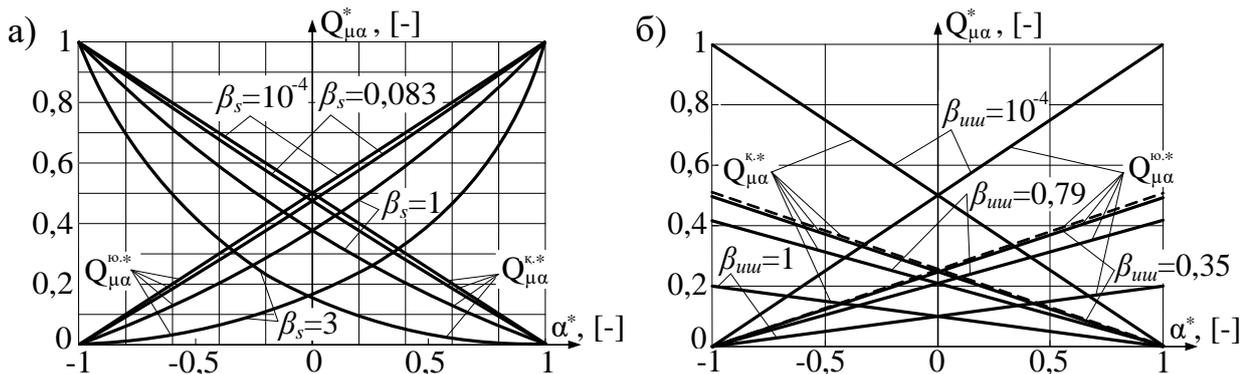
4- расм. Фаол юзаси ўзгарувчан бўлган янги ТЎЎ магнит занжирининг конструктив (а) ва элементар  $dx_i$  узунликдаги участкасининг алмашлаш (б) схемалари

Хусусан, ўлчаш чулғамининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган янги ТЎЎ занжиридаги магнит оқимлари учун қуйидаги ифодалар ҳосил қилинди:

$$Q_{\mu\alpha}^{\text{ю.}} = \frac{2F_k ch \beta_s}{\Delta_1} sh[0,5\beta_s(1 + \alpha^*)], \quad (3) \quad Q_{\mu\alpha}^{\text{к.}} = \frac{2F_k ch \beta_s}{\Delta_1} sh[0,5\beta_s(1 - \alpha^*)], \quad (4)$$

бу ерда  $F_k$  – кўзғатиш чулғамининг магнит юритувчи кучи,  $[A]$  ;  
 $\gamma_s = \sqrt{2Z_{\mu\pi}C_{\mu\pi}}$  – магнит майдонини магнит занжири бўйлаб тарқалиш  
коэффициенти,  $[m^{-1}]$ ;  $X_M = \frac{a}{\pi}\alpha_M$  – координатанинг максимал қиймати  $x =$   
 $\frac{a}{2\pi}(\alpha_M + \alpha)$ ,  $[m]$ ;  $\delta_{иш}$  – ишчи ҳаво оралиғи  $[m]$ ;  $b, h, \delta_s$  – П- симон магнит  
ўтказгич узун стерженларининг қалинлиги, баландлиги ва улар орасидаги ҳаво  
оралиғи  $[m]$ ;  $\beta_s = \gamma_s \frac{a}{\pi} \alpha_M = \gamma_s X_M$  – магнит майдонини магнит занжири бўйлаб  
сўниш коэффициенти,  $[-]$  ;  $\alpha^* = \alpha/\alpha_M$  – нисбий бирликдаги бурчак  
координата,  $[-]$  ;  $\Delta_1 = Z_{\mu 0} sh(2\beta_s) + (\gamma_s/C_{\mu\pi}) ch(2\beta_s)$  ,  $[H^{-1}]$  ;  
 $Z_{\mu\pi} = (\mu\mu_0 bh)^{-1}$ ,  $[H^{-1} \cdot m^{-1}]$ ,  $C_{\mu\pi} = \mu_0(b/\delta_s)$ ,  $[H \cdot m^{-1}]$  – П- симон магнит  
ўтказгич узун стерженлари мос равишда магнит қаршилиги ва улар орасидаги  
ишчи ҳаво оралиғи магнит сифимининг занжир узунлик бирлигига тўғри  
келувчи погон қийматлари;  $Z_{\mu 0} = (\mu\mu_0 bh)^{-1} \delta_s$ ,  $[H^{-1}]$  - П- симон магнит  
ўтказгич асосининг магнит қаршилиги;  $\mu = const$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [H \cdot m^{-1}]$  –  
мос равишда магнит ўтказгич материалининг нисбий магнит  
сингдирувчанлиги ва магнит доимийси. Занжирларнинг геометрик ўлчамлари  
4- расм, а да келтирилган.

Ҳосил қилинган (3) ва (4) ифодалар ҳамда улар асосида  $\beta_s$  нинг турли  
қийматларида қурилган  $Q_{\mu\alpha}^{ю.*} = f(\alpha^*)$  ва  $Q_{\mu\alpha}^{к.*} = f(\alpha^*)$  функциялар графиклари  
(5- расм, а) таҳлили шуни кўрсатадики (бу ерда  $Q_{\mu\alpha}^{ю.*} = Q_{\mu\alpha}^{ю.}/Q_{\mu\alpha}^{ю.(max)}$  ва  $Q_{\mu\alpha}^{к.*} =$   
 $Q_{\mu\alpha}^{к.}/Q_{\mu\alpha}^{к.(max)}$  бўлиб,  $Q_{\mu\alpha}^{ю.(max)} = Q_{\mu\alpha}^{к.(max)} = [F_k sh(2\beta_s)] \Delta_1^{-1}$  га тенг) (4- расм,  
а), ишчи магнит оқимларининг  $\alpha$  бурчакка боғлиқлиги ночизик бўлиб,  
ночизиклик даражаси ( $\varepsilon_{чул.}$ )  $\beta_s$  нинг ортиши билан ортиб боради, масалан,  $\beta_s$   
графикларда келтирилган қийматлари учун  $\varepsilon_{чул.}$  мос равишда 0,007 % ,  
0,07 % , 1,81 % ва 4,57 % ни ташкил этди.



5- расм.  $Q_{\mu\alpha}^{ю.*} = f(\alpha^*)$  ва  $Q_{\mu\alpha}^{к.*} = f(\alpha^*)$  функцияларнинг  $\beta_s$  нинг турли қийматларида  
қурилган графиклари

Фаол юзаси ўзгарувчан бўлган чулғам кўзғатиш чулғами вазифасини  
бажарган ҳолатда ҳам ишчи магнит оқимлари учун (3) ва (4) кўринишидаги  
ифодалар ҳосил бўлиши аниқланди.

Ферромагнит ўзагининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган ва узун параллел  
стерженлар орасидаги  $\delta_s$  ҳаво оралиғи магнит сифими нолга тенг ( $C_{\mu\pi} \approx 0$ )

деб қабул қилинган янги ТЎЎ магнит занжиридаги ишчи магнит оқимлари учун куйидаги ифодалар ҳосил қилинди:

$$Q_{\mu\alpha}^{\text{ю.}} = \frac{\dot{F}_k}{2\Delta_{21}^*} sh[\beta_{\text{иш}}(1 + \alpha^*)], \quad (5) \quad Q_{\mu\alpha}^{\text{к.}} = \frac{\dot{F}_k}{2\Delta_{22}^*} sh[\beta_{\text{иш}}(1 - \alpha^*)], \quad (6)$$

бунда  $\Delta_{21(2)}^* = [Z_{\mu 0} + Z_{\mu}(1 \mp \alpha^*)] sh[\beta_{\text{иш}}(1 \pm \alpha^*)] + \frac{\beta_{\text{иш}}}{Y_{\mu\text{иш.п}}} ch[\beta_{\text{иш}}(1 \pm \alpha^*)], [H^{-1}]$ ;

$$\beta_{\text{иш}} = \gamma_{\text{иш}} \frac{a}{\pi} \alpha_M = \gamma_{\text{иш}} X_M; \quad \gamma_{\text{иш}} = \sqrt{2Z_{\mu\text{п}} Y_{\mu\text{иш.п}}}; \quad Y_{\mu\text{иш.п}} = \frac{1}{\sqrt{(C_{\mu\text{иш}})^{-2} + Z_{\mu\text{сп}}^2 \cdot X_M}}, [H \cdot$$

$m^{-1}]$ ;  $C_{\mu\text{иш}} = \mu_0 b X_M / 2\delta_{\text{иш}}, [H]$  –Е- симон магнит ўтказгич стержени ва фаол юзаси ўзгарувчан спиралсимон ферромагнит ўзак орасидаги ишчи ораликлари мос равишда тўла магнит ўтказувчанлиги ва сиғими;  $Z_{\mu\text{сп}}, [H^{-1}]$  - спиралсимон ўзак фаол қисмининг магнит оқими йўлидаги тўла қаршилиги (“±” ва “∓” лардаги юқори ишоралар  $\Delta_{21}^*$ , куйи ишоралар эса  $\Delta_{22}^*$  га тегишли).

Ҳосил қилинган (5) ва (6) ифодалар ҳамда улар асосида  $\beta_s$  нинг турли қийматларида қурилган  $Q_{\mu\alpha}^{\text{ю.*}} = f(\alpha^*)$  ва  $Q_{\mu\alpha}^{\text{к.*}} = f(\alpha^*)$  функциялар графиклари таҳлили шуни кўрсатадики (5- расм, б), ишчи магнит оқимларининг  $\alpha$  бурчакка боғлиқлиги  $\beta_s$  нинг турли қийматларида ҳам чизиклилигини сақлаб қолиши аниқланди. Бунда ҳисоблашлар ва тажриба натижаларининг фарқи 3,5 ÷ 5,5 % дан ошмади. Айтиб ўтиш жоизки, янги ТЎЎ нинг ясалган намунасида  $\beta_{\text{иш}}$  қиймати фақат ферромагнит материалнинг нисбий магнит сингдирувчанли қийматини ўзгартириш ҳисобидан ўзгартирилган.

Ферромагнит ўзагининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган ва узун параллел стерженлар орасидаги  $\delta_s$  ҳаво оралиғи магнит сиғими нолга тенг эмас ( $C_{\mu\text{сп}} \neq 0$ ), деб қабул қилинган янги ТЎЎ магнит занжиридаги ишчи магнит оқимлари учун куйидаги ифодалар ҳосил қилинди:

$$Q_{\mu\alpha} = \frac{8\dot{F}_k}{C_{\mu\text{сп}} Y_{\mu\text{иш.п}}^2 \Delta_{31}^*} \{ \gamma_s^2 Y_{\mu\text{иш.п}}^2 sh^2[0,5\beta_s(1 \mp \alpha^*)] sh[\beta_{\text{иш}}(1 \pm \alpha^*)] +$$

$$+ \gamma_s^2 Y_{\mu\text{иш.п}} ch^2[0,5\beta_s(1 \mp \alpha^*)] sh[\beta_{\text{иш}}(1 \pm \alpha^*)] +$$

$$+ 0,5\gamma_s \gamma_{\text{иш}} (C_{\mu\text{сп}} + Y_{\mu\text{иш.п}}) sh[\beta_{\text{иш}}(1 \mp \alpha^*)] ch[\beta_{\text{иш}}(1 \pm \alpha^*)] \}, \quad (7)$$

бу ерда  $\Delta_{31(2)}^* = -\frac{8}{Y_{\mu\text{иш.п}}^3 C_{\mu\text{сп}}} \{ \gamma_s^2 \gamma_{\text{иш}} Y_{\mu\text{иш.п}} ch^2[0,5\beta_s(1 \mp \alpha^*)] ch[\beta_{\text{иш}}(1 \pm \alpha^*)] +$

$+ \gamma_s^2 \gamma_{\text{иш}} C_{\mu\text{сп}} sh^2[0,5\beta_s(1 \mp \alpha^*)] ch[\beta_{\text{иш}}(1 \pm \alpha^*)] +$   
 $+ 0,5\gamma_s (\gamma_{\text{иш}}^2 Y_{\mu\text{сп}} + \gamma_s^2 Y_{\mu\text{иш.п}}) sh[\beta_{\text{иш}}(1 \mp \alpha^*)] sh[\beta_{\text{иш}}(1 \pm \alpha^*)] \}, [H^{-3} \cdot m^{-1}]$   
 (“±” ва “∓” лардаги юқори ишоралар тадқиқ этилаётган магнит занжирининг юқори стерженидаги магнит оқими  $Q_{\mu\alpha}^{\text{ю.}}$  ва  $\Delta_{31}^*$  га, улардаги куйи ишоралар – занжирнинг куйи стерженидаги магнит оқими  $Q_{\mu\alpha}^{\text{к.}}$  ва  $\Delta_{32}^*$  га тегишли бўлиб,  $\Delta_{31}^*$  ва  $\Delta_{32}^*$  ларнинг  $Z_{\mu 0} \neq 0$  даги ифодалари диссертацияда келтирилган).

Ҳосил қилинган (7) ифодалар таҳлили  $\delta_s \geq 4\delta_{\text{иш}}$  шарт бажарилганда  $Q_{\mu\alpha}^{\text{ю.}}$  ва  $Q_{\mu\alpha}^{\text{к.}}$  лар қийматларининг уларнинг  $C_{\mu\text{сп}} \approx 0$ , деб ҳисобланган ҳолатдаги қийматларидан фарқи 1,2 ÷ 1,4 % дан ошмаслигини кўрсатди.

Ферромагнит ўзаги фаол юзаси ўзгарувчан бўлган иккинчи янги ТЎЎ (2-

расм) магнит занжирининг иккала берк ҳалқасимон магнит ўтказгичлардаги ишчи магнит оқимлари ( $Q_{\mu 1\alpha}$ ,  $Q_{\mu 2\alpha}$ ) ва магнит индукциялари ( $B_{\mu 1\alpha}$ ,  $B_{\mu 2\alpha}$ ) ҳамда улар орасидаги ҳаво оралиғидаги магнит индукцияси ( $B_{\mu\delta}$ ) учун қуйидаги ифодалар ҳосил қилинди:

$$Q_{\mu 1\alpha} = Q_{\mu M} \alpha^*, \quad (8) \quad Q_{\mu 2\alpha} = Q_{\mu M} (1 - \alpha^*), \quad (9)$$

$$B_{\mu 1\alpha} = B_{\mu 2\alpha} = Q_{\mu M} (bh_M)^{-1}, \quad (10) \quad B_{\mu\delta} = Q_{\mu M} (bl_M)^{-1}, \quad (11)$$

бу ерда  $Q_{\mu M} = F_K / \left[ 2Z_{\mu 0} + l_M (\mu\mu_0 bh_M)^{-1} + (C_{\mu сп} X_M)^{-1} \right]$  – ҳар бир берк ҳалқасимон магнит ўтказгичдаги магнит оқимининг максимал қиймати,  $Wb$ ;  $l_M$  – берк ҳалқасимон магнит ўтказгич бурчак координатаси  $\alpha$  максимал қиймати  $\alpha_M$  га мос келувчи ҳалқа айланасининг максимал қиймати,  $[m]$ .

Ҳосил қилинган (8)-(11) ифодалар таҳлили шуни кўрсатадики, агар берк ҳалқасимон магнит ўтказгичлар қалинликлари уларнинг туташтиргич билан уланган нуқтасидан унга қарама-қарши диаметрль нуқтасига томон чизикли  $h_\alpha = h_M (1 - \alpha^*)$  қонуният билан камайиб борадиган қилиб ясалса, у ҳолда улардаги ишчи магнит оқимлари бурчак координата бўйича қатъий чизикли қонуният билан тақсимланади, берк ҳалқасимон магнит ўтказгичлардаги ва улар орасидаги ишчи ҳаво оралиғидаги магнит индукцияларининг қийматлари эса бурчак координатасига боғлиқ бўлмайди. Ҳалқасимон магнит ўтказгичлардаги магнит индукцияси қийматларининг ўзгармасдан сақланиши ҳалқалар магнит қаршилиги қийматини бурчак координатаси  $\alpha$  бўйича ўзгармаслигини таъминлаши аниқланди.

Электромагнит экранининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган ва унинг магнит ўтказувчанлиги нолга тенг, яъни  $Y_{\mu эк} \approx 0$ , деб қабул қилинган янги ТЎЎ магнит занжиридаги ишчи магнит оқимлари учун қуйидаги ифодалар ҳосил қилинди:

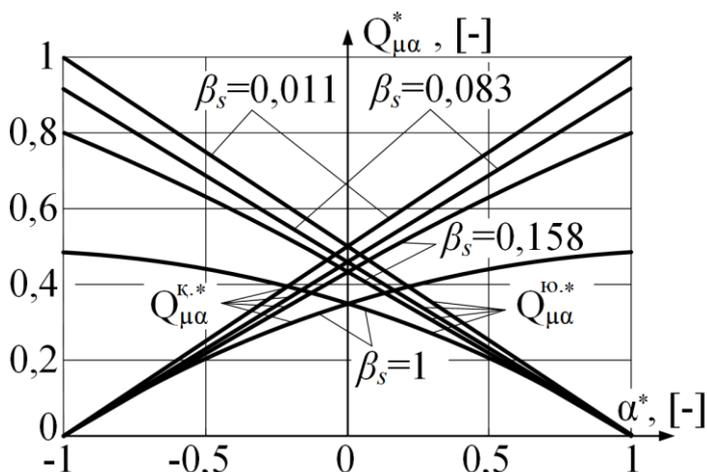
$$Q_{\mu\alpha} = \frac{F_K C_{\mu s}}{\Delta_{41}^*} \left\{ sh[\beta_s (1 \mp \alpha^*)] + \beta_s (1 \pm \alpha^*) sh^2 \left[ \frac{1}{2} \beta_s (1 \mp \alpha^*) \right] \right\}, \quad (12)$$

бу ерда  $\Delta_{41(2)}^* = 0,5\beta_s^2 (1 \pm \alpha^*) sh[\beta_s (1 \pm \alpha^*)] + Z_{\mu 0} C_{\mu s} sh[\beta_s (1 \mp \alpha^*)] + Z_{\mu 0} C_{\mu s} \beta_s (1 \pm \alpha^*) sh^2 [0,5\beta_s (1 \mp \alpha^*)] + \beta_s ch[\beta_s (1 \mp \alpha^*)]$ ,  $[H^{-1} \cdot m^{-1}]$ .

Ҳосил қилинган (12) ифода ва улар асосида  $\beta_s$  нинг турли қийматлари учун қурилган  $Q_{\mu\alpha}^{ю.*} = f(\alpha^*)$  ва  $Q_{\mu\alpha}^{ю.*} = f(\alpha^*)$  функциялар графиклари (6- расм) таҳлили  $\beta_s$  нинг ортиб бориши билан ишчи магнит оқимларининг бурчак координата бўйича ночизик тақсимланиш даражаси ортиб боришини кўрсатди.

Ўлчаш чулғами, ферромагнит ўзаги ва электромагнит экранининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган янги ТЎЎ лари магнит занжирлари учун ҳосил қилинган математик моделлар таҳлили шуни кўрсатдики, ферромагнит ўзагининг фаол юзаси ўзгарувчан ва магнит занжири учта (унинг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган элементиғача, шу элементнинг ўзи ва ундан кейинги) характерли бўлакларга бўлинган ҳолат учун тузилган дифференциал тенгламалар ҳамда уларнинг ечимлари кўринишидаги математик моделлар умумий ҳисобланади. Чунки, агар ушбу дифференциал тенгламаларда

$Y_{\mu иш.п} = C_{\mu сп}$  ва  $\gamma_{иш} = \gamma_s$ , деб ҳисобланса, у ҳолда ўлчаш чулғамининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган янги ТЎЎ лари магнит занжирларига оид



6- расм.  $Q_{\mu\alpha}^{ю.*} = f(\alpha^*)$  ва  $Q_{\mu\alpha}^{к.*} = f(\alpha^*)$  функцияларнинг  $\beta_s$  нинг турли қийматлари учун қурилган графиклари

ишчи магнит оқимларининг ҚҚ бурчак силжишига боғлиқлиги чизикли эканлигини ва уларни яшашда ишлатиладиган рангли металл миқдори кам бўлишини кўрсатди. Шунинг учун ҳам кейинги назарий ва тажриба тадқиқотлари ферромагнит ўзагининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган иккита янги ТЎЎ устида олиб борилди.

Янги ТЎЎ ларда магнит ўтказгич сифатида қўлланилган ферромагнит материал магнитланиш характеристикасидаги ночизикликни ўзгартиргичлар характеристикаларига таъсири уни иккита ҳаддан ташкил топган тўлиқсиз даражали полином функция  $H = k_1 B + k_2 B^3$  (бу ерда  $k_1, [A/(T \cdot m)]$ ,  $k_2, [A/(T^3 \cdot m)]$  – аппроксимация коэффициентлари) орқали инобатга олинган. Натижада ҳосил қилинган ночизик дифференциал тенглама итерация усули ечилиб, ишчи магнит оқимининг қуйидаги ифодаси олинган:

$$Q_{\mu\alpha} = \frac{\gamma_{иш}^2 F_{к}}{2b_1 \Delta_{21}^*} sh[\beta_{иш}(1 \pm \alpha^*)] - \frac{b_2}{b_1} \cdot \frac{F_{к}^3}{8(\Delta_{22}^*)^3} sh^3[\beta_{иш}(1 \pm \alpha^*)]. \quad (13)$$

бу ерда  $b_1 = 2k_1 S_{\mu}^{-1} C_{\muиш.п}, [m^{-2}]$ ;  $b_2 = 2k_2 S_{\mu}^{-3} C_{\muиш.п}, [Wb^{-2} \cdot m^{-2}]$ .

Яратилган ТЎЎ ҳисоблашда ферромагнит материали магнитланиш характеристикаси ночизиклигини инобатга олиш ҳисоблаш аниқлигини ошириш имконини берди, яъни ҳисоблаш хатолиги тажриба натижаларига нисбатан (6 ÷ 8) % дан (3,5 ÷ 5,5) % гача камаяди.

Тадқиқ этилган иккала янги ТЎЎ чиқиш катталикларининг қуйидаги ифодалари ҳосил қилинди:

$$\dot{E}_{чик,1} = -j\omega_{\Delta} w_{чик} (\dot{Q}_{\mu\alpha}^{ю.*} - \dot{Q}_{\mu\alpha}^{к.*}), \quad (14) \quad \dot{E}_{чик,2} = -j2\omega_{\Delta} w_{чик} \dot{Q}_{\mu\alpha} \alpha^*, \quad (15)$$

бу ерда  $\omega_{\Delta}$  – манба кучланишининг бурчак частотаси,  $[s^{-1}]$ ;  $w_{чик}$  – ўлчаш чулғами секцияси ўрамлари сони,  $[-]$ .

Диссертациянинг “**Бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичлар асосий характеристикалари**” деб номланган тўртинчи боби янги ТЎЎ ларнинг статик, динамик, хатолик ва ишончлилик каби характеристикалари тадқиқ этишга бағишланган.

Иккала янги ТЎЎ статик характеристикаларининг аналитик

математик моделлар, агар  $\gamma_{\muиш.п} = 0$  ва  $\gamma_{иш} = 0$ , деб ҳисобланса, у ҳолда экранининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган янги ТЎЎ лари магнит занжирларига оид математик моделлар ҳосил бўлади.

Тадқиқ этилган магнит занжирларининг таҳлили ферромагнит ўзагининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган янги ТЎЎ дагина

тенгламалари нисбий бирликларда қуйидаги кўринишларда ҳосил қилинган:

$$E_{\text{чик.1}}^* = (4C_{\mu\text{иш}})^{-1} \{(\Delta_{21}^*)^{-1} \text{sh}[\beta_{\text{иш}}(1 + \alpha^*)] - (\Delta_{22}^*)^{-1} \text{sh}[\beta_{\text{иш}}(1 - \alpha^*)]\}. \quad (16)$$

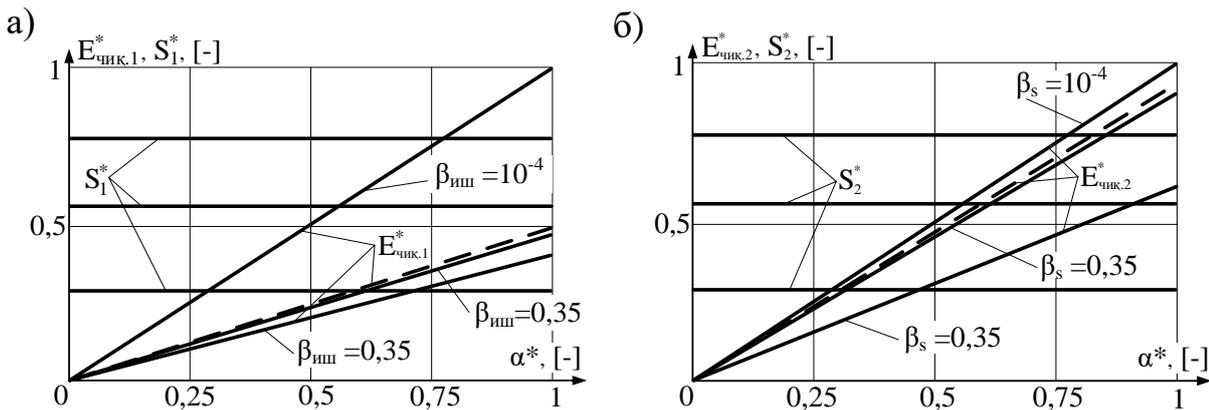
$$E_{\text{чик.2}}^* = (C_{\mu s})^{-1} \left[ 2Z_{\mu 0} + X_M(\mu\mu_0 bh_M)^{-1} + (C_{\mu s})^{-1} \right]^{-1} \cdot \alpha^*. \quad (17)$$

Янги ТЎЎ лар статик характеристикаларининг ҳосил қилинган (16) ва (17) тенгламалари ва улар асосида қурилган графиклари (7- расм) таҳлили иккала янги ТЎЎ нинг статик характеристикаси ўлчаш диапазонида  $\beta$  нинг исталган қийматларида ҳам чизиқли кўринишга эга эканлигини кўрсатди.

Иккала янги ТЎЎ сезгирликларининг аналитик тенгламалари нисбий бирликларда қуйидаги кўринишларда ҳосил қилинган:

$$S_1^* = \left\{ \frac{\Delta_{21}^* \beta_{\text{иш}} \text{ch}[\beta_{\text{иш}}(1 + \alpha^*)] - (\Delta_{21}^*)' \text{sh}[\beta_{\text{иш}}(1 + \alpha^*)]}{4C_{\mu\text{иш}}(\Delta_{21}^*)^2} + \frac{\Delta_{22}^* \beta_{\text{иш}} \text{ch}[\beta_{\text{иш}}(1 - \alpha^*)] + (\Delta_{22}^*)' \text{sh}[\beta_{\text{иш}}(1 - \alpha^*)]}{4C_{\mu\text{иш}}(\Delta_{22}^*)^2} \right\}, \quad (18)$$

$$S_2^* = \left[ 2Z_{\mu 0} + X_M(\mu\mu_0 bh_M)^{-1} + (C_{\mu s})^{-1} \right]^{-1}. \quad (19)$$



7- расм. Янги ТЎЎ лар статик характеристикалари ва сезгирликларининг  $\beta_{\text{иш}}$  ва  $\beta_s$  лар турли қийматларидаги графиклари

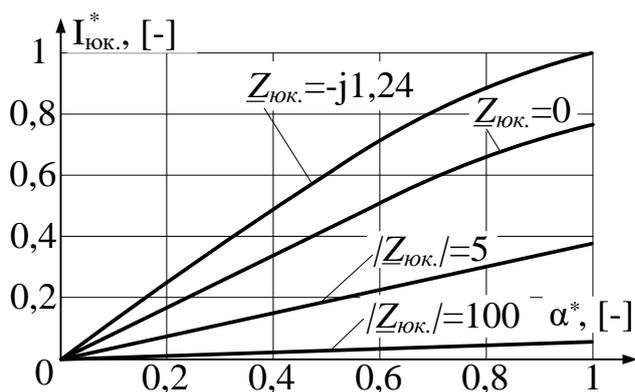
(18) ва (19) ифодалар ва улар асосида  $\beta_{\text{иш}}$  ва  $\beta_s$  ларнинг турли қийматларида қурилган  $S_1^* = f(\alpha^*)$  ва  $S_2^* = f(\alpha^*)$  функциялар графиклари (7- расм) таҳлили шуни кўрсатдики, иккала янги ТЎЎ нисбий сезгирлигининг қиймати ўлчаш диапазонида ўзгармайди.

Яратилган ТЎЎ лар юклама статик характеристикалари биринчи ТЎЎ мисолида тадқиқ этилган бўлиб, унинг қуйидаги аналитик тенгламаси ҳосил қилинди:

$$I_{\text{юк.}} = \frac{\omega_{\text{э}} M U_{\text{к}}}{\sqrt{[R_{\text{к.}}(R_{\text{ўлч.}} + R_{\text{юк.}}) - X_{\text{к.}}(X_{\text{ўлч.}} \pm X_{\text{юк.}}) + \omega_{\text{э}}^2 M^2]^2 + [X_{\text{к.}}(R_{\text{ўлч.}} + R_{\text{юк.}}) + R_{\text{к.}}(X_{\text{ўлч.}} \pm X_{\text{юк.}})]^2}}, \quad (20)$$

бу ерда  $U_{\text{к}}$  – манба кучланиши, [V];  $R_{\text{к.}}$ ,  $R_{\text{ўлч.}}$ ,  $R_{\text{юк.}}$  ва  $X_{\text{к.}}$ ,  $X_{\text{ўлч.}}$ ,  $X_{\text{юк.}}$  – кўзға-тиш ва ўлчаш чулғамлари ҳамда юкламанинг мос равишда актив ва реактив қаршиликлари, [ $\Omega$ ];  $M$ , [H] – ўзаро индуктивлик.

(20) функция ва унинг графиги (8- расм) таҳлили шуни кўрсатадики ( $I_{\text{юк.}}^* = I_{\text{юк.}}/I_{\text{юк.маx}}$ ;  $I_{\text{юк.маx}} - I_{\text{юк.}}$  нинг  $Z_{\text{юк.}} = -jX_{\text{юк.}} = jX_{\text{ўлч.}}$  ва  $\alpha^* = 1$  лардаги қиймати),  $|Z_{\text{юк.}}| \gg \omega L_{\text{юк.}}$  шарт бажарилганда янги ТЎЎ юклама статик характеристикасининг графиклари худди юкламасиз статик характеристика графикларидек чизиклилигини сақлаб қолади,  $|Z_{\text{юк.}}| \approx \omega M$  шарт бажарилганда янги ТЎЎ юклама статик характеристикаси графикларида ночизиклик юзага келади,  $Z_{\text{юк.}} = -jX_{\text{юк.}} = jX_{\text{ўлч.}}$  шарт бажарилганда эса янги ТЎЎ ўлчаш чулғами кучланишлар резонансига созланиб, юклама токи ўзгартиргич кўзгалувчан қисми бурилиш бурчаги  $\alpha$



8- расм. Янги ТЎЎ нинг юклама қаршилигини турли қийматлари учун қурилган статик характеристикаси графиклари

нинг тегишли қийматларида энг катта қийматларга эга бўлади.

Янги ТЎЎ лар динамик характеристикаларини тадқиқ этиш мақсадида ишлаб чиқилган ПСС таҳлили янги ТЎЎ НБТ ларининг структура схемаларида реал дифференциалловчи звено кўринишида тасвирлаш мумкинлигини кўрсатди.

Киришига сакраб ўзгарувчи бурчак силжиши  $Q_M(t) = Q_{M0}$  берилган янги ТЎЎ чиқишидаги ўткинчи кучланиш ифодаси қуйидагича аниқланди:

$u_{\text{э.чик.1}}(t) = K Q_{M0} \omega_3 (1 - e^{-\frac{t}{T_\mu}}) \sin(\omega_3 t + \varphi + 90^\circ) = u_{11}(t) + u_{12}(t)$ , (21)  
бу ерда  $K$ ,  $[H \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$ ; – пропорционаллик коэффициенти;  $T_\mu = R_\mu C_\mu$ ,  $[s]$  – ТЎЎ магнит занжирининг вақт доимийси;  $\varphi$  – манба кучланиши ва токи орасидаги фаза силжиш бурчаги,  $[degri]$ .

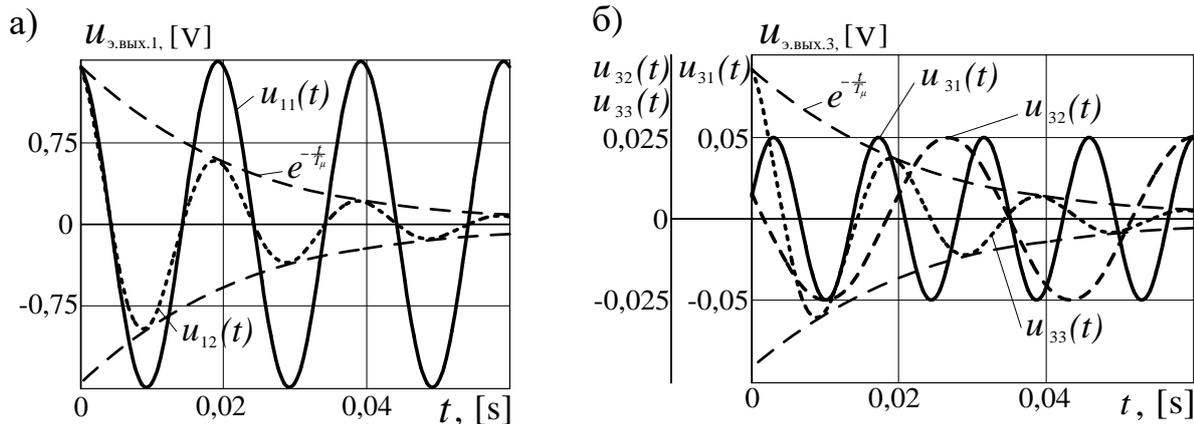
(21) ифода ва унинг асосида қурилган графиклар (9- расм, а) таҳлили янги ТЎЎ киришига қиймати сакраб ўзгарадиган бурчак силжиши берилганда унинг чиқишидаги ўткинчи кучланиш частотаси манба токи частотасига тенг бўлган синусоидал ўзгарувчи турғун ва қиймати магнит занжирининг параметрларига пропорционал равишда камайиб борувчи эркин ташкил этувчилар йиғиндисидан иборат бўлишини кўрсатди.

Яратилган ТЎЎ киришига қиймати чизикли ортиб борувчи бурчак силжиши  $Q_M(t) = k_{Q_M} t$  берилганда унинг чиқишидаги частотаси манба токи частотасига тенг бўлган синусоидал ўзгарувчи ўткинчи кучланиш турғун, амплитуда қиймати чизикли ортиб борувчи ва қиймати магнит занжирининг параметрларига пропорционал равишда камайиб борувчи эркин ташкил этувчилар йиғиндисидан иборат бўлиши аниқланди, яъни:

$u_{\text{э.чик.2}}(t) = U_{\text{эм21}} \sin(\omega_3 t + \varphi - 90^\circ) + U_{\text{эм22}}(t) \sin(\omega_3 t + \varphi + 90^\circ) + U_{\text{эм23}} e^{-\frac{t}{T_\mu}} \sin(\omega_3 t + \varphi - 90^\circ) = u_{21}(t) + u_{22}(t) + u_{23}(t)$ , (22)  
бу ерда  $U_{\text{эм21}} = U_{\text{эм23}} = K k_{Q_M} T_\mu \omega_3 I_{\text{экм}}$ ;  $U_{\text{эм22}}(t) = K k_{Q_M} \omega_3 I_{\text{экм}} t$ ,  $[V]$ .

Киришига  $Q_M(t) = Q_{Mm} \sin \omega_M t$  синусоидал қонуният билан ўзгарувчи

бурчак силжиши берилган янги ТЎЎ чиқишидаги ўткинчи кучланиш ифодаси қуйидагича аниқланди:



9- расм. Киришига сакраб ўзгарувчи (а) ва синусоидал ўзгарувчи (б) бурчак силжиши берилган янги ТЎЎ ўткинчи кучланишлари

$$u_{\text{э.чик.2}}(t) = U_{\text{эм21}} \sin[(\omega_{\text{э}} + \omega_{\text{м}})t + \varphi_2] + U_{\text{эм22}} \sin[(\omega_{\text{э}} - \omega_{\text{м}})t + \varphi_3] + U_{\text{э23}} e^{-\frac{t}{T_{\mu}}} \cos(\omega_{\text{э}} t + \varphi) = u_{21}(t) + u_{22}(t) + u_{23}(t), \quad (23)$$

бу ерда  $\varphi_1 = \arctg(\omega_{\text{м}} T_{\mu})$ ;  $\varphi_2 = \varphi - \varphi_1$ ;  $\varphi_3 = -(\varphi + \varphi_1)$ ;  $U_{\text{эм21}} = U_{\text{эм22}} = K \omega_{\text{э}} I_{\text{экм}} Q_{\text{мм}} (2\sqrt{1 + \omega_{\text{м}}^2 T_{\mu}^2})^{-1}$ ;  $U_{\text{э23}} = K \omega_{\text{м}} T_{\mu} \omega_{\text{э}} I_{\text{экм}} Q_{\text{мм}} (1 + \omega_{\text{м}}^2 T_{\mu}^2)^{-1}$ .

(23) ифода ва унинг асосида қурилган графиклар (9- расм, б) тахлили янги ТЎЎ киришига синусоидал қонуният билан ўзгарувчи бурчак силжиши берилганда унинг чиқишидаги гармоник ўзгарувчи ўткинчи кучланиш частоталари мос равишда бурчак силжиши ва манба токи частоталарининг мос равишда йиғиндиси ва айирмасидан иборат бўлган турғун ҳамда қиймати магнит занжирининг параметрларига пропорционал камайиб борувчи эркин ташкил этувчилар йиғиндисидан иборат бўлишини кўрсатди.

Тадқиқ этилган янги ТЎЎ лари хатолик манбаларидан назарий, технологик ва эксплуатацион манбалар асосий хатолик манбаларига мансуб бўлиб, уларнинг ичида назарий хатоликка мансуб бўлган чиқиш сигналлари таркибида юқори гармоникалар мавжудлиги ҳисобидан юзага келадиган хатолик нисбатан каттароқ ( 1,73 % ), ички, ташқи ва режим хатолик манбалари эса қўшимча хатолик манбаларига мансуб бўлиб, улардан қўзғатиш чулғами токи частотаси ўзгариши хатолиги нисбатан каттароқ ( 0,4 % ) эканлигини аниқланди.

Бурчак силжишларини ўлчовчи янги ТЎЎ ишончлилигининг асосий кўрсаткичлари аниқланди. Янги ТЎЎ ларнинг ишдан чиқмасдан ишлаш эҳтимоли улар қўлланиладиган назорат ва бошқарув тизимлари учун етарли бўлган 0,9985 ни ташкил этди.

Ишлаб чиқилган бурчак силжишларини ўлчовчи трансформатор ўзгартиргични “Темирўлинфратузилма” АЖ га қарашли контакт тармоғи дистанциясида контакт осмасининг тебраниш ҳолатини автоматик назорат қилиш мақсадида қўлланилган. Кутилаётган иқтисодий самарадорлик 151,730 млн. сўмни ташкил этди.

Иловаларда диссертацияга оид бўйича қўшимча маълумотлар келтирилган.

## ХУЛОСА

“Кўзгалувчан қисмининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган бурчак силжишларини ўлчовчи трансформатор ўзгартиргичлар” мавзусидаги диссертация ишини бажариш жараёнида қуйидаги илмий натижалар олинди:

1. Бурчак силжишларини ўлчовчи трансформатор ўзгартиргичлар конструкцияларидаги ишчи ҳаво ораликларида жойлаштирилган чулғам, ферромагнит ўзак ёки электромагнит экран фаол юзасини бурчак координатаси бўйича чизиқли ўзгарадиган ўроқсимон ҳалқа кўринишида яшаш ушбу ўзгартиргичлар сезгирлиги ва аниқлигини ошириши, диапазонини кенгайтириши ва статик характеристикаларининг чизиқлилигини таъминлаши аниқланган.

2. Бурчак силжишларини ўлчовчи трансформатор ўзгартиргичлар конструкцияларидаги иккита берк ҳалқасимон магнит ўтказгич қалинлигини уларнинг туташтиргич билан уланган нуқтасидан унга қарама-қарши диаметраль нуқтасига томон чизиқли камайиб борадиган қилиб яшаш ушбу ўзгартиргичлар статик характеристикаларининг чизиқлилигини таъминлаши аниқланган.

3. Чулғами, ферромагнит ўзаги ва электромагнит экранининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган янги трансформатор ўлчаш ўзгартиргичларининг ишлаб чиқилган математик моделлари таҳлили ферромагнит ўзагининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган ўзгартиргичларда ишчи магнит оқимларининг магнит занжири бўйлаб чизиқли тақсимланишини ҳамда уларни яшашда сарфланадиган рангли металл миқдори нисбатан кам эканлигини кўрсатди.

4. Чулғами, ферромагнит ўзаги ва электромагнит экранининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган янги трансформатор ўлчаш ўзгартиргичлари магнит занжирларининг математик моделлари ушбу занжирлар параметрларининг тарқоқлигини инобатга олган ҳолда ишлаб чиқилган.

5. Ферромагнит ўзагининг фаол юзаси ўзгарувчан бўлган бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичлар статик характеристикаларининг ҳосил қилинган тенгламалари ва графиклари таҳлили ушбу характеристикалар ўлчаш диапазонида чизиқли кўринишга эга бўлиши, сезгирликлари эса доимий эканлиги кўрсатган.

6. Бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичлар киришига қиймати сакраб ўзгарадиган бурчак силжиши берилганда унинг чиқишидаги ўткинчи кучланиш частотаси манба токи частотасига тенг бўлган синусоидал қонуният билан ўзгарувчи турғун ва қиймати магнит занжирининг параметрларига пропорционал равишда камайиб борувчи эркин ташкил этувчилар йиғиндисидан иборат эканлиги аниқланган.

7. Бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичлар киришига қиймати синусоидал қонуният билан ўзгарувчи бурчак силжиши берилганда унинг чиқишидаги гармоник қонуният билан ўзгарувчи ўткинчи кучланиш частоталари бурчак силжиши ва манба токи частоталарининг мос равишда йиғиндиси ва айирмасидан иборат бўлган турғун ҳамда қиймати магнит занжирининг параметрларига пропорционал равишда камайиб борувчи эркин ташкил этувчилар йиғиндисидан иборат эканлиги аниқланган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ  
DSc.15/31.08.2022.Т.73.07 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТРАНСПОРТНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**МАМАДАЛИЕВ УЛУГБЕК ШУХРАТОВИЧ**

**ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ УГЛОВЫХ  
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ПЕРЕМЕННОЙ АКТИВНОЙ ПЛОЩАДЬЮ  
ПОДВИЖНОЙ ЧАСТИ**

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

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

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № В2023.4.PhD/Т4179.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном транспортном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

<b>Научный руководитель:</b>	<b>Амиров Султон Файзуллаевич</b> доктор технических наук, профессор
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Сиддиков Илхомжон Хакимович</b> доктор технических наук, профессор <b>Халиков Содикжон Салихджанович</b> кандидат технических наук, доцент
<b>Ведущая организация:</b>	<b>Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова</b>

Защита диссертации состоится «12» марта 2025 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.15/31.08.2022.T.73.07 по присуждению ученых степеней при Ташкентском государственном транспортном университете. (Адрес: 100167, г. Ташкент, ул. Темирийулчилар, 1. Тел.: (99871) 299-00-01; факс: (99871) 293-57-54; e-mail: [rektorat@mail.ru](mailto:rektorat@mail.ru)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного транспортного университета (зарегистрировано №227). (Адрес: 100167, г.Ташкент, ул. Темирийулчилар, 1. Тел.: (99871) 299-05-66.

Автореферат диссертации разослан «27» феврале 2025 года.  
(реестр протокола рассылки №023 от «27» феврале 2025 года).



**Р.В. Рахимов**  
Председатель научного совета  
по присуждению учёных степеней,  
д.т.н., профессор

**Я.О. Рузметов**  
Ученый секретарь научного совета  
по присуждению учёных степеней,  
д.т.н., профессор

**Р.М. Мирсаатов**  
Председатель научного семинара  
при научном совете по присуждению  
учёных степеней, д.т.н., профессор

## **Введение (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и необходимость темы диссертации.** В мире ведущее место занимает разработка технических средств и передовых технологий, обеспечивающих безопасное, непрерывное движение электроподвижного состава и улучшающих качество токосъёма. В этом направлении одной из важных задач является совершенствование устройств контроля угловых перемещений в системе электроснабжения железных дорог. В связи с этим актуальным является разработка преобразователей угловых перемещений с высокой точностью измерения для систем автоматического регулирования положения консолей на опорах проводов контактной сети обходных путей железных дорог, устройства регулирования трансформатора под нагрузкой на тяговых подстанциях и натяжения проводов контактной сети.

В мире ведутся научные исследования, направленные на совершенствование измерительных, сравнивающих, преобразовательных, усилительных и исполнительных элементов и устройств систем контроля и управления объектами железнодорожного транспорта. В связи с этим, уделяется особое внимание на разработку схем замещения магнитных цепей, способствующие линейному распределению магнитных потоков трансформаторных преобразователей угловых перемещений, и математических моделей, позволяющие исследовать их характеристики с более высокой точностью. Вместе с тем, возникает необходимость создания измерительных преобразователей с высокой чувствительностью и точностью, простотой конструкции, высокой выходной мощностью и функцией линейного преобразования при измерении угловых перемещений.

В нашей республике принимаются меры по развитию различных отраслей транспорта, в том числе инфраструктуры железнодорожного транспорта, расширению участков высокоскоростного подвижного состава, электрификации существующих железнодорожных участков. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы, определены такие задачи как «...повышение энергоэффективности экономики на 20%, ...создание возможности прибытия и отбытия к месту назначения на основе транспортных маршрутов»<sup>1</sup>. При реализации данных задач важным является необходимость разработки новых трансформаторных преобразователей и их математических моделей, способных измерять угловые перемещения с высокой чувствительностью и точностью измерения, и имеющих линейные характеристики преобразования, а также разработка методов расчета линейных и нелинейных магнитных цепей.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит решению задач, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан УП-60 от 22 января 2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», Постановлением ПП-3238 от 23 августа 2017

---

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года №ПФ-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы»

года «О мерах по дальнейшему внедрению современных энергоэффективных и энергосберегающих технологий», ПП-3384 от 13 ноября 2017 года «О мерах по оперативному внедрению автоматизированной системы контроля и учета электрической энергии и природного газа», а также другими документами, относящимися к данному виду деятельности.

**Соответствие исследования приоритетам развития науки и техники 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 по разработке трансформаторных преобразователей перемещений для систем контроля и управления технологическими процессами и производственными объектами, проводятся в ведущих мировых научных центрах и высших учебных заведениях, в том числе в Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica и University of Campania “Luigi Vanvitelli” (Италия), Worcester Polytechnic Institute, Wright State University, University of Michigan и University of California (США), Seoul National University (Южная Корея), University Malaysia Perlis (Малайзия), Forschungslaboratorien der Siemens AG (Германия), Universidade Federal de Campina Grande (Бразилия), University of Manitoba (Канада), в Институте электродинамики и Киевском институте автоматики (Украина), Самарском государственном техническом университете, Пензенском государственном университете, Ульяновском государственном техническом университете и Уфимском государственном авиационно-техническом университете (Россия), Ташкентском государственном техническом университете, Национальном исследовательском университете «Ташкентский институт ирригации и инженеров механизации сельского хозяйства» и Ташкентском государственном транспортном университете (Узбекистан).

В мире проводится ряд научных исследований, направленных на решение актуальных проблем разработки трансформаторных преобразователей перемещений. Существенный вклад в этом направлении внесли John G. Webster, Stephen A. Dyer, David S. Nyce, Pavel Ripka, Richard Boll, Д.И. Агейкин, Л.Ф. Куликовский, Н.Е. Конюхов, М.А. Ураксеев, Я.Р. Абдуллаев А.В., Федотов и другие.

Решению научных вопросов по усовершенствованию трансформаторных преобразователей угловых перемещений внесли свой вклад отечественные учёные как М.Ф. Зарипов, Р.К. Азимов, И.Х. Сиддиков, С.Ф. Амиров, Р.Ж. Баратов и другие. Усилиями этих ученых были разработаны и развиты теоретические основы проектирования и расчета трансформаторных преобразователей, предложены и внедрены в производство оригинальные конструкции и схематические решения данных преобразователей.

Вместе с тем, недостаточно были проведены исследования по разработке трансформаторных преобразователей угловых перемещений с высокой чувствительностью, простотой конструкции, высокой выходной мощностью и с функцией линейного преобразования, а также по разработке и

усовершенствованию методов расчета трансформаторных преобразователей для систем контроля и управления.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках научного проекта №3 «Совершенствование электромагнитных измерительных приборов для железнодорожного транспорта» (2019-2023 годы), включенного в план научно-исследовательских работ Ташкентского государственного транспортного университета.

**Целью исследования** является разработка трансформаторных преобразователей угловых перемещений с высокой чувствительностью и точностью, расширенным диапазоном и линейной функцией преобразования.

**Задачи исследования:**

исследование вопросов измерения угловых перемещений на современном этапе и формулирование основных требований к преобразователям перемещений;

проведение сравнительного анализа основных технических характеристик существующих преобразователей угловых перемещений, выбор типа преобразователя и его обоснование;

разработка новых трансформаторных преобразователей угловых перемещений, обладающих высокой чувствительностью и точностью, расширенным диапазоном и линейной функцией преобразования;

разработка математических моделей новых трансформаторных преобразователей угловых перемещений;

исследование основных характеристик новых трансформаторных преобразователей угловых перемещений.

**Объектом исследования** являются новые трансформаторные преобразователи угловые перемещения.

**Предметом исследования** является разработка новых трансформаторных преобразователей угловых перемещений и исследование их основных технических характеристик.

**Методы исследования.** В процессе исследования использованы теория электрических и магнитных цепей с распределенными параметрами, энергоинформационные модели цепей различной физической природы и аппарат параметрических структурных схем, методы определения основных и дополнительных погрешностей, а также методы теории надежности.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

разработан новый трансформаторный преобразователь угловых перемещений с высокой чувствительностью и точностью, широким диапазоном и линейной статической характеристикой за счет выполнения в виде серповидного кольца обмотки, ферромагнитного сердечника или экрана, размещенных в рабочих воздушных зазорах;

разработан новый трансформаторный преобразователь угловых перемещений с линейной функцией преобразования за счет линейного уменьшения толщины двух соосно расположенных замкнутых кольцевых

магнитопроводов от точки их соединения их с перемычкой до противоположной диаметральной точки;

разработаны математические модели новых трансформаторных преобразователей с учетом распределенности параметров длинных ферромагнитных стержней, рабочих воздушных зазоров, обмоток, сердечника и экрана с переменной активной площадью;

разработана методика расчета магнитных цепей новых трансформаторных преобразователей угловых перемещений с переменной активной поверхностью обмотки, ферромагнитного сердечника и экрана, заключающейся в разделении магнитных цепей на участках до элемента с переменной активной площадью, самого элемента и после этого элемента.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

получены аналитические зависимости для исследования статических, динамических и метрологических характеристик новых трансформаторных преобразователей угловых перемещений;

разработаны два устройства для измерения угловых перемещений с высокой чувствительностью, точностью, расширенным диапазоном и линейной функцией преобразования.

**Достоверность результатов исследований** основана на обоснованном применении основных законов электрических и магнитных цепей с распределенными параметрами, а также совпадением теоретических и экспериментальных результатов.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования объясняется математическими моделями, разработанными с учетом распределенных параметров длинных ферромагнитных стержней, рабочих воздушных зазоров обмотки, сердечника и экрана с активной переменной площадью, которые позволяют теоретически исследовать основные характеристики новых трансформаторных преобразователей угловых перемещений.

Практическая значимость результатов исследований объясняется тем, что в целях создания новых трансформаторных преобразователей угловых перемещений, были разработаны обобщенные методы, методика расчета с учетом распределенности параметров магнитных цепей, а построенная параметрическая структурная схема упрощает исследование динамических характеристик трансформаторных преобразователей, а также обеспечивает сокращение сроков их проектирования.

**Внедрение результатов исследования.** На основании результатов по разработке трансформаторных преобразователей угловых перемещений:

получен патент на изобретение от государственного учреждения «Центр интеллектуальной собственности» при Министерстве юстиции Республики Узбекистан на устройство трансформаторного преобразователя (№IAP 07519; 2023 г.). В результате создано устройство измерения угловых перемещений с линейной функцией преобразования;

получен патент на изобретение от государственного учреждения «Центр интеллектуальной собственности» при Министерстве юстиции Республики

Узбекистан на устройство трансформаторного преобразователя (№IAP 07683; 2024 г.). В результате создано устройство для измерения угловых перемещений, обладающее высокой чувствительностью, точностью, расширенным диапазоном и линейной функцией преобразования;

новая трансформаторная преобразовательная установка для измерения угловых перемещений с высокой чувствительностью и точностью, с расширенным диапазоном, с линейной преобразовательной функцией, внедрена на дистанции электроснабжения “Хавас” акционерного общества “Темирйўлинфратузилма” на участке контактной сети (ЭЧК-8) для получения точной информации о колебаниях на контактной подвеске (Справка №4/Е1538 от 12 ноября 2024 года АО “Темирйўлинфратузилма”). В результате получена точная информация об амплитудных колебаниях со своевременным определением опасных автоколебательных процессах при движении электровоза и автоматическим контролем колебательного процесса на контактной подвеске.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследования прошли апробацию на 7 научно-практических конференциях, в том числе на 4 международных и 3 республиканских конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, в том числе 10 статей, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан, 1 статья в зарубежном и 9 статей в республиканских журналах, а также получены 2 патента, выданных “Центром интеллектуальной собственности” Республики Узбекистан.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объём диссертации составляет 117 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, освещено состояние вопроса, сформулированы цель и задачи исследования, даны характеристики объекта и предмета исследования, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в республике, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов исследований в производство.

В первой главе **«Состояние проблемы и постановка задач исследования»**, приведены сведения на основе анализа схем систем контроля и управления, использующих преобразователи измерения разности угловых перемещений, при этом выявлено, что измерительные преобразователи в этих системах должны обладать высокой чувствительностью, точностью и выходной мощностью, широким диапазоном измерения, умеренными техническими характеристиками в тяжелых условиях эксплуатации и функцией линейного преобразования.

Сравнительный анализ основных характеристик существующих

измерительных преобразователей измерения угловых перемещений показал, что трансформаторные измерительные преобразователи (ТИП) полностью отвечают требованиям систем контроля и управления. Но, при этом установлено, что существующие ТИП не обладают достаточно высокой чувствительностью и точностью, а диапазон измерений сравнительно узок, статические характеристики нелинейны.

На основе результатов анализа литературных источников и поставленной цели были определены основные задачи исследования.

Во второй главе **«Совершенствование трансформаторных преобразователей, измеряющих угловые перемещения»** разработаны новые конструкции трансформаторных преобразователей угловых перемещений с высокой чувствительностью, точностью, расширенным диапазоном действия и функцией линейного преобразования с использованием энергоинформационного метода технического творчества.

Использование энергоинформационного метода технического творчества при совершенствовании конструкций ТИП независимо от физической природы явлений, позволило охарактеризовать их уравнениями одного типа, опираться на одни и те же (четыре) величины и параметры (шесть основных и их производные) в цепи любой физической природы, а также разделить сложные физические процессы различной природы на элементарные преобразователи, известные как физико-технические эффекты и объединить их в параметрическую структурную схему (ПСС), связанная между собой определенными правилами.

В первой конструкции разработанного ТИП (рис. 1) выполнение обмотки, ферромагнитного сердечника или электромагнитного экрана, размещенных в рабочих воздушных зазорах (между неподвижной и подвижной частями (ПЧ)), в виде серповидного кольца с активной площадью, изменяющийся на основе линейного закона  $S_{\mu\delta_{\text{раб}1}}(\alpha) = \frac{ba}{\pi}(\alpha_m + \alpha)$  (1) и  $S_{\mu\delta_{\text{раб}2}}(\alpha) = \frac{ba}{\pi}(\alpha_m - \alpha)$  (2) (где  $a$  – половина максимальной толщины подвижного серповидного магнитопровода) позволило повысить чувствительность, точность этого преобразователя, расширить диапазон измерения и обеспечить линейность статической характеристики по сравнению с его прототипом. Во второй конструкции разработанного ТИП (рис.2), выполнение толщины двух соосно расположенных замкнутых кольцевых магнитопроводов с определенным рабочим воздушным зазором, на основе линейной закономерности  $h_\alpha = h_m \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_m}\right)$  (где  $h_m$  – максимальное значение толщины замкнутого кольцевого магнитопровода;  $\alpha$ ,  $\alpha_m$  – угловая координата и ее максимальное значение) от точки их контакта с соединителем до противоположной диаметральной точки выполнена таким образом, чтобы эти толщины уменьшались, даёт возможность обеспечить линейность его статической характеристики по сравнению с его прототипами.

При повороте на угол  $\alpha$  подвижного серповидного магнитопровода, закрепленного на оси контролируемого объекта в определенном направлении,

например, в противоположном движении часовой стрелки, за счет линейного увеличения активной площади рабочего воздушного зазора между стержнями 4, 5 и магнитопроводом 1 на основе закономерности  $S_{\mu\delta_{\text{раб}1}}(\alpha) = \frac{ba}{\pi}(\alpha_m + \alpha)$  (из-за входа толстой части магнитопровода 1 в зазор стержней 4 и 5 при повороте подвижной части (ПЧ) на угол  $\alpha$ ), увеличивается магнитный поток  $Q_{\mu1}$ , проходящий через него (на рис. 3, а положение стержней 4 и 5 показано пунктирной линией), за счет линейного уменьшения активной площади рабочего воздушного зазора между стержнями 5, 6 и магнитопроводом 2 на основе закономерности  $S_{\mu\delta_{\text{раб}2}}(\alpha) = \frac{ba}{\pi}(\alpha_m - \alpha)$  (из-за

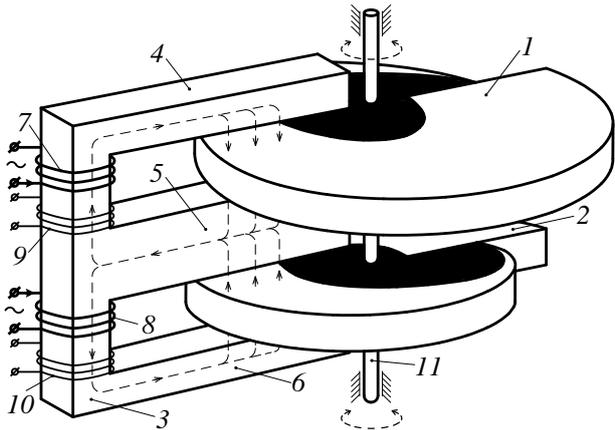


Рисунок 1. Конструктивная схема нового ТИП: 1, 2 – серповидные магнитопроводы; 3, 4, 5, 6 – стержни E-образного магнитопровода; 7, 8 и 9, 10 – секции обмоток; 11 – ось

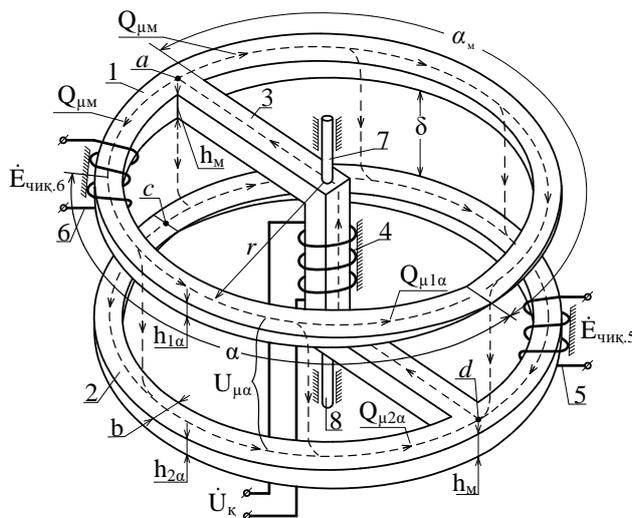


Рисунок 2. Конструктивная схема нового ТИП: 1, 2 – замкнутые кольцевые магнитопроводы; 3 – Z-образная ферромагнитная перемычка; 4 – обмотка возбуждения; 5, 6 – секции обмотки возбуждения; 7, 8 – оси;  $Q_{\mu m}$  – половина магнитного потока, создаваемого катушкой возбуждения;  $Q_{\mu1\alpha}$ ,  $Q_{\mu2\alpha}$  – рабочие магнитные потоки;  $E_{\text{чик}5}$ ,  $E_{\text{чик}6}$  – выходные ЭДС;  $U_k$  – напряжения обмотки возбуждения;  $b$ ,  $r$  – ширина и радиус каждого замкнутого кольцевого магнитопровода;  $\delta$  – рабочий воздушный зазор между замкнутыми кольцевыми магнитопроводами

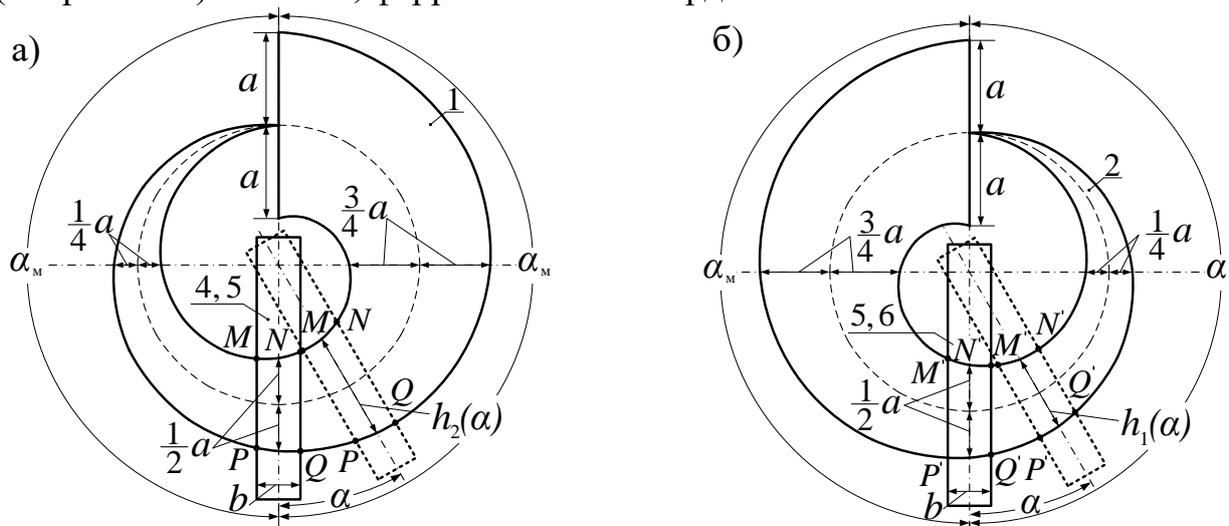
входа тонкой части магнитопровода 2 в зазор стержней 5 и 6 при повороте ПЧ на угол  $\alpha$ ), уменьшается магнитный поток  $Q_{\mu2}$ , проходящий через него (на рис. 3, б положение стержней 5 и 6 показано пунктирной линией).

В результате, в обеих секциях измерительной обмотки индуцируется ЭДС, пропорциональная магнитным потокам, проходящим через них. Благодаря тому, что секции измерительной обмотки соединены последовательно-встречно, т.е. по дифференциальной схеме, на выходе этой обмотки формируется двойной сигнал, пропорциональный изменению магнитных потоков, и, следовательно, угла поворота ПЧ.

В третьей главе диссертации «Математические модели новых трансформаторных преобразователей угловых перемещений»

разработаны математические модели новых ТИП с переменной активной площадью обмотки, ферромагнитного сердечника и экрана.

При разработке математических моделей новых ТИП были приняты следующие ограничения: 1) магнитная цепь является линейной, то есть данная цепь работает в линейной участки магнитной характеристики ферромагнитного материала, используемого в качестве магнитопровода; 2) не учитываются магнитные потоки рассеянные, замыкающиеся через торцевые и боковые части и грани ферромагнитных магнитопроводов, а также размеры сосредоточенно расположенных измерительных обмоток и обмоток возбуждения; 3) П-образные и кольцевые магнитопроводы, серповидные (спиральные) обмотки, ферромагнитные сердечники и



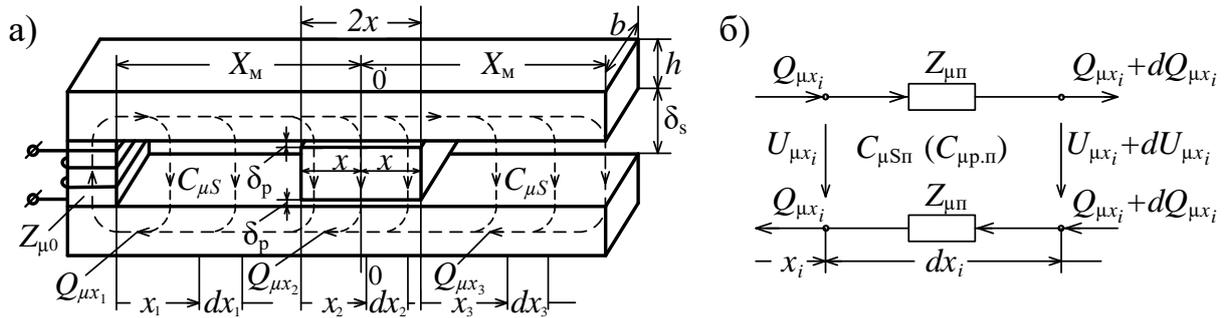
**Рисунок 3. Чертежи для определения аналитического выражения зависимости активных поверхностей, образуемых между стержнями 4 и 5 Е-образного магнитопровода и магнитопроводом 1 (а), а также стержнями 5 и 6 и магнитопроводом 2 (б) от координаты угла поворота нового ТИП**

электромагнитные экраны с переменной активной площадью в магнитных цепях новых ТИП обладают одинаковыми свойствами и размерами. При теоретическом исследовании магнитных цепей новых ТИП был использован наиболее удобный и точный метод расчета магнитных цепей с распределенными параметрами и ПЧ – метод расчленения магнитных цепей на характерные участки. При этом координата части цепи до ПЧ с переменной активной площадью обозначена –  $x_1$ , координата в ПЧ –  $x_2$ , а координата после ПЧ –  $x_3$ , а также начало координаты  $x_1$  было взято из части магнитной цепи, где расположена обмотка возбуждения (рис. 4, а).

При расчете магнитных цепей новых ТИП с переменной активной площадью обмотки, ферромагнитного сердечника и экрана с помощью вышеуказанного метода были получены выражения рабочих магнитных потоков путем составления дифференциальных уравнений для соответствующих участков цепи (рис. 4, б) для каждого случая и решения их с учетом соответствующих граничных условий. В частности, для магнитных потоков цепи нового ТИП с переменной активной поверхностью измерительной обмотки были получены следующие выражения:

$$Q_{\mu\alpha}^B = \frac{2F_B ch\beta_s}{\Delta_1} sh[0,5\beta_s(1 + \alpha^*)], \quad (3) \quad Q_{\mu\alpha}^H = \frac{2F_B ch\beta_s}{\Delta_1} sh[0,5\beta_s(1 - \alpha^*)], \quad (4)$$

где  $F_B$  – магнитная движущая сила обмотки возбуждения, [A];  $\gamma_s = \sqrt{2Z_{\mu\pi}C_{\mu\text{сп}}}$  – коэффициент распределения магнитного поля вдоль магнитной цепи, [ $m^{-1}$ ];  $X_M = \frac{a}{\pi}\alpha_M$  – максимальное значение координаты  $x = \frac{a}{2\pi}(\alpha_M + \alpha)$ , [m];  $\delta_p$  – рабочий воздушный зазор [m];  $b, h, \delta_s$  – толщина, высота длинных стержней П-образного магнитопровода и воздушный зазор между ними [m];  $\beta_s = \gamma_s \frac{a}{\pi}\alpha_M = \gamma_s X_M$  – коэффициент затухания магнитного поля вдоль магнитной цепи, [-];  $\alpha^* = \alpha/\alpha_M$  – угловая координата в относительных единицах, [-];  $\Delta_1 = Z_{\mu 0} sh(2\beta_s) + (\gamma_s/C_{\mu\text{сп}})ch(2\beta_s)$ , [ $H^{-1}$ ];  $Z_{\mu\pi} = (\mu\mu_0 bh)^{-1}$ , [ $H^{-1} \cdot m^{-1}$ ],  $C_{\mu\text{сп}} = \mu_0(b/\delta_s)$ , [ $H \cdot m^{-1}$ ] – соответственно погонные значения магнитного сопротивления длинных стержней П-образного магнитопровода и магнитной ёмкости рабочего воздушного зазора между ними, приходящиеся на единицу длины цепи;  $Z_{\mu 0} = (\mu\mu_0 bh)^{-1}\delta_s$ , [ $H^{-1}$ ] – магнитное сопротивление основания П-образного магнитопровода;  $\mu = const$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [ $H \cdot m^{-1}$ ] – относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода и магнитная постоянная соответственно. Геометрические размеры магнитной цепи показаны на рис. 4, а.



**Рис. 4. Конструктивная схема (а) и схема замещения элементарного участка длиной  $dx_i$  магнитной цепи (б) нового ТИП с переменной активной поверхностью**

Анализ полученных выражений (3) и (4) и построенных на их основе графиков функций  $Q_{\mu\alpha}^{B*} = f(\alpha^*)$  и  $Q_{\mu\alpha}^{H*} = f(\alpha^*)$  (рис. 5, а) при разных значениях  $\beta_s$  показал, что (здесь  $Q_{\mu\alpha}^{B*} = Q_{\mu\alpha}^B/Q_{\mu\alpha}^{B(max)}$  и  $Q_{\mu\alpha}^{H*} = Q_{\mu\alpha}^H/Q_{\mu\alpha}^{H(max)}$ , а  $Q_{\mu\alpha}^{B(max)} = Q_{\mu\alpha}^{H(max)} = [F_B sh(2\beta_s)]\Delta_1^{-1}$ ) (рис. 4, а), зависимость рабочих магнитных потоков от угла  $\alpha$  нелинейная, а степень нелинейности ( $\varepsilon_{обм.}$ ) увеличивается с увеличением  $\beta_s$ , например, для значений  $\beta_s$ , показанных на графиках  $\varepsilon_{обм.}$  составило 0,007 %, 0,07 %, 1,81 % и 4,57 %, соответственно.

Установлено, что выражения в виде (3) и (4) формируются для рабочих магнитных потоков даже в том случае, когда в качестве обмотки возбуждения выступает обмотка с переменной активной площадью. Активная поверхность ферромагнитного сердечника является переменной, а магнитная ёмкость воздушного зазора  $\delta_s$  между длинными параллельными стержнями равна нулю.

Для рабочих магнитных потоков магнитной цепи нового ТИП, принятых равным ( $C_{\mu\text{сп}} \approx 0$ ) были получены следующие выражения:

$$Q_{\mu\alpha}^{\text{В.}^*} = \frac{F_{\text{В}}}{2\Delta_{21}^*} \text{sh}[\beta_p(1 + \alpha^*)], \quad (5) \quad Q_{\mu\alpha}^{\text{Н.}^*} = \frac{F_{\text{В}}}{2\Delta_{22}^*} \text{sh}[\beta_p(1 - \alpha^*)], \quad (6)$$

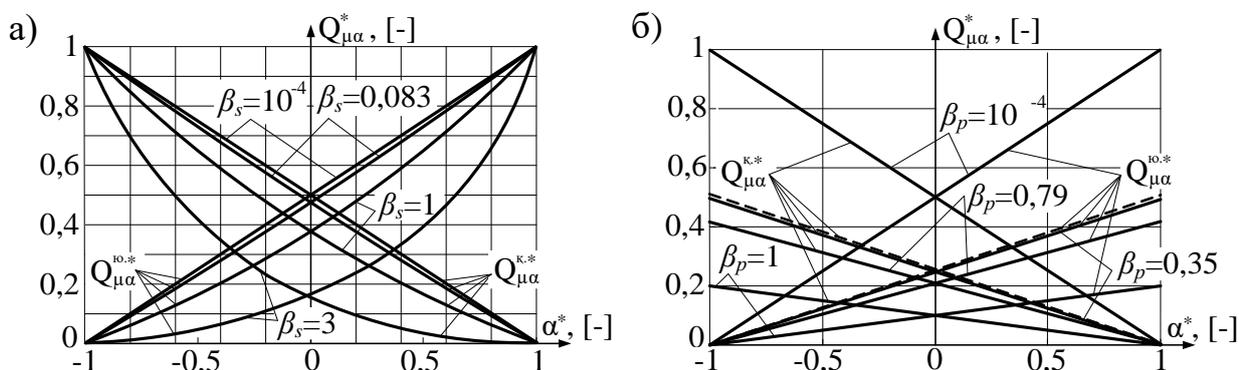


Рис. 5. Графики функций  $Q_{\mu\alpha}^{\text{В.}^*} = f(\alpha^*)$  и  $Q_{\mu\alpha}^{\text{Н.}^*} = f(\alpha^*)$  при различных значениях  $\beta_s$

$\beta_p = \gamma_p \frac{a}{\pi} \alpha_m = \gamma_p X_m$ ;  $\gamma_p = \sqrt{2Z_{\mu\text{п}} Y_{\mu\text{р.п}}}$ ;  $Y_{\mu\text{р.п}} = 1/\sqrt{(C_{\mu\text{р}})^{-2} + Z_{\mu\text{сп}}^2} \cdot X_m$ , [ $H \cdot m^{-1}$ ];  $C_{\mu\text{р}} = \mu_0 b X_m / 2\delta_p$ , [ $H$ ] – соответственно полная магнитная проводимость и магнитная емкость рабочих зазоров между стержнями Е-образного магнитопровода и спиральным ферромагнитным сердечником;  $Z_{\mu\text{сп}}$ , [ $H^{-1}$ ] – полное сопротивление активной части спирального ферромагнитного сердечника в направлении рабочего магнитного потока (верхние знаки в “ $\pm$ ” и “ $\mp$ ” относятся к  $\Delta_{21}^*$ , а нижние знаки к  $\Delta_{22}^*$ ).

Анализ полученных выражений (5) и (6) и построенных на их основе графиков функций  $Q_{\mu\alpha}^{\text{В.}^*} = f(\alpha^*)$  и  $Q_{\mu\alpha}^{\text{Н.}^*} = f(\alpha^*)$  показал (рис. 5, б), что зависимость рабочего магнитного потока от угла  $\alpha$  сохраняет свою линейность даже при различных значениях  $\beta_s$ . При этом разность расчетных и экспериментальных результатов не превысило  $3,5 \div 5,5 \%$ . Следует отметить, что значение  $\beta_p$  в созданном образце нового ТИП изменилось только за счет изменения величины относительной магнитной проницаемости ферромагнитного материала.

Для рабочих магнитных потоков магнитной цепи нового ТИП, где активная поверхность ферромагнитного сердечника является переменной, а магнитная ёмкость воздушного зазора  $\delta_s$  между длинными параллельными стержнями не равна нулю ( $C_{\mu\text{сп}} \neq 0$ ), были получены следующие выражения:

$$Q_{\mu\alpha} = \frac{8F_{\text{В}}}{C_{\mu\text{сп}} Y_{\mu\text{р.п}}^2 \Delta_{31}^*} \{ \gamma_s^2 Y_{\mu\text{р.п}}^2 \text{sh}^2[0,5\beta_s(1 \mp \alpha^*)] \text{sh}[\beta_p(1 \pm \alpha^*)] + \gamma_s^2 Y_{\mu\text{р.п}} \text{ch}^2[0,5\beta_s(1 \mp \alpha^*)] \text{sh}[\beta_p(1 \pm \alpha^*)] + 0,5\gamma_s \gamma_p (C_{\mu\text{сп}} + Y_{\mu\text{р.п}}) \text{sh}[\beta_p(1 \mp \alpha^*)] \text{ch}[\beta_p(1 \pm \alpha^*)] \}, \quad (7)$$

здесь  $\Delta_{31(2)}^* = -\frac{8}{Y_{\mu\text{р.п}}^3 C_{\mu\text{сп}}} \{ \gamma_s^2 \gamma_p Y_{\mu\text{р.п}} \text{ch}^2[0,5\beta_s(1 \mp \alpha^*)] \text{ch}[\beta_p(1 \pm \alpha^*)] + \gamma_s^2 \gamma_p C_{\mu\text{сп}} \text{sh}^2[0,5\beta_s(1 \mp \alpha^*)] \text{ch}[\beta_p(1 \pm \alpha^*)] + 0,5\gamma_s (\gamma_p^2 Y_{\mu\text{сп}} + \gamma_s^2 Y_{\mu\text{р.п}}) \text{sh}[\beta_p(1 \mp \alpha^*)] \text{sh}[\beta_p(1 \pm \alpha^*)] \}, [H^{-3} \cdot m^{-1}]$ ,

(верхние знаки “ $\pm$ ” ва “ $\mp$ ” обозначают, что магнитный поток верхнего стержня исследуемой магнитной цепи относится к  $Q_{\mu\alpha}^{ю.}$  и  $\Delta_{31}^*$ , а нижние знаки показывают, что магнитный поток в нижнем стержне цепи относится к  $Q_{\mu\alpha}^{н.}$  и  $\Delta_{32}^*$ , выражения  $\Delta_{31}^*$  и  $\Delta_{32}^*$  при  $Z_{\mu 0} \neq 0$  приведены в диссертации).

Анализ полученных выражений (7) показал, что разность значений  $Q_{\mu\alpha}^{в.}$  и  $Q_{\mu\alpha}^{н.}$  от их значений при  $C_{\mu сп} \approx 0$ , при  $\delta_s \geq 4\delta_p$ , не превышает  $1,2 \div 1,4 \%$ .

Были получены следующие выражения для рабочих магнитных потоков ( $Q_{\mu 1\alpha}$ ,  $Q_{\mu 2\alpha}$ ) и магнитных индукций ( $B_{\mu 1\alpha}$ ,  $B_{\mu 2\alpha}$ ) в обоих замкнутых кольцевых магнитопроводах магнитной цепи второго ТИП с переменной активной площадью ферромагнитного сердечника (рис. 2), а также магнитной индукции ( $B_{\mu\delta}$ ) в воздушном зазоре между ними:

$$Q_{\mu 1\alpha} = Q_{\mu м} \alpha^*, \quad (8) \quad Q_{\mu 2\alpha} = Q_{\mu м} (1 - \alpha^*), \quad (9)$$

$$B_{\mu 1\alpha} = B_{\mu 2\alpha} = Q_{\mu м} (bh_m)^{-1}, \quad (10) \quad B_{\mu\delta} = Q_{\mu м} (bl_m)^{-1}, \quad (11)$$

где  $Q_{\mu м} = F_B / \left[ 2Z_{\mu 0} + l_m (\mu\mu_0 bh_m)^{-1} + (C_{\mu сп} X_m)^{-1} \right]$  – максимальное значение магнитного потока в каждом кольцевом магнитопроводе,  $Wb$ ;  $l_m$  – максимальное значение окружности кольца, соответствующее максимальному значению  $\alpha_m$  координаты кольцевого магнитопровода  $\alpha$ ,  $[m]$ .

Анализ полученных выражений (8)-(11) показывает, что если толщину кольцевых магнитопроводов выполнить таким образом, чтобы толщина уменьшалась линейно от точки соединения с соединителем до противоположной диаметральной точки на основе закономерности  $h_\alpha = h_m (1 - \alpha^*)$ , то рабочие магнитные потоки в них распределяются строго линейно вдоль угловой координаты, а значения магнитных индукций в кольцевых магнитопроводах и в рабочем воздушном зазоре между ними не будет зависеть от угловой координаты. Установлено, что неизменные значения магнитной индукции в кольцевых магнитопроводах обеспечивает постоянства магнитного сопротивления в кольцах вдоль координаты  $\alpha$ .

Для рабочих магнитных потоков нового ТИП, где активная площадь электромагнитного экрана является переменной, а ее магнитная проводимость равна нулю, т.е.  $Y_{\mu эк} \approx 0$ , получены следующие выражения:

$$Q_{\mu\alpha} = \frac{F_B C_{\mu s}}{\Delta_{41}^*} \left\{ sh[\beta_s (1 \mp \alpha^*)] + \beta_s (1 \pm \alpha^*) sh^2 \left[ \frac{1}{2} \beta_s (1 \mp \alpha^*) \right] \right\}, \quad (12)$$

где  $\Delta_{41(2)}^* = 0,5\beta_s^2 (1 \pm \alpha^*) sh[\beta_s (1 \pm \alpha^*)] + Z_{\mu 0} C_{\mu s} sh[\beta_s (1 \mp \alpha^*)] + Z_{\mu 0} C_{\mu s} \beta_s (1 \pm \alpha^*) sh^2 [0,5\beta_s (1 \mp \alpha^*)] + \beta_s ch[\beta_s (1 \mp \alpha^*)]$ ,  $[H^{-1} \cdot m^{-1}]$ .

Анализ полученных выражений (10) и построенных на их основе графиков функций  $Q_{\mu\alpha}^{в.*} = f(\alpha^*)$  и  $Q_{\mu\alpha}^{н.*} = f(\alpha^*)$  для различных значений  $\beta_s$  показал (рис. 6), что за счет увеличения значения  $\beta_s$  увеличивается степень нелинейного распределения рабочих магнитных потоков вдоль угловой координаты.

Анализ созданных математических моделей для магнитных цепей нового ТИП с переменной активной площадью измерительной обмотки, ферромагнитного сердечника и электромагнитного экрана показал, что дифференциальные уравнения для положения, где активная площадь

ферромагнитного сердечника является переменной, а магнитная цепь разделена на три характерные куски (до элемента, где активная площадь является переменной, сам элемент и часть после него) и математические

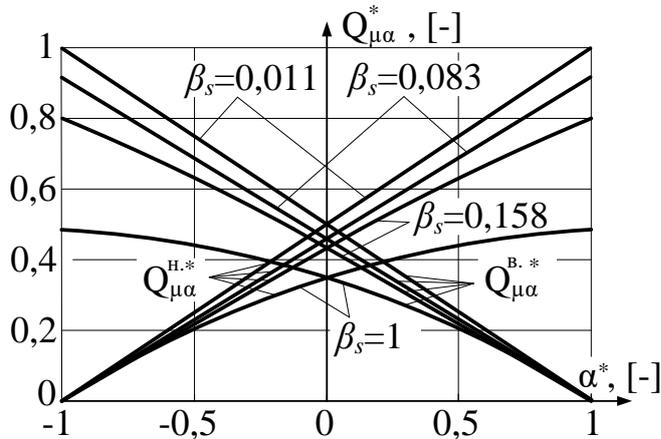


Рис. 6. Графики функций  $Q_{\mu\alpha}^{B.*} = f(\alpha^*)$  и  $Q_{\mu\alpha}^{H.*} = f(\alpha^*)$  для различных значений  $\beta_s$

модели в виде их решений являются обобщенными. Так как, если в этих дифференциальных уравнениях считается, что  $Y_{\mu p.п} = C_{\mu sp}$  и  $\gamma_p = \gamma_s$ , то формируются математические модели, касающиеся магнитных цепей нового ТИП с переменной активной площадью измерительной обмотки, если  $Y_{\mu p.п} = 0$  и  $\gamma_p = 0$ , то формируются

математические модели, касающиеся магнитных цепочек нового ТИП с переменной активной площадью экрана.

Анализ магнитных цепей показал, что зависимость рабочих магнитных потоков от углового перемещения ПЧ линейна только в новых ТИП с переменной активной площадью ферромагнитного сердечника и что количество цветного металла, используемого при их изготовлении меньше. Поэтому дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования проводились на двух новых ТИП подобного типа.

Влияние нелинейности характеристик намагничивания ферромагнитного материала, используемого в качестве магнитопровода в новых ТИП, на характеристики преобразователей представляет собой функцию полинома неполной степени  $H = k_1 B + k_2 B^3$ , (где  $k_1, [A/(T \cdot m)]$ ,  $k_2, [A/(T^3 \cdot m)]$  – коэффициенты аппроксимации). В результате это нелинейное дифференциальное уравнение решено методом итерации и получено следующее выражение рабочего магнитного потока:

$$Q_{\mu\alpha} = \frac{\gamma_p^2 F_B}{2b_1 \Delta_{21}^*} sh[\beta_p(1 \pm \alpha^*)] - \frac{b_2}{b_1} \cdot \frac{F_B^3}{8(\Delta_{22}^*)^3} sh^3[\beta_p(1 \pm \alpha^*)]. \quad (13)$$

где  $b_1 = 2k_1 S_{\mu}^{-1} C_{\mu p.п}, [m^{-2}]$ ;  $b_2 = 2k_2 S_{\mu}^{-3} C_{\mu p.п}, [Wb^{-2} \cdot m^{-2}]$ .

Учет нелинейности характеристики намагничивания ферромагнитного материала при расчете созданного ТИП позволил повысить точность расчета, то есть погрешность расчета снижается с (8 ÷ 11) % до (6 ÷ 8) % по сравнению с экспериментальными результатами.

Получены следующие выражения выходных величин исследованных двух новых ТИП:

$$\dot{E}_{\text{вых.1}} = -j\omega_3 w_{\text{вых.}} (\dot{Q}_{\mu\alpha}^{B.*} - \dot{Q}_{\mu\alpha}^{H.*}), \quad (14)$$

$$\dot{E}_{\text{вых.2}} = -j2\omega_3 w_{\text{вых.}} \dot{Q}_{\mu\alpha}^{B.*} \alpha^*, \quad (15)$$

где  $\omega_3$  – угловая частота напряжения источника,  $[s^{-1}]$ ;  $w_{\text{вых.}}$  – число витков секций измерительной обмотки,  $[-]$ .

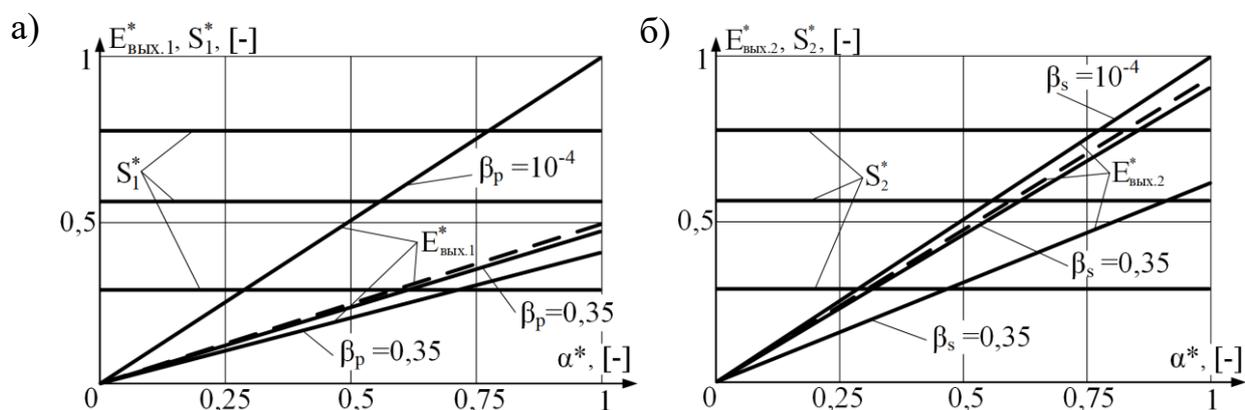
Четвертая глава диссертации «**Основные характеристики новых трансформаторных преобразователей угловых перемещений**» посвящена исследованию статических и динамических характеристик, а также погрешностей и надежности новых ТИП.

Аналитические уравнения статических характеристик обоих новых ТИП были получены в относительных единицах следующим образом:

$$E_{\text{вых.1}}^* = (4C_{\mu p})^{-1} \{ (\Delta_{21}^*)^{-1} \text{sh}[\beta_p(1 + \alpha^*)] - (\Delta_{22}^*)^{-1} \text{sh}[\beta_p(1 - \alpha^*)] \}. \quad (16)$$

$$E_{\text{вых.2}}^* = (C_{\mu s})^{-1} \left[ 2Z_{\mu 0} + X_M(\mu\mu_0 bh_M)^{-1} + (C_{\mu s})^{-1} \right]^{-1} \cdot \alpha^*. \quad (17)$$

Анализ полученных уравнений (14) и (15) и построенных на их основе графиков (рис. 7), что статические характеристики обоих новых ТИП являются линейными при любых значениях  $\beta$  в диапазоне измерений.



**Рис. 7. Графики статических характеристик и чувствительности новых ТИП при различных значениях  $\beta_p$  и  $\beta_s$**

Аналитические уравнения чувствительности обоих новых ТИП получены в относительных единицах в следующем виде:

$$S_1^* = \left\{ \frac{\Delta_{21}^* \beta_p \text{ch}[\beta_p(1 + \alpha^*)] - (\Delta_{21}^*)' \text{sh}[\beta_p(1 + \alpha^*)]}{4C_{\mu p} (\Delta_{21}^*)^2} + \frac{\Delta_{22}^* \beta_p \text{ch}[\beta_p(1 - \alpha^*)] + (\Delta_{22}^*)' \text{sh}[\beta_p(1 - \alpha^*)]}{4C_{\mu p} (\Delta_{22}^*)^2} \right\}, \quad (18)$$

$$S_2^* = \left[ 2Z_{\mu 0} + X_M(\mu\mu_0 bh_M)^{-1} + (C_{\mu s})^{-1} \right]^{-1}. \quad (19)$$

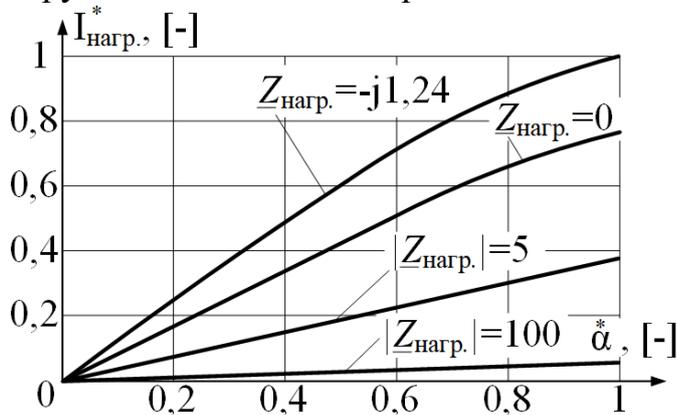
Анализ выражений (18) и (19) и построенных на их основе графиков функций  $S_1^* = f(\alpha^*)$  и  $S_2^* = f(\alpha^*)$  при разных значениях  $\beta_p$  и  $\beta_s$  (рис. 7) показал, что значение относительной чувствительности обоих новых ТИП остается неизменным во всем в диапазоне измерений.

Нагрузочные статические характеристики новых ТИП были изучены на примере первого ТИП и в результате получено следующее уравнение:

$$I_{\text{нагр.}} = \frac{\omega_3 M U_B}{\sqrt{[R_B(R_{\text{из.}} + R_{\text{нагр.}}) - X_B(X_{\text{из.}} \pm X_{\text{нагр.}}) + \omega_3^2 M^2]^2 + [X_B(R_{\text{из.}} + R_{\text{нагр.}}) + R_B(X_{\text{из.}} \pm X_{\text{нагр.}})]^2}}, \quad (20)$$

где  $U_B$  – напряжение источника, [V];  $R_B, R_{из}, R_{нагр.}$  и  $X_B, X_{из}, X_{нагр.}$  – активные и реактивные сопротивления, соответственно, обмоток возбуждения и измерения, а также нагрузки, [Ω];  $M, [H]$  – взаимоиנדуктивность.

Анализ функции (20) и ее графика (рис. 8) показывает (значение  $I_{нагр.}^* = I_{нагр.}/I_{нагр.маx}$ ;  $I_{нагр.маx} - I_{нагр.}$  в  $Z_{нагр.} = -jX_{нагр.} = jX_{из.}$  и  $\alpha^* = 1$ ), что при выполнении условия  $|Z_{нагр.}| \gg \omega L_{юк.}$  графики статической характеристики нагрузки нового ТИП сохраняют свою линейность, так же как и графики



**Рис.8. Графики статических характеристик, построенные для различных значений нагрузочного сопротивления нового ТИП**

статических характеристик без нагрузки, при выполнении условия  $|Z_{нагр.}| \approx \omega M$  в графиках нагрузочной статической характеристики нового ТИП образуется нелинейность, а при выполнении условия  $Z_{нагр.} = -jX_{нагр.} = jX_{из.}$  Измерительная обмотка нового ТИП настраивается на резонанс, а ток нагрузки имеет наибольшее значение при соответствующих значениях угла  $\alpha$ .

Анализ параметрической структурной схемы (ПСС), разработанной с целью исследования динамических характеристик новых ТИП показал, что новые ТИП можно описать структурных схемах систем контроля и управления в виде реального дифференцирующего звена.

Выражение переходного напряжения на выходе нового ТИП, на входе которого подано скачкообразное угловое перемещение  $Q_M(t) = Q_{M0}$ :

$u_{э.вых.1}(t) = KQ_{M0}\omega_3(1 - e^{-\frac{t}{T_\mu}})\sin(\omega_3 t + \varphi + 90^\circ) = u_{11}(t) + u_{12}(t),$  (21)  
 где  $K, [H \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$ ; - коэффициент пропорциональности;  $T_\mu = R_\mu C_\mu, [s]$  – постоянная времени магнитной цепи ТИП;  $\varphi$  – угол фазового сдвига между напряжением источника и током, [degri].

Анализ выражения (21) и построенных на его основе графиков (рис. 9, а) показал, что при подаче на вход нового ТИП скачкообразного углового перемещения, переходное напряжение на его выходе будет состоять из суммы синусоидальной вынужденной и свободной составляющих, уменьшающегося пропорционально параметрам магнитной цепи.

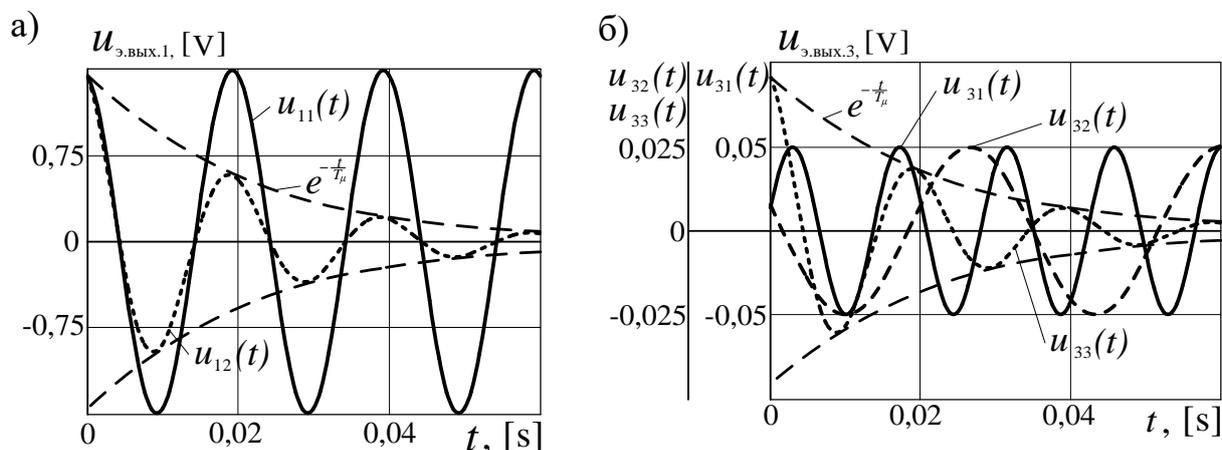
Установлено, что при подаче на вход нового ТИП линейно возрастающего углового перемещения  $Q_M(t) = k_{Q_M} t$ , переходное напряжение на его выходе будет состоять из суммы вынужденной, свободной составляющих и составляющей с возрастающей амплитудой, т. е.:

$u_{э.вых.2}(t) = U_{эм21} \sin(\omega_3 t + \varphi - 90^\circ) + U_{эм22}(t) \sin(\omega_3 t + \varphi + 90^\circ) +$   
 $+ U_{эм23} e^{-\frac{t}{T_\mu}} \sin(\omega_3 t + \varphi - 90^\circ) = u_{21}(t) + u_{22}(t) + u_{23}(t),$  (22)  
 где  $U_{эм21} = U_{эм23} = Kk_{Q_M} T_\mu \omega_3 I_{эмт}$ ;  $U_{эм22}(t) = Kk_{Q_M} \omega_3 I_{эмт} t, [V]$ .

Было получено выражение переходного напряжения нового ТИП, на вход которого было подано синусоидальное угловое перемещение:

$$u_{\text{э.ВЫХ.2}}(t) = U_{\text{эм21}} \sin[(\omega_{\text{э}} + \omega_{\text{м}})t + \varphi_2] + U_{\text{эм22}} \sin[(\omega_{\text{э}} - \omega_{\text{м}})t + \varphi_3] + U_{\text{э23}} e^{-\frac{t}{T_{\mu}}} \cos(\omega_{\text{э}} t + \varphi) = u_{21}(t) + u_{22}(t) + u_{23}(t), \quad (23)$$

где  $\varphi_1 = \arctg(\omega_{\text{м}} T_{\mu})$ ;  $\varphi_2 = \varphi - \varphi_1$ ;  $\varphi_3 = -(\varphi + \varphi_1)$ ;  $U_{\text{эм21}} = U_{\text{эм22}} = K \omega_{\text{э}} I_{\text{ЭВМ}} Q_{\text{ММ}} (2\sqrt{1 + \omega_{\text{м}}^2 T_{\mu}^2})^{-1}$ ;  $U_{\text{э23}} = K \omega_{\text{м}} T_{\mu} \omega_{\text{э}} I_{\text{ЭВМ}} Q_{\text{ММ}} (1 + \omega_{\text{м}}^2 T_{\mu}^2)^{-1}$ .



**Рис. 9. Переходные напряжения новых ТИП, на вход которых было подано скачкообразное (а) и синусоидальное угловое перемещение (б)**

Анализ выражения (23) и ее графиков (рис. 9, б) показывает, что при подаче на вход ТИП синусоидального углового перемещения переходное напряжение на его выходе будут состоять из суммы двух вынужденных составляющих, частота которых равна суммы и вычитания частот перемещения и тока источника, а также свободной составляющей, величина которой уменьшается пропорционально параметрам магнитной цепи.

Основными источниками погрешностей исследуемых новых ТИП являются теоретические, технологические и эксплуатационные источники, среди них погрешность, вызванная наличием высших гармоник в выходных сигналах, относящаяся к теоретической погрешности, относительно больше (1,73 %), а внутренние, внешние и режимные источники погрешностей являются дополнительными источниками погрешностей, из которых погрешность при изменении частоты тока обмотки возбуждения относительно больше (0,4 %).

Определены основные показатели надежности нового ТИП угловых перемещений. Вероятность безотказной работы нового устройства составила 0,9985, что достаточно для систем контроля и управления.

Разработанный трансформаторный преобразователь угловых перемещений на дистанции электроснабжения “Хавас” акционерного общества “Темирйўлинфратузилма” на участке контактной сети (ЭЧК-8) для получения точной информации о колебаниях на контактной подвеске. Ожидаемый экономический эффект составляет 151,730 млн. сум.

Дополнительная информация по диссертации представлена в приложениях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационной работы «Трансформаторные преобразователи угловых перемещений с переменной активной площадью подвижной части» получены следующие научные результаты:

1. Установлено, что выполнение площади обмотки, ферромагнитного сердечника или экрана, размещенного в рабочих воздушных зазорах трансформаторных преобразователей угловых перемещений в виде линейно изменяющегося по угловой координате серповидного кольца, повышает чувствительность и точность этих преобразователей, расширяет их диапазон, обеспечивает линейность статических характеристик.

2. Установлено, что линейность статических характеристик трансформаторных преобразователей угловых перемещений обеспечивается выполнением толщины двух замкнутых и соосно расположенных кольцевых магнитопроводов этих преобразователей линейно уменьшающихся от точки их соединения с переключкой до противоположной диаметральной точки.

3. Анализ математических моделей новых трансформаторных измерительных преобразователей с переменной активной площадью обмотки, ферромагнитного сердечника и электромагнитным экраном показал, что в преобразователях с переменной активной площадью ферромагнитного сердечника рабочие магнитные потоки распределяются линейно вдоль магнитной цепи, а цветной металл, используемый при их изготовлении, сравнительно меньше.

4. Разработаны математические модели магнитных цепей новых трансформаторных измерительных преобразователей с переменной активной площадью обмотки, ферромагнитного сердечника и электромагнитного экрана с учетом их распределенности параметров.

5. Анализ полученных уравнений и графиков статических характеристик новых трансформаторных преобразователей угловых перемещений с переменной активной площадью ферромагнитного сердечника показал, что данные характеристики имеют линейный вид во всем диапазоне измерений и преобразователи обладают постоянной и высокой чувствительностью.

6. Установлено, что при подаче на вход новых трансформаторных преобразователей угловых перемещений скачкообразного углового перемещения, переходное напряжение на его выходе будет состоять из суммы синусоидальной вынужденной и свободной составляющих, уменьшающегося пропорционально параметрам магнитной цепи.

7. Установлено, что при подаче на вход новых трансформаторных преобразователей угловых перемещений синусоидального углового перемещения переходное напряжение на его выходе будут состоять из суммы двух вынужденных составляющих, частота которых равна сумме и вычитания частот перемещения и тока источника, а также свободной составляющей, величина которой уменьшается пропорционально параметрам магнитной цепи.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.15/31.08.2022.T.73.07 ON THE  
ADMISSION OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE  
TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY**

---

**TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY**

**MAMADALIYEV ULUGBEK SHUKHRATOVICH**

**ANGULAR DISPLACEMENT TRANSFORMER CONVERTER WITH A  
VARIABLE ACTIVE AREA OF THE MOVABLE CORE**

**05.01.06 – Elements and devices of computing technics and control systems**

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

**Tashkent - 2025**

The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) in technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under № B2023.4.PhD/T4179.

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](http://www.tdtu.uz)) and Information and Educational Portal «ZiyoNet» ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

<b>Scientific supervisor:</b>	<b>Amirov Sulton Fayzullayevich</b> doctor of technical sciences, professor
<b>Official opponents:</b>	<b>Siddikov Ilhomjon Khakimovich</b> doctor of technical sciences, professor <b>Khalikov Sodikjon Salikhdjanovich</b> candidate of technical sciences, associate professor
<b>Leading organization:</b>	<b>Tashkent state technical university named after Islam Karimov</b>

The defense will be take place on «12» march 2025 at 3:00 p.m. the meeting of the scientific council DSc.15/31.08.2022.T.73.07 Tashkent state transport university. (Address: 100167, Tashkent, str. Temiryo'Ichilar-1, tel.: (99871) 299-00-1; fax: (99871) 293-57-54; e-mail: [rektorat@tstu.uz](mailto:rektorat@tstu.uz).)

The doctoral (PhD )dissertation can be reviewed at the Information-Resource Center of the Tashkent state transport university (Registered number 227). (Address: 100167, Tashkent, str. Temiryo'Ichilar-1, tel.: (99871) 299-00-1; fax: (99871) 293-57-54; e-mail: [rektorat@tstu.uz](mailto:rektorat@tstu.uz).)

Abstract of the dissertation was distributed on «27» february 2025 year.  
(mailing report №023 on «27» february 2025 year).



**R.V. Raximov**  
Chairman of scientific council  
on awarding scientific degrees,  
doctor of technical sciences, professor

**Y. O. Ruzmetov**  
Scientific secretary of the scientific council  
on awarding scientific degrees,  
doctor of technical sciences, professor

**R. M. Mirsaatov**  
Chairman of this scientific seminar under scientific  
council on awarding scientific degrees,  
doctor of technical sciences, professor

## **Introduction (Doctor of Philosophy (PhD) dissertation abstract)**

**The aim of the research** is to develop transformer angular displacement transducers with high sensitivity and accuracy, extended range and linear conversion function.

**The object of the research** is new transformer angular displacement converters.

**The subject of the research** is the development of new transformer angular displacement converters and the study of their main technical characteristics.

### **Research objectives:**

research into the issues of measuring angular displacements at the present stage and formulating the main requirements for displacement transducers; conducting a comparative analysis of the main technical characteristics of existing angular displacement transducers, choosing the type of transducer and justifying it;

development of new transformer angular displacement transducers with high sensitivity and accuracy, extended range and linear conversion function;

development of mathematical models of new transformer angular displacement transducers;

research into the main characteristics of new transformer angular displacement transducers.

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

a new angular displacement transformer transducer with high sensitivity and accuracy, wide range and linear static characteristic has been developed due to its design in the form of a crescent-shaped ring of winding, ferromagnetic core or screen, placed in working air gaps;

a new angular displacement transformer transducer with a linear conversion function has been developed due to a linear decrease in the thickness of two coaxially located closed ring magnetic cores from the point of their connection with the jumper to the opposite diametrical point;

mathematical models of new transformer transducers have been developed taking into account the distribution of parameters of long ferromagnetic rods, working air gaps, windings, core and screen with variable active area;

a method has been developed for calculating magnetic circuits of new angular displacement transformer transducers with variable active surface of winding, ferromagnetic core and screen, consisting in dividing magnetic circuits in sections before the element with variable active area, the element itself and after this element.

**Implementation of the research results.** Based on the results of the development of transformer angular displacement transducers:

a patent for an invention was received from the State Institution "Intellectual Property Center" under the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan for a transformer transducer device (№. IAP 07519; 2023). As a result, a device for measuring angular displacements with a linear conversion function was created;

a patent for an invention was received from the State Institution "Intellectual Property Center" under the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan for a

transformer transducer device (№. IAP 07683; 2024). As a result, a device for measuring angular displacements was created, which has high sensitivity, accuracy, extended range and a linear conversion function;

a new transformer conversion unit for measuring angular displacements with high sensitivity and accuracy, with an extended range, with a linear conversion function, was implemented at the Khavas power supply distance of the Temiryulinfratuzilma Joint-Stock Company on the contact network section (EChK-8) to obtain accurate information about vibrations on the contact suspension (Certificate No. 4 / E1538 dated November 12, 2024, Temiryulinfratuzilma JSC). As a result, accurate information was obtained on amplitude vibrations with timely detection of dangerous self-oscillatory processes during the movement of an electric locomotive and automatic control of the oscillatory process on the contact suspension.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The volume of the dissertation is 117 pages.

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

**I бўлим (Част I; Part I)**

1. Патент РУз (UZ) № IAP 07683. Преобразователь угловых перемещений // Амиров С.Ф., Каримов И.А., Юлдашев Н.Р., Мамадалиев У.Ш., Шоимкулов А.А. // Расмий ахборотнома, 2024. - №5.

2. Патент РУз (UZ) № IAP 07519. Преобразователь угловых перемещений // Амиров С.Ф., Суллийев А.Х., Файзуллаев Ж.С., Шарапов Ш.А., Мамадалиев У.Ш., Сатторов Т.А. // Расмий ахборотнома, 2023. - №11.

3. Амиров С.Ф., Мамадалиев У.Ш., Каримов И.А., Новые трансформаторные преобразователи угловых перемещений // “Научный журнал транспортных средств и дорог”, 2022, №4. – 31-38 с. (05.00.00; №11).

4. Амиров С.Ф., Мамадалиев У.Ш., Каримов И.А., Исследование трансформаторных преобразователей угловых перемещений с переменной активной площадью обмотки возбуждения // “Железнодорожный транспорт: актуальные задачи и инновации”, 2023, №2. – 12-21 с. (05.00.00; №11).

5. Амиров С.Ф., Мамадалиев У.Ш., Каримов И.А., Исследование магнитной цепи преобразователя угловых перемещений с переменной активной площадью подвижного сердечника // “Научный журнал транспортных средств и дорог”, №3/2023 104-111 с. (05.00.00; №11).

6. Амиров С.Ф., Мамадалиев У.Ш., Каримов И.А., Сатторов Т.А. Математические модели трансформаторных преобразователей угловых перемещений с переменной активной площадью обмотки возбуждения // Бухоро муҳандислик технология институтининг даврий “Фан ва технологиялар тараққиёти” илмий-техникавий журнал №6/2023 197-205 с. (ОАК Раёсатининг 29.03.2017 й. №239/5-сон қарори).

7. Амиров С.Ф., Мамадалиев У.Ш., Суллийев А.Х., Потокораспределение в магнитных цепях преобразователей угловых перемещений с переменной активной площадью подвижного сердечника // Химическая технология. Контроль и управление. – 2023, №5(113). – 22-31 с. (05.00.00; №12).

8. Файзуллаев Ж.С., Мамадалиев У.Ш., Юлдашев Н.Р. Бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичларининг динамик характеристикалари // “Железнодорожный транспорт: актуальные задачи и инновации”, 2024, №2. – 8-17 с. (05.00.00; №11).

9. Файзуллаев Ж.С., Мамадалиев У.Ш., Мухторов У.Б. Бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичлар хатоликлари // “Железнодорожный транспорт: актуальные задачи и инновации”, 2024, №2. – 44-56 с. (05.00.00; №11).

10. Файзуллаев Ж.С., Мамадалиев У.Ш., Каримов И.А. Бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичлар статик характеристикалари // “Железнодорожный транспорт: актуальные задачи и инновации”, 2024, №2. – 116-121 с. (05.00.00; №11).

11. Amirov S.F., Mamadaliyev U.Sh., Karimov I.A. The magnetic chain mathematical models of a new angular displacement converter with a variable active area of the a movable core// Chemical technology. Control and management, International scientific and technical journal, Tashkent, 2023, №2, p 29-38. (05.00.00; №12).

12. Amirov S.F., Mamadaliyev U.Sh. Transformer converters of angular displacement with variable active area of a movable core. International journal of European research output. Vol.3 № 11 November (2024), 50-63 p. (Impact Factor 9.1).

## **II бўлим (Чақ II; Part II)**

13. Амиров С.Ф., Мамадалиев У.Ш. Новые трансформаторные датчики угловых перемещений с переменной активной площадью подвижного сердечника // International conference on modern science and scientific studies. Vol 3, Issue 2, February 19<sup>th</sup> 2024 France, 113-122 p.

14. Амиров С.Ф., Мамадалиев У.Ш. Расчет магнитной цепи датчика угловых перемещений с переменной активной площадью подвижного сердечника // International conference on modern science and scientific studies. Vol 3, Issue 2, February 19<sup>th</sup> 2024 France, 104-112 p.

15. Амиров С.Ф., Мамадалиев У.Ш., Математические модели трансформаторных преобразователей угловых перемещений с переменной активной площадью обмотки возбуждения // «Таълимда рақамли технологияларни тадбиқ этишининг замонавий тенденциялари ва ривожланиш омиллари» мавзусидаги Республика миқёсидаги илмий-амалий, масофавий конференция материаллари, 31-тўплам 2-қисм Май– Т.: Риштон ХТБ 2024. 9-22 с.

16. Амиров С.Ф., Мамадалиев У.Ш. Ўзгарувчан юзали бурчак силжишларини ўлчовчи янги трансформатор ўзгартиргичлар хатоликлари // «Современное состояние и перспективы развития цифровых технологий и искусственного интеллекта». Сборник докладов международной научно-технической конференции. Бухара, 27-28 сентября 2024 г. Часть 2, 41-48 с.

17. Мамадалиев У.Ш., Трансформаторные преобразователи угловых перемещений с переменной активной площадью обмотки возбуждения // «Таълимнинг замонавий трансформацияси» мавзусидаги Республика миқёсидаги илмий-амалий конференция материаллари, 8-тўплам 1-сон июн – Т.: Қўқон ш. 2023. 66-80 с.

18. Мамадалиев У.Ш., Магнитные цепи преобразователей угловых перемещений с переменной активной площадью подвижного сердечника // «Янги Ўзбекистон тараққиётида тадқиқотларни ўрни ва ривожланиш омиллари» мавзусидаги Республика миқёсидаги илмий-амалий конференция материаллари– Т.: Қўқон ш. 2023. 26-41 с.

19. Amirov S.F., Mamadaliyev U.Sh. The magnetic chain mathematical models of a new angular displacement sensor with a variable active area of the a movable core. International scientific journal Science and Innovation. Tashkent 2024 March, 318-329 p.

Автореферат «ТДТрУ ахборотномаси» илмий-амалий журнали  
тахририятида таҳрирдан ўтказилди ва матнларни мослиги текширилди

---

Қоғоз бичими 84×60-1/16. Ризограф босма усули. Times New Roman гарнитураси  
Шартли босма табағи: 2,5 б.т. Адади: 60 нусха.  
Буюртма №43-9/2025 Нашрга рухсат этилди: 26.02.2025 й.

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