

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

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ЖУРАЕВА КАМИЛА КОМИЛОВНА**

**НАЗОРАТ ВА БОШҚАРУВ ТИЗИМЛАРИ УЧУН  
МЕХАНИК КАТТАЛИКЛАРНИ ЎЛЧОВЧИ  
МАГНИТ ЭЛАСТИК ЎЗГАРТИРГИЧЛАР**

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

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

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

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

**Contents of the abstract dissertation Doctor of Technical Sciences (DSc)**

**Жураева Камила Комиловна**

Назорат ва бошқарув тизимлари учун механик катталикларни ўлчовчи  
магнит эластик ўзгартиргичлар ..... 3

**Жураева Камила Комиловна**

Магнитоупругие преобразователи механических величин для систем  
контроля и управления ..... 29

**Jurayeva Kamila Komilovna**

Magnetoelastic transducers for measuring mechanical quantities for monitoring  
and control systems ..... 55

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works ..... 60

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

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ЖУРАЕВА КАМИЛА КОМИЛОВНА**

**НАЗОРАТ ВА БОШҚАРУВ ТИЗИМЛАРИ УЧУН МЕХАНИК  
КАТТАЛИКЛАРНИ ЎЛЧОВЧИ МАГНИТ ЭЛАСТИК  
ЎЗГАРТИРГИЧЛАР**

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

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

**Фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Олий таълим, фан ва инновациялар вазирлиги ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2022.3.DSc/T542 рақами билан рўйхатга олинган.**

Докторлик диссертацияси Тошкент давлат транспорт университетида бажарилган.

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

**Илмий маслаҳатчи:**

**Амиров Султон Файзуллаевич**  
техника фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:**

**Плахтиев Анатолий Михайлович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Мамаджанов Алишер Мамаджанович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Жумаев Одил Абдужалилович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Етакчи ташкилот:**

**Муҳаммад ал-Хоразмий номидаги  
Тошкент ахборот технологиялари  
университети**

Диссертация химояси Тошкент давлат транспорт университети ҳузуридаги DSc.15/31.08.2022.T.73.07 рақамли Илмий кенгашнинг 2025 йил «31» май соат 10<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@tstu.uz](mailto:rektorat@tstu.uz).

Диссертацияси билан Тошкент давлат транспорт университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (251 рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100167, Тошкент ш., Темирийўлчилар кўчаси, 1-уй. Тел.: (+99871) 299-05-66.

Диссертация автореферати 2025 йил «20» майда тарқатилди.  
(2025 йил «7» майдаги №031 рақамли 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 (докторлик (DSc) диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳонда машинасозлик, кимё саноати, қишлоқ хўжалиги ва транспорт соҳаларига замонавий автоматик назорат ва бошқарув тизимларини жорий этиш орқали технологик ва ишлаб чиқариш жараёнларини жадаллаштириш муҳим аҳамият касб этмоқда. Ушбу йўналишда бошқарув тизимларининг элементлари ва қурилмаларини, хусусан ишончли ўлчов ахборотини олишни таъминлаб берадиган механик катталикларни (куч, айлантирувчи момент, силжиш, тезлик ва тезлашиш ҳамда вибрация параметрлари) ўлчаш ўзгартиргичларини ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда. Бу борада автоматик бошқарув учун механик катталиклар ўзгартиргичларини ишлаб чиқиш ҳамда ушбу ўзгартиргичлардан юқори аниқликдаги маълумотлар олиш имконини берадиган усулларни такомиллаштириш долзарб аҳамиятга эга.

Жаҳонда бошқарув тизимларини такомиллаштириш ва ушбу тизимлар учун мўлжалланган назорат қилинаётган объектларнинг куч, айлантирувчи момент ҳамда ҳаракатланиш параметрларини электр сигналларга ўзгартирадиган ўлчов ўзгартиргичларини такомиллаштириш бўйича илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Шунга боғлиқ ҳолда ўзгартиргичларнинг янги конструкцияларини ишлаб чиқиш, экстремал шароитларда иккиламчи занжирларнинг ишончилиги ва барқарорлигини оширадиган ҳамда юқори сезгирликка ва ўзгартириш тавсифларининг чизиқлигига эга асосий электр ва магнит параметрларини тадқиқ этиш учун бундай ўзгартиргичларнинг схематик ва аналитик ифодаларини ишлаб чиқиш муҳим масалалардан бири ҳисобланади.

Республикамызда транспортнинг турли тармоқларини, жумладан темир йўл транспорти инфратузилмасини ривожлантириш, юқори тезликдаги ҳаракатланувчи таркиб учун участкаларни кенгайтириш, мавжуд темир йўл участкаларини электрлаштириш ва электрлаштирилган участкаларнинг ўтказувчанлик қобилятини ошириш бўйича чора-табдирлар амалга оширилмоқда. 2022-2026 йилларга мўлжалланган янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегиясида бир қанча муҳим вазифалар белгиланган, хусусан “...миллий иқтисодиётни жадал ривожлантириш ва юқори ўсиш суръатларини таъминлаш, ... бино ва иншоотларнинг энергия самарадорлигини ошириш, ... тизимли муаммоларни олимлар, экспертлар уюшмаси ва жамоатчилик вакиллари билан биргаликда муҳокама қилиш ҳамда уларни бартараф этиш бўйича аниқ таклифлар ишлаб чиқиш, ... транспорт бозори ва инфратузилмасини ривожлантириш, ... темир йўл инфратузилмасини электрлаштириш даражасини 60% га ошириш, ... энергетика ва транспорт соҳаларидаги муносабатларни ривожлантиришга қаратилган ҳамкорлик шакллари қўллаб-қувватлаш”<sup>1</sup> вазифалари белгилаб берилган. Ушбу вазифаларни амалга ошириш, жумладан кенг функционал имкониятларга, юқори сезгирликка, ишончилиқка ва чизиқли ўзгартириш тавсифларининг эга

---

<sup>1</sup>Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги “2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида”ги ПФ-60-сонли Фармони

бўлган механик катталикларнинг янги магнит эластик ўзгартиргичларини ишлаб чиқиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Мазкур диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикасининг 1999 йил 15 апрелдаги “Темир йўл транспорти тўғрисида”ги 766-сон Қонуни, Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги “2022-2026 йилларга мўлжалланган янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида”ги ПФ-60-сон Фармони, 2023 йил 16 февралдаги “2023 йилда қайта тикланувчи энергия манбаларини ва энергия тежовчи технологияларни жорий этишни жадаллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида” ги ПҚ-57-сон Қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялар ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар ривожланишининг – II. “Энергетика, энергия ва ресурстежамкорлик” устувор йўналиши доирасида бажарилган.

**Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи.** Механик катталикларнинг магнит эластик ўзгартиргичлари назариясини ривожлантириш, лойиҳалаш ва ишлаб чиқиш билан боғлиқ долзарб вазифаларни ҳал этишга йўналтирилган илмий тадқиқотлар дунёнинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасаларида, жумладан University of Michigan ва General Electric, Bergen Laboratories Ins. (АҚШ), Technical University of Ilmenau ва Siemens, Siemens ind Halke (Германия), Davy and United Instrumets (Буюк Британия), Sony ва Tokyo technology institute, Toshiba (Япония), ASEA (Швеция), Kelk Electronics (Канада), Technical Laboratories “TECH LAB” (Қатар), НАWK (Буюк Британия), Уфа фан ва технологиялар университети, «Геотехника» илмий-ишлаб чиқариш уюшмаси (Россия), Киев автоматика институти (Украина), Тошкент давлат техник университети, «Тошкент ирригация ва қишлоқ хўжалигини механизациялаш институти» Миллий тадқиқот университети ҳамда Тошкент давлат транспорт университети (Ўзбекистон) олиб борилмоқда.

Жаҳонда магнит эластик ўзгартиргичлар назариясини ривожлантириш ва конструкция ҳамда схемаларини такомиллаштириш бўйича олиб борилаётган тадқиқотлар натижасида бир қатор илмий натижаларга эришилган, хусусан магнит эластик эффектнинг назарий асослари ишлаб чиқилган (Россия, АҚШ), сикўвчи, чўзўвчи кучлар, буровчи момент, силжиш, тезлик ва тезланиш ҳамда вибрация параметрларини ўлчашга мўлжалланган бир қатор магнит эластик ўзгартиргичларнинг янги конструкциялари таклиф этилган (Германия, Франция, АҚШ, Швеция, Япония, Россия).

Жаҳонда магнит эластик ўзгартиргичлар назариясини ривожлантириш ва конструкцияларини такомиллаштириш мақсадида уларни таҳлил қилишнинг янги самарали усулларини ишлаб чиқиш, функционал имкониятлари кенгайтирилган, сезгирлиги ва аниқлиги юқори ҳамда чизикли ўзгартириш функциясига эга бўлган конструкцияларини яратиш каби устивор йўналишларда илмий тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Механик катталикларнинг магнит эластик ўзгартиргичларини такомиллаштиришга оид илмий муаммоларни ҳал этишга А. Lotze, Р. Kauert, С. Enke, L. Walther, Т. Barthon, R. Ionedes, Ф.В. Майоров, М.Н. Гуманюк, В.Б. Гинзбург, Г.И. Шевченко, В.М. Панченко, Б.В. Загорюкин, М.И. Столбун, М.Ф. Зарипов, Н.Е. Конюхов, М.А. Ураксеев, Р.К. Азимов, А.М. Мамаджанов, А.М. Плахтиев, Л.Х. Зайнутдинова, И.Х. Сиддиқов, С.Ф. Амиров, О.В. Тарханов, М.С. Бахарев, А.В. Капцов, А.В. Мостовой, В.В. Проботюк ва бошқалар ўз ҳиссаларини қўшган. Ушбу олимларнинг саъй-ҳаракатлари билан механик катталикларнинг магнит эластик ўзгартиргичларини лойиҳалаш ва ҳисоблашнинг назарий асослари ишлаб чиқилган ва ривожлантирилган, мазкур ўзгартиргичларнинг оригинал конструкциялари ва схема ечимлари таклиф этилган ва татбиқ қилинган.

Шу билан бирга, турли объектларни назорат қилиш ва бошқариш тизимлари учун мўлжалланган сиқувчи, чўзувчи ва маҳаллий кучлар ҳамда силжиш, тезлик, тезлашишлар, шу жумладан ҳаракатланишнинг вибрация параметрларини ўлчовчи кенг функционал имкониятларга, юқори сезгирлик, ишончлилик, чизиқли ўзгартириш тавсифларига эга бўлган магнит эластик ўзгартиргичларини ва ушбу ўзгартиргичларнинг таъминот манбаларини яратишга, шунингдек чекланган узунликдаги тақсимланган магнитловчи чулғамларга эга бўлган ҳамда магнит эластик материаллар магнит тавсифларининг тегишли параметрларига таъсир этувчи механик кучланишларни ҳисобга олган ҳолда магнит эластик ўзгартиргичларни дастлабки конструкциялаш назарияси ва усулларини ривожлантиришга етарли даражада эътибор қаратилмаган.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат темир йўл университетининг “Темир йўл транспорти учун электромагнит ва электр ўлчаш қурилмаларини такомиллаштириш” (2018-2024) 3-сон илмий-тадқиқот ишлари режаси доирасида бажарилган.

**Тадқиқот мақсади** назорат ва бошқарув тизимлари учун механик катталикларни ўлчовчи магнит эластик ўзгартиргичлар назарияси ва дастлабки конструкциялаш усулларини янада ривожлантириш ҳамда уларнинг янги конструкцияларини ишлаб чиқишдан иборат.

**Тадқиқот вазифалари:**

замонавий босқичда механик катталиклар ўзгартиргичларини ўрганиш ва назорат ҳамда бошқарув тизимлари томонидан уларга қўйиладиган асосий талабларни шакллантириш;

мавжуд механик катталиклар ўзгартиргичлари асосий тавсифларининг қиёсий таҳлилини ўтказиш, назорат ва бошқарув тизимлари учун ўзгартиргич турини танлаш ва асослаш;

механик катталикларнинг магнит эластик ўзгартиргичлари дастлабки конструкциялаш усулларини ривожлантириш;

механик катталикларнинг магнит эластик ўзгартиргичларини яратишнинг умумий тамойилларини ишлаб чиқиш;

чекланган узунликдаги тақсимланган қўзғатиш чулғамларига эга бўлган ва механик кучланишларни магнит эластик материаллар магнит тавсифларининг тегишли параметрларига таъсирини инобатга олган ҳолда магнит эластик ўзгартиргичларнинг математик моделларини ишлаб чиқиш;

яхшиланган ахборот-энергетик кўрсаткичларига эга бўлган механик катталикларни ўлчовчи янги магнит эластик ўзгартиргичлар ва улар учун таъминот манбаларини ишлаб чиқиш;

ишлаб чиқилган механик катталиклар магнит эластик ўзгартиргичларининг асосий техник тавсифларини тадқиқ этиш.

**Тадқиқот объекти** сифатида кенг функционал имкониятларга, юқори сезгирлик, ишончлилик ва чизикли ўзгартириш тавсифларига эга бўлган механик катталикларнинг магнит эластик ўзгартиргичлари олинган.

**Тадқиқот предмети** механик катталикларнинг магнит эластик ўзгартиргичларидаги электромагнит жараёнларни тадқиқ этиш ва ушбу ўзгартиргичларнинг кенг функционал имкониятларга, юқори сезгирлик, ишончлилик ва чизикли ўзгартириш тавсифларига эга бўлган янги конструкцияларини ишлаб чиқишни ташкил этади.

**Тадқиқот усуллари.** Тадқиқот жараёнида йиғиқ ва тарқоқ параметрларга эга электр ва магнит занжирлар назарияси, электромагнит майдон ва хатоликлар назариялари, техник ижодиётнинг энергия-ахборот ва морфологик усуллари, параметрик структура схемалари усули ҳамда тажриба усулларидан фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

механик катталикларнинг магнит эластик ўзгартиргичларини морфологик таҳлил ва синтез қилиш босқичида синтезланаётган вариантлар сонини кўпайтириш ва талаб этилаётган тавсифларга эга ўзгартиргичларни танлаш имконини берадиган дастлабки конструкциялашнинг энергия-ахборот ва морфологик усуллари ривожлантирилган;

механик катталиклар магнит эластик ўзгартиргичлари структуравий тузилишларининг барча вариантларини ўз ичига олиш имкониятини берадиган турли физик табиатга эга занжирлар ўртасидаги боғлиқлик топограммаси кўринишидаги бундай ўзгартиргичларни куришнинг умумий тамойили ишлаб чиқилган;

кенг функционал имкониятларга, юқори сезгирлик, ишончлилик ва чизикли ўзгартириш тавсифларига эга бўлган механик катталиклар магнит эластик ўзгартиргичларининг янги конструкциялари, шу жумладан маҳаллий кучлар, бурчак тезликлари ва тезлашишларини ўлчаш имконини берадиган илк магнит эластик ўзгартиргичлар ишлаб чиқилган;

барқарорлаштирилган тўғриланган кучланиши таркибидаги юқори гармоникалар улушини камайтириш орқали механик катталиклар магнит эластик ўзгартиргичлари учун кучланишининг сифати юқори бўлган энергия таъминоти манбаларининг янги схемалари ишлаб чиқилган;

бир вақтнинг ўзида магнит эластик ўзаклар магнит қаршиликлари ва ўзаклар ўртасидаги магнит сиғимлари тарқоқ табиатини, шунингдек чекланган узунликдаги бўйлама ва кўндаланг қўзғатиш чулғамларининг

тақсимланганлигини инобатга олган ҳолда механик катталиклар магнит эластик ўзгартиргичларини таҳлил қилиш методикаси ишлаб чиқилган;

электр ва магнит занжирларининг тақсимланганлиги ва магнит эластик материаллар магнит тавсифларининг параметрларига таъсир этувчи механик кучланишларни ҳисобга олган ҳолда магнит эластик ўзгартиргичларнинг математик моделлари ишлаб чиқилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

яхшиланган техник тавсифларга эга механик катталиклар магнит эластик ўзгартиргичларининг янги конструкцияларини ишлаб чиқиш учун умумлашган усуллар аниқланди ва морфологик матрицалар тузилган;

магнит эластик материалларга механик кучланишларнинг таъсирини инобатга олган ҳолда уларнинг асосий магнитланиш эгри чизиғи ва гистерезис ҳалқасининг математик моделлари ишлаб чиқилган;

сиқувчи маҳаллий кучлар, чўзувчи кучлар ва бурчак силжишлари, тезлик ва тезлашишларни ўлчашга мўлжалланган кенг функционал имкониятларга, юқори сезгирлик ва ишончлилика эга бўлган магнит эластик ўзгартиргич қурилмалари ишлаб чиқилган;

тўғриланган кучланишни юқори сифатда барқарорлаштирадиган магнит эластик ўзгартиргичлар учун таъминот манбаи қурилмаси ишлаб чиқилди.

**Тадқиқот натижаларининг ишончилиги.** Тадқиқотнинг ишончилиги механик катталикларнинг магнит эластик ўзгартиргичларини ҳисоблашда электр ва магнит занжирлар ҳамда электромагнит майдон назарияларига асосланган усулларнинг асосли равишда қўлланилганлиги, шунингдек назарий ва тажриба натижалари ва уларнинг ўзаро мувофиқлиги билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.**

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти бир вақтнинг ўзида электр магнит занжир параметрларининг тақсимланганлигини, механик кучланишларнинг магнит эластик материаллар магнит тавсифлари параметрларига таъсирини ва магнит эластик ўзаклар магнит қаршиликлари, улар орасидаги магнит сиғимларнинг тақсимланганлик табиатини ҳамда чекланган узунликдаги бўйлама ва кўндаланг қўзғатиш чулғамларининг тақсимланганлигини инобатга олган ҳолда механик катталиклар магнит эластик ўзгартиргичлари математик моделларининг ишлаб чиқилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундаки механик катталиклар магнит эластик ўзгартиргичларини дастлабки конструкциялашнинг энергия-ахборот ва морфологик усуллари, аниқланган умумлашган усуллар ҳамда тузилган морфологик матрицалар яхшиланган техник тавсифларга эга бўлган механик катталиклар магнит эластик ўзгартиргичларини ишлаб чиқиш имконини бериши билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Механик катталиклар магнит эластик ўзгартиргичларини ишлаб чиқиш бўйича олинган натижалар асосида:

сиқувчи кучларнинг магнит эластик ўзгартиргичи қурилмаси учун Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлиги томонидан ихтирога

патент (№IAP 06441, 2021 й.) олинган. Натижада, маҳаллий кучларни юқори сезгирлик ва аниқлик билан ўлчаш имконияти пайдо бўлган;

ўзгармас кучланиш манбаи қурилмаси учун Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги Интеллектуал мулк маркази томонидан ихтирога патент (№IAP 07237, 2023 й.) олинган. Натижада, магнит эластик ўзгартиргичларни сифати юқори бўлган барқарорлаштирилган ўзгармас кучланиш манбаидан таъминлаш имконияти пайдо бўлган;

уч фазали кучланиш стабилизатори қурилмаси учун Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги Интеллектуал мулк маркази томонидан ихтирога патент (№IAP 07490, 2023 й.) олинган. Натижада, магнит эластик ўзгартиргичларни юқори гармоникаларининг улуши камайтирилган барқарорлаштирилган ўзгарувчан кучланиш манбаидан таъминлаш имконияти пайдо бўлган;

чўзувчи кучларнинг магнит эластик ўзгартиргичи қурилмаси учун Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги Интеллектуал мулк маркази томонидан ихтирога патент (№IAP 7715, 2024 й.) олинган. Натижада, чўзувчи кучларни юқори аниқликда ўлчашга мўлжалланган қурилмани яратиш имконияти пайдо бўлган;

вибрация параметрларини ўлчашга мўлжалланган магнит эластик ўзгартиргич қурилмаси учун Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги Интеллектуал мулк маркази томонидан ихтирога патент (№IAP 7870, 2024 й.) олинган. Натижада, вибрация параметрларини иккита ўзаро перпендикуляр ўқлар бўйлаб ўлчаш ҳамда иккита алоҳида мустақил ўлчаш чулғамларидан чиқиш сигналларини олиш имконияти пайдо бўлган;

айланиш параметрларининг магнит эластик ўзгартиргичи қурилмаси учун Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги Интеллектуал мулк маркази томонидан ихтирога патент (№IAP 7878, 2024 й.) олинган. Натижада, бурчак силжишлари, тезлик ва тезлашишни ўлчашга мўлжалланган қурилмани яратиш имкони пайдо бўлган.

Функционал имкониятлари кенгайтирилган, сезгирлиги ва экстремал иш шароитларида ишончилиги юқори бўлган янги магнит эластик куч ўзгартиргичининг қурилмаси “Ўзбекистон темир йўллари” АЖ “Темирйўлинфратузилма” АЖ “Локомотивларни ишлатиш” бошқармасига қарашли “Ўзбекистон” депосида электровозлар ток қабул қилгичларини диагностикалаш ва техник ҳолатини назорат қилиш ишлаб чиқариш жараёнига қўлланилган (Ўзбекистон Республикаси Транспорт вазирлигининг 2025 йил 10 апрелдаги 4/Е503- сон маълумотномаси). Натижада, электровозлар ток қабул қилгичларини диагностикалаш ва техник ҳолатини назорат қилиш аниқлигини ошириш ҳисобига контакт осмаси контакт симларининг хизмат муддатини ошириш ҳамда уларни ишдан чиқишини олдини олишга эришилган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Тадқиқот натижалари 25 та илмий-амалий анжуманларда, жумладан 22 та халқаро ва 3 та республика анжуманларида муҳокама қилинган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича жами 61 та илмий иш чоп этилган бўлиб, жумладан 1 та монография,

23 та мақола Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижалари чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда (шулардан 7 таси хорижий ва 16 таси республика даврий илмий журналларда), шунингдек 12 та мақола Scopus маълумотлар базасига киритилган журналларда ҳамда 2 та мақола бошқа хорижий журналларда чоп этилган. Шу билан бирга, ихтиро учун Ўзбекистон Республикасининг 6 та патенти ва ЭҲМ дастури учун 5 та Гувохнома олинган.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ҳажми 197 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати, тадқиқотнинг республика фан ва техника ривожланиши устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси баён қилинган, диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги изоҳланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари шакллантирилган; тадқиқот объекти ва предмети ҳамда тадқиқотда фойдаланилган усуллар ифодаланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончлилиги асосланган; назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган; диссертация тадқиқоти натижаларининг ишлаб чиқаришга жорий қилиниши кўрсатилган; чоп этилган илмий ишлар, диссертация тузилиши ва ҳажми бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **“Муаммонинг ҳолати ва тадқиқот вазифаларининг қўйилиши”** номли биринчи бобда ўлчаш элементлари сифатида механик катталиклар (куч, айлантирувчи момент, силжиш, тезлик ва тезланиш ҳамда вибрация параметрлари) ўзгартиргичлари қўлланиладиган машинасозлик, кимё саноати ва транспорт соҳаларидаги объектлар ва технологик жараёнларни назорат қилиш ва бошқариш автоматик тизимлари схемалари ўрганилган ҳамда ушбу ўзгартиргичларга қўйиладиган асосий талаблар аниқланган. Шунингдек, назорат ва бошқарув тизимларида қўлланиладиган механик катталиклар ўзгартиргичлари кенг функционал имкониятларга (битта ўзгартиргич билан бир қанча механик катталикларни, маҳаллий кучларни ўлчаш, механик катталикларни бир қанча ўқлар бўйича ўлчаш ва ҳ.к.), катта чиқиш қувватига, юқори сезгирликка, аниқликка, чизиқли статик тавсифга, юқори ишончлилик ва оғир эксплуатация шароитларида барқарор метрологик тавсифга эга бўлиши зарурлиги аниқланган.

Мавжуд механик катталиклар ўзгартиргичларининг асосий тавсифларини қиёсий таҳлили натижасида юқори чиқиш қувватига, ўта юкланиш қобилиятига, экстремал шароитларда ишлашда юқори ишончлиликка ва тавсифларининг барқарорлигига, куч, айлантирувчи момент, тезланиш ва вибрация параметрларини ўлчашда кўзгалувчан қисмининг йўқлиги каби афзалликларга эга бўлган магнит эластик ўзгартиргичлар (МЭЎ) бошқарув тизимлари томонидан қўйиладиган талабларга тўлиқ жавоб бериши аниқланди.

Шу билан бирга, мавжуд механик катталиклар МЭЎ (МКМЭЎ) чекланган функционал имкониятларга эга эканлиги аниқланди: битта МЭЎ ёрдамида бир қанча механик катталикларни (масалан, силжиш, ушбу силжишнинг тезлиги ва тезланишини) ўлчаш, маҳаллий кучларни ҳамда битта механик катталиқни (масалан, вибрация параметрини) бир қанча ўзаро перпендикуляр ўқлар бўйлаб ўлчаш имконияти мавжуд эмас. Бундан ташқари, мавжуд МЭЎлар нисбатан паст сезгирликка ва ўлчаш аниқлигига эга. МЭЎларнинг нисбатан паст аниқликка эгаллиги сабабларидан бири уларнинг таъминот манбалари қониқарсиз чиқиш тавсифларига эга эканлиги ҳисобланади, яъни таъминловчи кучланиш таркибидаги ўзгармас ва ўзгарувчан кучланиш манбаларида МЭЎларнинг кўшимча хатоликларига сабаб бўладиган юқори гармоник ташкил этувчиларнинг улуши нисбатан катта.

Кейинги тадқиқотлар назорат ва бошқарув тизимлари учун талаб этиладиган тавсифларга эга янги МКМЭЎларни ишлаб чиқишга қаратилиши лозимлиги аниқланди, бунда дастлабки конструкциялаш усуллари жалб этиш, уларнинг умумий тамойилларини ишлаб чиқиш, МЭЎларнинг асосий техник тавсифларини тўлиқ тадқиқ этиш учун эса ушбу ўзгартиргичларнинг назарияларини ривожлантириш, хусусан бир вақтнинг ўзида магнит эластик ўзаклар магнит қаршилиқлари, ўзаклар ўртасидаги магнит сиғимларнинг тарқоқ табиатини, шунингдек чекланган узунликдаги бўйлама ва кўндаланг қўзғатиш чулғамларининг тарқоқлигини инобатга олган ҳолда МЭЎларни таҳлил этиш методикасини ишлаб чиқиш ҳамда тақсимланган параметрлар ва механик кучланишларнинг магнит эластик материаллар магнит тавсифларига таъсирини ҳисобга оладиган математик моделларини ишлаб чиқиш зарур.

Адабиёт манбалари таҳлили натижаларидан келиб чиққан ҳолда ва белгиланган мақсадга мувофиқ тадқиқотнинг асосий вазифалари шакллантирилди.

**“Механик катталиклар магнит эластик ўзгартиргичларини дастлабки конструкциялаш ва қуриш тамойиллари”** номли иккинчи бобда техник ижодиётнинг энергия-ахборот ва морфологик усуллари ривожлантирилди, МКМЭЎларни қуришнинг умумий тамойиллари ва янги конструкциялари ишлаб чиқилди.

МКМЭЎларни энергия-ахборот усули ёрдамида дастлабки конструкциялашда ўзгартиргичларнинг морфологик таҳлил ва синтез босқичини параметрик структура схемаси (ПСС) ҳамда ҳар бир физик-техник эффект (ФТЭ) бўйича морфологик таҳлил ва синтезнинг алоҳида кичик босқичларига ажратиш синтезланаётган вариантлар сонини ошириш ҳамда назорат ва бошқарув тизимлари учун талаб этиладиган тавсифларга эга МКМЭЎларни танлаш имконини бериши кўрсатилган. Бунда ҳар бир элементар ўзгартиргич бўйича морфологик матрицаларнинг маълумотлар базасидан фойдаланган ҳолда МКМЭЎ нинг ПСС кўринишидаги физик тамойилини ҳосил қилишнинг биринчи босқичида тўлиқ ўзгартиргичнинг физик ишлаш тамойилига оид энг мақбул вариантларини топади, яъни танланган ПСС бўйича морфологик синтез ўтказилади. Синтезнинг бу босқичида МКМЭЎнинг танланган ПССда иштирок этган ФТЭ ёки параметр морфологик

белгилар сифатида намоён бўлади ва ҳар бир ММ белгисининг қиймати сифатида ФТЭ нинг қўлланилиш варианты ёки алоҳида техник тавсиф бўйича энг мақбул параметр, масалан, сезгирлик, хатолик, ишончлилик ва ҳ.к. олинади.

МКМЭЎларни турли физик табиатга эга занжирлар ўртасидаги боғлиқликлар топограммаси кўринишида қуришнинг умумий тамойиллари ишлаб чиқилган бўлиб, улар ушбу ўзгартиргичларнинг структуравий кўринишига оид барча турдаги вариантларини бирлаштириш имконини беради. Бунда топограммадаги битта физик табиатга эга занжирлар катталикларининг ўзаро таъсири ушбу занжирнинг мос параметрлари ҳамда дифференциаллаш ва интеграллаш операторлари орқали амалга оширилади, турли физик табиатга эга бўлган занжирлар катталикларининг ўзаро таъсири эса ушбу занжирлар ўртасида ФТЭ нинг мавжудлигида акс этади. Тузилган топограмма таҳлили натижасида турли физик табиатга эга занжирлар орасида ФТЭ қанча кўп бўлса, МКМЭЎларни структура схемалари кўринишида қуриш вариантлари шунча хилма-хил бўлиши аниқланди. Масалан, топограммада турли физик табиатга эга занжирлар ўртасидаги боғлиқлик топограммасининг қўлланилиши механик бурчак тезлиги ва механик кучланиш ўртасидаги ФТЭ МЭЎларни илк бор бурчак тезлиги ва бурчак тезланишини ўлчаш учун синтезлаш имконини берди.

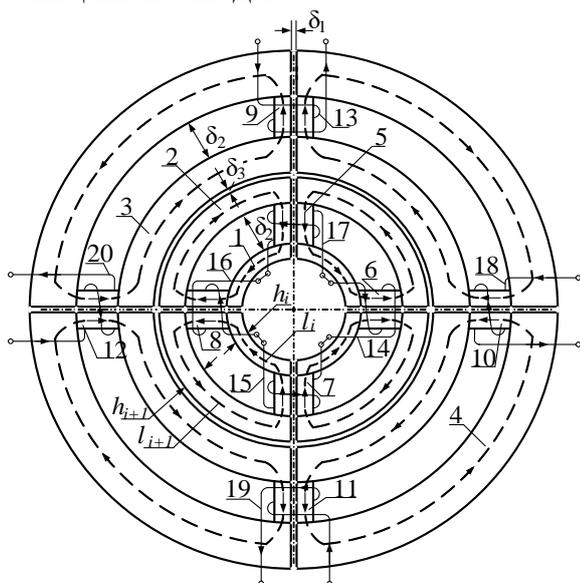
Техник ижодиётнинг такомиллаштирилган усуллари ва МКМЭЎларни турли физик табиатга эга занжирлар орасидаги топограмма боғлиқлиги кўринишида қуришнинг умумий тамойиллари ёрдамида сиқувчи ва чўзувчи кучлар, бурчак силжишлари, тезлик, тезланиш ва вибрация параметрларини ўлжашга мўлжалланган МЭЎларнинг янги конструкциялари, шунингдек, ушбу МЭЎлар учун ўзгармас ва ўзгарувчан кучланиш манбаларининг янги схемалари ишлаб чиқилди.

Сиқувчи куч МЭЎда (1- расм) ҳалқали магнит ўтказгичларнинг битта горизонтал текисликда жойлашганлиги, ўзак ўқи бўйлаб жойлашган ва ўзак

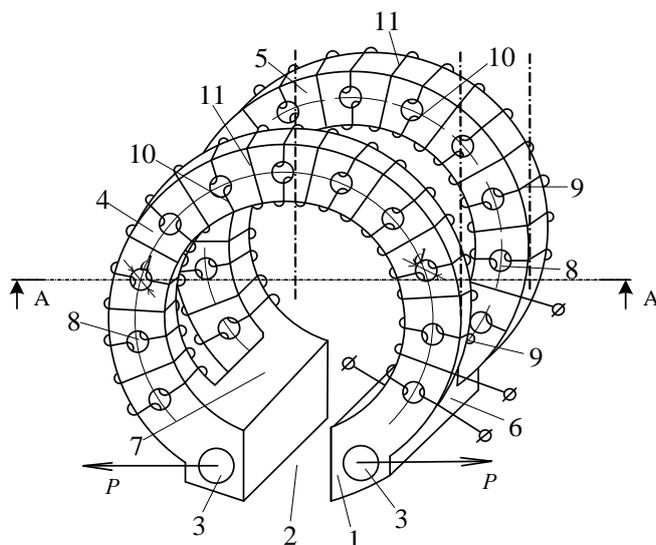
ҳамда магнит ўтказгичларни алоҳида ҳалқали секторларга ажратиб турадиган икки томони очик радиал ёриқлар билан таъминланганлиги, чулғам секцияларининг кетма-кет-мос ҳолда уланганлиги, магнит ўтказгичдаги ҳар бир ҳалқали секторнинг ички ва ташқи деворлари қалинлиги нисбатининг  $(h_{i+1})/(h_i) = (l_{i+1})/(l_i)$  шарти асосида (бу ерда  $h_i$ ,  $h_{i+1}$ ,  $l_i$ ,  $l_{i+1}$  – магнит ўтказгичнинг мос ҳалқали секторлари қалинлиги ва ўртача узунлиги) бажарилганлиги туфайли янги МЭЎ нинг унинг прототиپига нисбатан габарит ўлчами кичраяди ва конструктив ясалиши соддалашади, ҳалқали магнит ўтказгичларни мос секторларга ажратиш натижасида эса маҳаллий кучларни алоҳида ўлчаш имконияти пайдо бўлиб, натижада МЭЎ функционал имкониятлари кенгаяди.

Чўзувчи куч МЭЎ да (2- расм) туташтирилмаган ҳалқалар ковакли қилиб бажарилганлиги ва ушбу ҳалқалар магнитловчи магнит оқимлар йўлида ҳалқалар ички ва ташқи участкаларининг магнит қаршиликлари тенглиги шартидан келиб чиқиб, ҳалқаларнинг ушбу участкалари кесимларининг геометрик ўлчамларини уларнинг ўртача чизиқларига нисбатан танланганлиги туфайли нол сигнал ва турли омиллар таъсирида магнит ўтказгич материалининг магнит хоссалари ўзгаришидан юзага келадиган ҳалақит

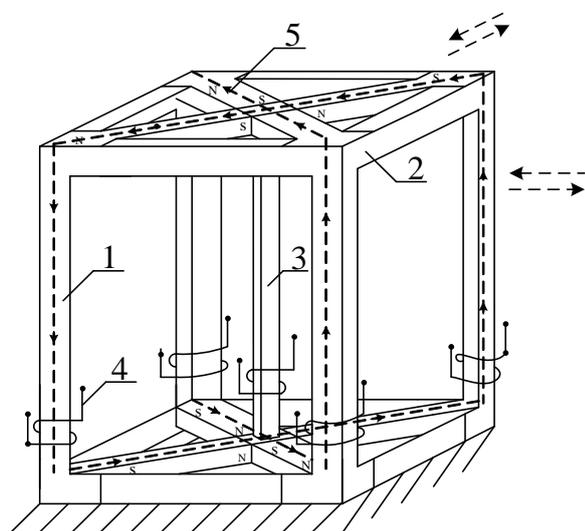
сигналлари истисно этилиб, натижада ўзгартиргичнинг прототипга нисбатан аниқлиги ошади.



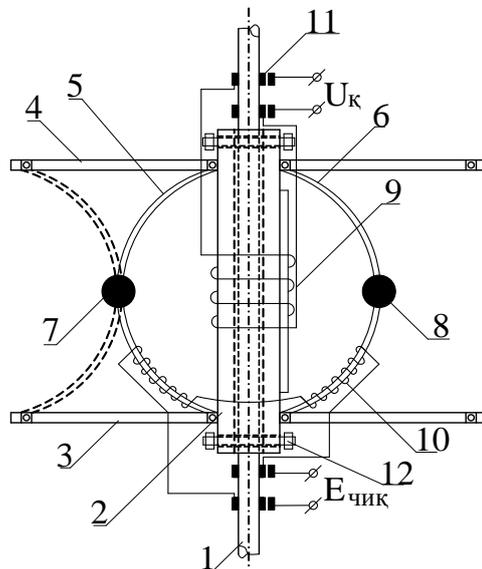
**1-расм. Сиқувчи куч МЭЎ нинг конструктив схемаси:** 1-4 – ҳалқали магнит ўтказгичлар; 5-12 – туташтиргич; 13-20 – чулғам секциялари;  $h_i, h_{i+1}, l_i, l_{i+1}$  – ҳалқали секторларнинг қалинлиги ва ўртача узунлиги;  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – ишчи бўлмаган ва ишчи тирқишлар



**2-расм. Чўзувчи кучлар МЭЎларининг конструктив схемаси:** 1 – магнит ўтказгич; 2 – тирқиш; 3 – тешиklar; 4 ва 5 – тўғри бурчакли кесимдаги туташтирилмаган ҳалқалар; 6,7 – туташтиргичлар; 8 – тирқишлар; 9,10 – ўлчаш чулғамлари; 11 – кўзгатиш чулғамлари;  $P$  – берилаётган куч;  $d$  – тешик диаметри.



**3-расм. Вибрация параметрларини ўлчашга мўлжалланган МЭЎ нинг конструктив схемаси:** 1 – асосий магнит эластик ўзақлар; 2 – номагнит ўзақлар; 3 – кўшимча ўзак; 4 – ўлчаш чулғамлари; 5 – доимий магнитлар;  $\leftarrow \text{---} \rightarrow$  – вибрация йўналиши



**4-расм. Айлиниш параметрларини ўлчашга мўлжалланган МЭЎ нинг конструктив схемаси:** 1 – вал; 2 – туташтиргич; 3,4 – стерженлар; 5,6 – ярим ҳалқалар; 7,8 – инерцион элементлар; 9,10 – кўзгатиш ва ўлчаш чулғамлари; 11 – контактлар; 12 – болтлар;  $U_k, E_{чик}$  – кўзгатиш кучланиши ва чиқиш ЭЮК

Вибрация параметрларини ўлчашга мўлжалланган МЭЎ да (3- расм) асосий ўзаклар тўрт бурчакли тўғри текис призма қирралари кўринишида жойлашганлиги, призма асосининг қирралари номагнит материалдан тайёрланган металл ўзаклар кўринишида бажарилганлиги, кўшимча ўзак призма асосларининг марказларини туташтирганлиги, иккитадан доимий магнитлар призма асосининг ҳар бир диагоналида мос жойлаштирилганлиги, вибрацияланадиган ўққа нисбатан перпендикуляр текисликда ётган, иккита асосий ўзакда жойлаштирилган иккита ёндош асосий ўлчаш чулғамлари ўзаро кетма-кет-мос уланганлиги, ушбу чулғамларнинг жуфтлари эса кетма-кет-қарама-қарши уланганлиги ва бунда кўшимча ўзакнинг туташтирилган учда кўшимча ҳалқали ўлчаш чулғами жойлаштирилганлиги туфайли иккита ўзаро перпендикуляр ўқлар бўйлаб вибрация параметрларини ўлчашни таъминлашга, иккита алоҳида мустақил ўлчаш чулғамидан чиқиш сигналларини олиш натижасида ўзгартиргичнинг функционал имкониятлари кенгайтиришига ва унинг сезгирлиги ошишига эришилган.

Айланиш параметрларини ўлчашга мўлжалланган МЭЎ да (4- расм) магнит ўтказгич туташтиргичининг ковакли қилиб бажарилганлиги ва унинг эркин ўрнатилганлиги ҳамда уни буриш имкониятининг мавжудлиги туфайли валда объектнинг дастлабки вертикал ҳолатидан исталган йўналишда бурчак силжишларини (эгилишларини) ўлчаш имкони пайдо бўлишига, ярим ўқ туташтиргичидан инерция элементларигача бўлган ораликни сақлаган ҳолда ҳалқаларнинг коаксиал жойлашуви натижасида ўзгартиргич ёрдамида назорат қилинаётган валнинг бурчак тезлиги ва бурчак тезлашишини ўлчаш имконияти пайдо бўлишига эришилган.

Ўзгармас кучланиш манбаи қурилмаси учта ўзагининг ҳар биридаги олтига иккиламчи чулғам магнит оқими ўзгармас бўлиб қоладиган феррорезонанс контурлари каби магнит ўтказгич ўзакларида жойлашганлиги туфайли фазаларнинг чиқиш кучланишларини барқарорлаштириш сифати яхшиланади, ўзакларнинг тўлиқ тизими эса сунъий 18-фазали тўғрилаш тизимига эга бўлиш имконини бериб, исталган вақт momentiда тўғриланган ток фақат битта диод бўйлаб оқиши боис тўғрилаш диодларидаги кучланиш йўқотишларини камайтириш ҳисобига тўғриланган барқарор кучланиш сифатини яхшилади.

Ўзгарувчан кучланиш манбаида МЭЎ нинг кўзғатиш занжирлари уланадиган иккиламчи чулғамлар магнит оқими ўзгармас бўлиб қоладиган феррорезонанс контурлари каби магнит ўтказгич ўзакларида жойлашганлиги туфайли фазаларнинг чиқиш кучланишларини барқарорлаштириш сифати яхшиланади, қурилманинг бирламчи занжири нол симга эга юлдузча схемаси ва учта чиқиш чулғамининг учбурчак схемаси бўйича уланиши юкланиш токидан учга каррали гармоникаларни истисно этиш имконини бериб, барқарорлаштирилган уч фазали кучланишда юқори гармоникалар даражасини камайтиришга хизмат қилади.

Диссертациянинг “**Механик катталиклар ўзгартиргичларида магнит эластик ўзгартиришни тадқиқ этиш**” номли учинчи бобида магнит эластик ўзгартириш, механик куч таъсирини ҳисобга олган ҳолда МЭЎларнинг сезгир элементи(СЭ) гистерезис магнит тавсифларининг математик моделлари ишлаб

чиқилган, шунингдек МКМЭЎларда магнит эластик ўзгартиришларнинг ўзига хос хусусиятлари тадқиқ этилган.

Исрофларсиз магнит эластик участканинг нисбий магнит ўтказувчанлигини  $\mu_{и.}$  ва магнит занжирнинг магнит эластик ва номагнит эластик магнит индукциялари ҳамда майдоннинг кучланганлик қийматлари асосида аниқлаш имконини берадиган қуйидаги аналитик тенглама ҳосил қилинди:

$$\mu_{и.} = \zeta_0 \{ (\mu_0 H) [ (\zeta_0 + 1) (B_{1m \text{ ўр.}0} / B_{1m \text{ ўр.}\sigma}) - 1 ] \}^{-1} B_{1m \text{ ўр.}0}, \quad (1)$$

бу ерда  $\zeta_0 = W_{\mu_{мэ}} / W_{\mu_{нмэ}}$ ;  $W_{\mu_{мэ}}$ ,  $W_{\mu_{нмэ}}$ ,  $B_{1m \text{ ўр.}0}$  – МЭЎнинг юкланмаган ҳолатида магнит эластик ва номагнит эластик участкаларининг магнит қаттиқлиги ва магнит индукцияси ўртача қиймати;  $B_{1m \text{ ўр.}\sigma}$ , – механик кучланиш остидаги МЭЎнинг магнит эластик участкаси магнит индукциясининг ўртача қиймати.

МЭЎ магнит тавсифининг чизиқли участкасида ишлаганда, магнит эластик участканинг нисбий магнит ўтказувчанлиги фақатгина битта параметр – механик кучлар функцияси эканлиги аниқланган. Бу ҳолат  $\mu_{и.} = f(U_M)$  боғлиқликларни  $\mu_{и.} = a_1 \pm a_2 U_M$ , (2) чизиқли функция кўринишида аппроксимациялаш имконини берган, бу ерда  $a_1, [-]$  ва  $a_2, [N^{-1}]$  – аппроксимация коэффициентлари;  $U_M$  – механик куч.

МКМЭЎлар СЭ га таъсир этувчи механик кучлар таъсирини ҳисобга олган ҳолда уларда қўлланиладиган магнит эластик материаллар гистерезис ҳалқаларининг қуйидаги математик моделлари ифодалари (аппроксимацияловчи функциялар) олинди:

$$J_{100}^* = \frac{th(M \mp M_c)}{1 + 2e^{-\tau} sch(M \mp M_c)} \pm 0,5 \Delta J_{100}^*, \quad (3)$$

$$J_{110}^* = \frac{(\sqrt{2})^{-1} th [ (\sqrt{2})^{-1} (M \mp M_c) ]}{1 + 2e^{-0,5\tau} sch [ (\sqrt{2})^{-1} M_{и\check{ч}} ]} \pm 0,5 \Delta J_{100}^*, \quad (4)$$

$$J_{111}^* = (\sqrt{3})^{-1} th [ (\sqrt{3})^{-1} (M \mp M_c) ] \pm 0,5 \Delta J_{100}^*, \quad (5)$$

$$\Delta J_{100}^* = \left[ \frac{th(M_{max} + M_c)}{1 + 2e^{-\tau} sch(M_{max} + M_c)} - \frac{th(M_{max} - M_c)}{1 + 2e^{-\tau} sch(M_{max} - M_c)} \right], \quad (6)$$

$$j^* = \xi \cdot J_{100}^* + \varsigma \cdot J_{110}^* + \varrho \cdot J_{111}^*, \quad (7)$$

бу ерда  $j^* = j/j_s, [-]$  – мос ҳолда магнитланганлик ва тўйиниш магнитланганлиги;  $J_{100}^*$ ,  $J_{110}^*$  ва  $J_{111}^*$  – асосий кристаллографик ўқлар  $[100]$ ,  $[110]$  ва  $[111]$  бўйича магнитланганликнинг нисбий қийматлари;  $M_c = (3\chi_0 H_c) / j_s, [T]$ ;  $H_c, [A \cdot m^{-1}]$  – коэрцитив куч;  $\chi_0 = dM/dH, [T \cdot A^{-1} \cdot m]$  –  $H = H_c$  бўлганда дифференциал магнит таъсирчанлик;  $H, H_{max}$  – МКМЭЎ кўзгатиш чулғамининг магнит майдони кучланганлиги ва унинг максимал қиймати;  $M_{и\check{ч}} = (3\chi_0 H_{вн}) / j_s$ ;  $H_{и\check{ч}} = H \mp H_c$ ;  $H_{и\check{ч}}$  – ички магнит майдон кучланганлиги;  $M_{max} = (3\chi_0 H_{max}) / j_s$ ;  $\tau = (9\chi_0 \lambda_{100} S U_M) / (2\mu_0 j_s), [-]$ ;  $\lambda_{100}, [-]$  – нисбий магнит стрикцион узайтириш;  $S, [m^2]$  – СЭ майдони бўлиб, унда механик куч

таъсир этади  $U_M$ ;  $\xi$ ,  $\zeta$  ва  $\rho$  – магнитланганлик таркибий қисмлари улушини баҳолайдиган коэффициентлар, бунда  $\xi + \zeta + \rho = 1$ .

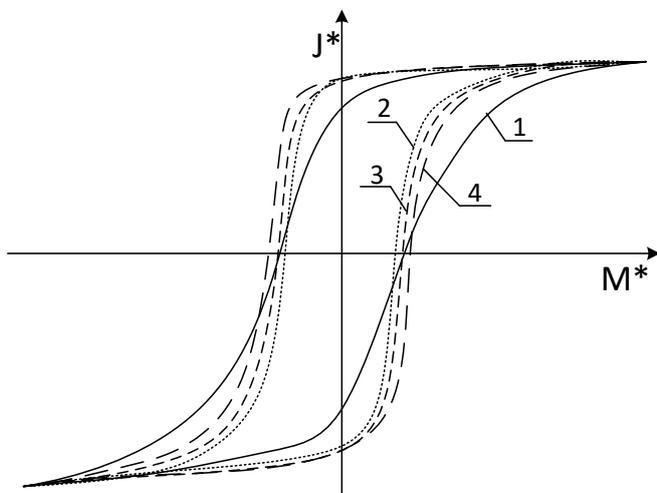
Коэрцитив кучнинг чўзувчи кучларга боғлиқлигига оид қуйидаги аналитик ифода ҳосил қилинди:

$$H_c = [H_{c0} - M(1 - e^{-\eta U_M})](1 + \vartheta U_M), \quad (8)$$

бу ерда  $H_{c0}$  –  $U_M = 0$  бўлганда коэрцитив кучнинг қиймати;  $M, [-]$ ;  $\eta, [N^{-1}]$ ;  $\vartheta, [N^{-1}]$  – қийматлари МЭЎ СЭ материалнинг структура хусусиятлари билан аниқланадиган коэффициентлар.

Пермендюр қотишмаси 50КФ учун (7) ифодани ҳисобга олган ҳолда (7) ифода бўйича қурилган гистерезис ҳалқалари эгри чизиқларининг таҳлили (5- расм) МЭЎ СЭ га бериладиган механик куч ортиши билан текисликдаги гистерезис ҳалқаси жойлашувининг ўзгаришини, яъни соат милларига қарши томонга бурилишини,  $H_c$  қиймати эса  $U_M$  ортиши билан дастлаб камайишини (2-ҳалқа), кейин эса ортишини (3 ва 4-ҳалқалар) кўрсатди. Куч таъсири остида гистерезис ҳалқаси шаклининг ўзгариши билан магнитланиш асосий эгри чизиғининг шакли ҳам ўзгаради. Шу боис магнит эластик материаллар асосий магнитланиш эгри чизиқларини аппроксимациялашда ушбу ўзгаришни ўртача магнитланиш эгриси сифатида инобатга олиш тавсия этилади.

Ўтказилган экспериментал тадқиқотлар (6-расм) натижасида қуйидагилар аниқланди: 1) МЭЎ ўлчаш кучланиши ( $U_{изм.}$ ) нинг берилаётган куч ( $U_M$ )га

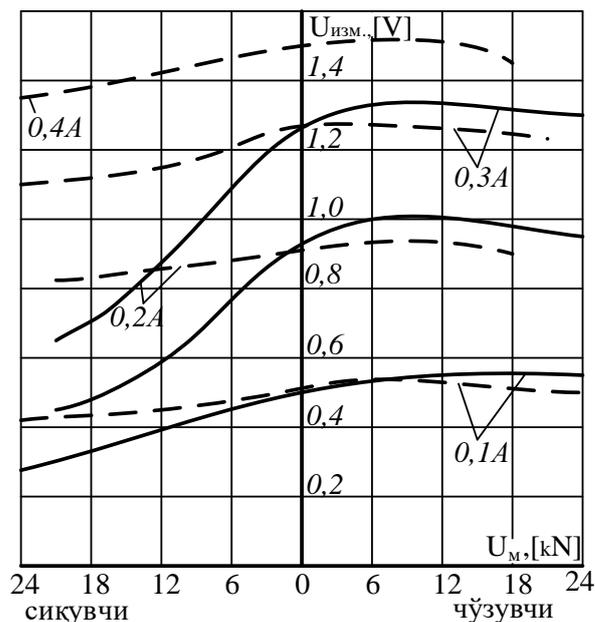


5-расм. Чўзувчи куч  $U_M$  остида гистерезис

ҳалқаси шаклининг ўзгариши:

1)  $U_M = 0$ ; 2) 50 N; 3) 100 N;

4) 200 N;  $M^* = \frac{M}{M_{max}}$



6-расм. Бўйлама (узлуксиз эгри чизиқлар) ва қўндаланг (пунктир эгри чизиқлар) МЭЎларда МКМЭЎ ларнинг магнит тизимлари ўлчов кучланиши ( $U_{ўл.}$ )нинг механик кучланиш ( $U_M$ ) га боғлиқлиги

боғлиқлик эгри чизиқлари чўзилишда максимумга эга, бунда сиқилиш сезгирлиги ( $S_c = [\Delta U_{ўл.с.} / \Delta U_{M.с.}]|_{U_M \rightarrow 0}$ ) чўзилиш сезгирлигидан ( $S_{ч.} = [\Delta U_{ўл.ч.} / \Delta U_{M.ч.}]|_{U_M \rightarrow 0}$ ) каттароқ бўлади, бу ерда  $\Delta U_{ўл.с.}$ ,  $\Delta U_{ўл.ч.}$ ,  $\Delta U_{M.с.}$  ва

$\Delta U_{\text{м.ч.}} - U_{\text{м}} = 0$  нуктаси олдида мос равишда сиқилиш (с) ва чўзилиш (ч) кучлари учун аниқланган ўлчаш кучланиши ва юкланишининг орттирмаси; 2) чўзувчи юкланишларда кўзғатиш токининг ортиши билан  $U_{\text{ўл.}} = f(U_{\text{м}})$  функцияси максимумининг кичик юкланишлар томонга силжиши яққол намоён бўлади; 3) кўндаланг магнит эластик ўзгартириш шароитида  $U_{\text{ўл.}} = f(U_{\text{м}})$  функциясининг эгри чизиқлари бўйлама магнит эластик ўзгартиришдаги эгри чизиқларга сифат жиҳатидан ўхшаш бўлади, айнан, сиқилишда нисбий магнит ўтказувчанлик қиймати камаяди, чўзилишда эса кўпаяди; 4) МЭЎ СЭ нинг нисбий магнит ўтказувчанлиги кўндаланг магнит эластик ўзгартиришда бўйлама магнит эластик ўзгартиришга нисбатан анча кичик бўлади.

Диссертациянинг **“Механик катталиклар магнит эластик ўзгартиргичларининг математик моделлари”** номли тўртинчи бобида МКМЭЎ магнит занжирларининг ўзига хос хусусиятлари кўриб чиқилган, узун ўзакларнинг магнит қаршиликлари ва улар орасидаги магнит сиғимнинг тақсимланганлигини ҳисобга олган ҳолда ҳамда чекланган узунликдаги кўзғатиш чулғамларининг тақсимланганлигини ҳисобга олган ва олмаган ҳолда МКМЭЎ ларининг математик моделлари ишлаб чиқилган.

Аксарият МКМЭЎларнинг магнит занжирлари тақсимланган параметрларга эга занжирлар қаторига кириши аниқланди, уларга узун ферромагнит ўзаклар магнит қаршиликлари ( $Z_{\mu\text{п}}$ ), ушбу ўзаклар орасидаги тирқишларнинг магнит сиғимлари ( $C_{\mu\text{п}}$ ), магнит занжирнинг узунлик (бурчак) бирлигига тўғри келадиган бўйлама ( $f_{Z_{\mu}}$ ) ва (ёки) кўндаланг ( $f_{C_{\mu}}$ ) магнитловчи кучларининг погон (солиштирма) қийматлари каби параметрлар хос. Шунингдек, амалиётда  $Z_{\mu\text{п}}$ ,  $C_{\mu\text{п}}$  ва  $f_{Z_{\mu}}$  ёки  $Z_{\mu\text{п}}$ ,  $C_{\mu\text{п}}$  ва  $f_{C_{\mu}}$  каби параметрларга эга МКМЭЎлар кўпроқ учраб туриши ҳам аниқланди.

МКМЭЎларнинг магнит занжирларини таҳлил қилишда ушбу магнит занжирлар учун рухсат этилган қуйидаги чекловлар қабул қилинди: 1) магнит эластик материал тавсифларининг ночизиқлиги эътиборга олинмайди, яъни магнит занжир чизиқли, деб қабул қилинади; 2) магнит ўтказгичларнинг учлари ва ён қирраларидаги сочилган магнит оқимлари эътиборга олинмайди; 3) ферромагнит ўзаклар, хусусан коаксиал ёки ўқдош (бир ўқда) жойлашган магнит эластик магнит ўтказгичлар орасидаги ҳаво тирқишида магнит майдон ясси параллел деб қабул қилинган; 4) кўриб чиқиладиган координата бўйича занжирнинг  $Z_{\mu\text{п}}$ ,  $C_{\mu\text{п}}$ ,  $f_{Z_{\mu}}$  ва  $f_{C_{\mu}}$  параметрлари погон қийматлари ўзгармас; 5) ферромагнит ўзаклар ва кўзғатиш чулғамлари, жумладан ўқдош жойлашган ҳалқали магнит ўтказгичлар ўзаро бир хил. МКМЭЎ магнит занжирларини тадқиқ этишда тарқоқ параметрларга эга занжирларни ҳисоблашнинг энг қулай ва аниқ усули сифатида дифференциал тенгламаларни тузиш ва ечишнинг классик усулидан фойдаланилган.

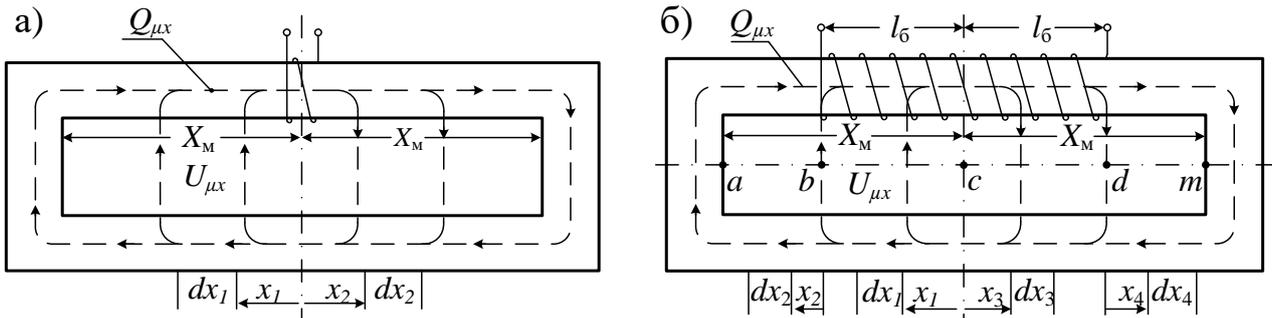
Узун ферромагнит ўзакларнинг тақсимланган магнит қаршиликлари, улар орасидаги оралиқнинг магнит сиғими ҳамда битта узун ўзак ёки иккала узун ўзак ўртасида жойлашган йиғиқ бўйлама кўзғатиш чулғамига эга МКМЭЎ магнит занжирларининг магнит кучланиши ( $U_{\mu\text{х}}$ ) ва магнит оқими ( $Q_{\mu\text{х}}$ ) учун

дифференциал тенгламалар тузилган ва ечимлари тақдим этилган ҳамда куйидаги ифодалар олинган (7- расм, а):

$$\dot{U}_{\mu x_1^*} = \frac{\dot{F}_K}{2\Delta_1^*} \left[ sh \left[ \underline{\beta}(1 - x_1^*) \right] + \underline{\beta} \underline{k}_1 ch \left[ \underline{\beta}(1 - x_1^*) \right] \right], \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{\mu x_1^*} = \frac{\underline{\beta} \dot{F}_K}{2\underline{Z}_{\mu\Pi} X_M \Delta_1^*} \left[ ch \left[ \underline{\beta}(1 - x_1^*) \right] + \underline{\beta} \underline{k}_1 sh \left[ \underline{\beta}(1 - x_1^*) \right] \right], \quad (10)$$

бу ерда  $\dot{F}_K$  – кўзғатиш чулғамининг магнит юритувчи кучи (МЮК), [А];  $\Delta_1^* = sh \underline{\beta} + \underline{\beta} \underline{k}_1 ch \underline{\beta}$ , [-];  $\underline{\beta} = \underline{\gamma} X_M$ , [-];  $k_1 = \underline{Z}_{\mu T} / (2\underline{Z}_{\mu\Pi} X_M)$ , [-];  $\underline{\gamma} = \sqrt{2\underline{Z}_{\mu\Pi} C_{\mu\Pi}}$ , [ $m^{-1}$ ] – магнит занжирда магнит майдоннинг мос ҳолда сўниш ва тарқалиш коэффициентлари;  $\underline{Z}_{\mu\Pi}$ , [Н] – магнит ўтказгич чет қисмининг магнит қаршилиги;  $\underline{Z}_{\mu T}$ , [ $H^{-1} \cdot m^{-1}$ ];  $C_{\mu\Pi}$ , [ $H \cdot m^{-1}$ ] – магнит занжир узунлигининг бирлигига тўғри келадиган узун ферромагнит ўзакларнинг магнит қаршиликлари ва улар орасидаги тирқиш магнит сифимининг погон қийматлари;  $x_1^* = x_1 / X_M$ ;  $x_2^* = x_2 / X_M$  – нисбий бирликлардаги координаталар;  $X_M$ , [m] – ўзакларнинг ярим узунлиги. Координата индексларидаги 1(2) белгиси мос ҳолдаги ифоданинг  $x_1^*$  ва  $x_2^*$  координаталарига эга участкалар учун тўғри келишини аниқлатади.



**7-расм. Йиғиқ (а) ва тақсимланган (б) бўйлама кўзғатиш чулғамига эга МКМЭЎ магнит занжирларининг конструктив схемалари:**  $Q_{\mu x}$ ,  $U_{\mu x}$  – ўзаклардаги магнит оқими ва улар орасидаги магнит кучланиш;  $x_1 \div x_4$  и  $X_M$  – ўзакларнинг координаталари ва ярим узунлиги;  $l_6$  – тақсимланган чулғамнинг ярим узунлиги;  $a, b, c, d$  – магнит занжирларнинг мос участкалари чегараларини аниқловчи нукталар

(9) ва (10) ифодаларни ҳосил қилишда куйидаги тенгламалар чегаравий шартлар сифатида хизмат қилган: 1)  $\dot{Q}_{\mu x_1=0} = \dot{Q}_{\mu x_2=0}$ ; 2)  $\dot{U}_{\mu x_1=0} + \dot{U}_{\mu x_2=0} = \dot{F}_B$ ; 3)  $\dot{U}_{\mu x_1=X_M} = \underline{Z}_{\mu T} \dot{Q}_{\mu x_1=X_M}$ ; 4)  $\dot{U}_{\mu x_2=X_M} = \underline{Z}_{\mu T} \dot{Q}_{\mu x_2=X_M}$ .

(9) ва (10) ифодалар таҳлили шуни кўрсатдики,  $\underline{Z}_{\mu\Pi}$ ,  $C_{\mu\Pi}$  каби тақсимланган параметрларга ва узун ўзаклар ўртасида жойлашган йиғиқ кўзғатиш чулғамига эга МКМЭЎларнинг магнит занжирларидаги магнит кучланиш ва магнит оқими магнит ўтказгичнинг кўзғатиш чулғами ўрнатилган кесимида максимал қийматга эга ва улар чет қисмлари томонга камайиб боради, бунда магнит оқимининг камайиш тезлиги магнит кучланишнинг камайиш тезлигига нисбатан анча кичик бўлади.

$\underline{Z}_{\mu\Pi}$ ,  $C_{\mu\Pi}$ , ва  $f_{Z_{\mu}}$  каби тақсимланган параметрларга эга МКМЭЎларнинг магнит занжирларини (7- расм, б) таҳлил қилиш методикаси тақлиф этилиб,

унинг моҳияти қуйидагилардан иборат: тақсимланган параметрларга эга магнит занжири ўзига хос участкаларга ажратилади, магнит занжирининг ҳар бир участкаси учун дифференциал тенгламалар тузилади ва улар чегаравий шартларни ҳисобга олган ҳолда ечилади. Таклиф этилган таҳлил методикасининг ўзига хос жиҳати шундаки, магнит занжирини участкаларга ажратиш ва улар чегарасида тенгламалар тузиш занжирининг магнит нейтралдаги магнит кучланиш ёки магнит оқимининг қиймати нолга тенг бўлишига асосланади.

Юқорида баён этилган таҳлил методикаси ёрдамида  $Z_{\mu\pi}$ ,  $C_{\mu\pi}$  ва  $f_{Z_\mu}$  каби тақсимланган параметрларга эга МКМЭЎ магнит занжирларининг магнит кучланиши ва магнит оқими учун қуйидаги ифодалар ҳосил қилинди:

$$\dot{U}_{\mu x_{1(3)}^*} = \frac{X_M \dot{f}_{Z_\mu}}{\underline{\beta} \underline{\Delta}_1^*} \left\{ \text{sh} \left[ \underline{\beta} (1 - l_6^*) \right] + \underline{\beta} \underline{k}_1 \text{ch} \left[ \underline{\beta} (1 - l_6^*) \right] \right\} \text{sh} \left( \underline{\beta} x_1^* \right), \quad (11)$$

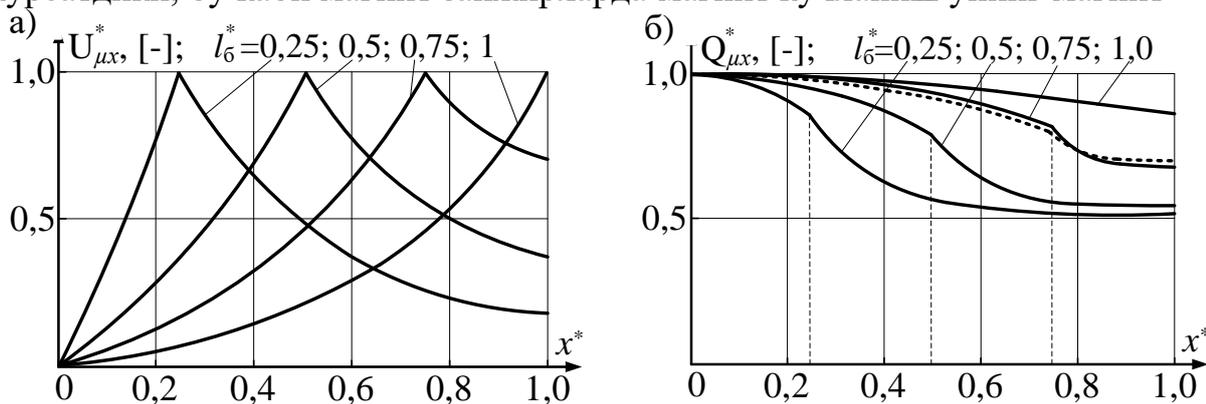
$$\dot{Q}_{\mu x_{1(3)}^*} = - \frac{X_M \dot{f}_{Z_\mu}}{2 \underline{Z}_\mu \underline{\Delta}_1^*} \left\{ \text{sh} \left[ \underline{\beta} (1 - l_6^*) \right] + \underline{\beta} \underline{k}_1 \text{ch} \left[ \underline{\beta} (1 - l_6^*) \right] \right\} \text{ch} \left( \underline{\beta} x_1^* \right) - \underline{\Delta}_1^*, \quad (12)$$

$$\dot{U}_{\mu x_{2(4)}^*} = \frac{X_M \dot{f}_{Z_\mu} \text{sh}(\underline{\beta} l_6^*)}{\underline{\beta} \underline{\Delta}_1^*} \left\{ \text{sh} \left[ \underline{\beta} (1 - l_6^* - x_2^*) \right] + \underline{\beta} \underline{k}_1 \text{ch} \left[ \underline{\beta} (1 - l_6^* - x_2^*) \right] \right\}, \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{\mu x_{2(4)}^*} = \frac{X_M \dot{f}_{Z_\mu} \text{sh}(\underline{\beta} l_6^*)}{2 \underline{Z}_\mu \underline{\Delta}_1^*} \left\{ \text{ch} \left[ \underline{\beta} (1 - l_6^* - x_2^*) \right] + \underline{\beta} \underline{k}_1 \text{sh} \left[ \underline{\beta} (1 - l_6^* - x_2^*) \right] \right\}, \quad (14)$$

бу ерда  $l_6^* = l_6 / X_M$ ;  $x_{1(3)}^* = x_{1(3)} / X_M$ ;  $0 \leq x_{1(3)}^* \leq l_6^*$ ;  $x_{2(4)}^* = x_{2(4)} / X_M$ ;  $0 \leq x_{2(4)}^* \leq (1 - l_6^*)$ ;  $l_6$  – тақсимланган чулғамнинг ярим узунлиги;  $\underline{Z}_\mu = \underline{Z}_{\mu\pi} X_M$ ,  $[H^{-1}]$ .  $x_1^* = -x_3^*$  и  $x_2^* = -x_4^*$  ни ҳисобга олганда,  $\dot{U}_{\mu x_1^*} = -\dot{U}_{\mu x_3^*}$  ва  $\dot{U}_{\mu x_2^*} = -\dot{U}_{\mu x_4^*}$  бўлади.

(11)-(14) ифодалар ва улар эгри чизиқларининг таҳлили (8-расм) шуни кўрсатдики, бу каби магнит занжирларда магнит кучланиш унинг магнит



**8-расм. Тақсимланган чулғамнинг  $l_6^*$  турли узунликларида  $Z_{\mu\pi}$ ,  $C_{\mu\pi}$ ,  $f_{Z_\mu}$  каби тақсимланган параметрларга эга МКМЭЎ магнит занжирининг битта ярми учун  $U_{\mu x^*} = f(x^*)$  (а) ва  $Q_{\mu x^*} = f(x^*)$  (б) функцияси графиклари**

нейтрал кесимида нолга тенг бўлиб, занжирнинг тақсимланган чулғам чегарасигача томон ортади, магнит оқим эса камаяди, тақсимланган қўзғатиш

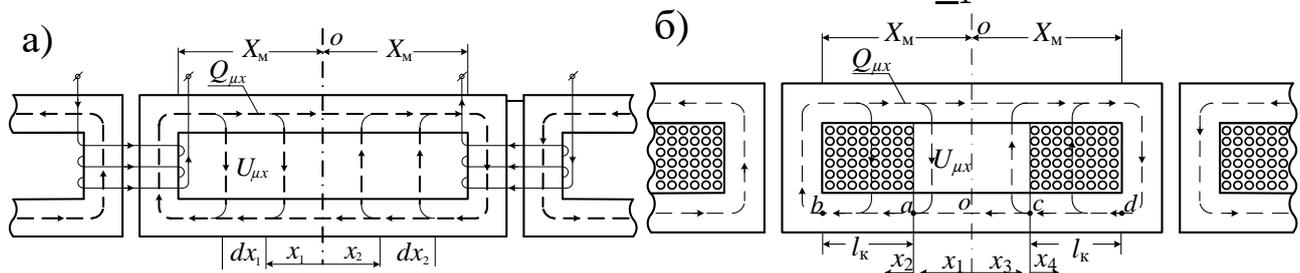
чулғами узунлигининг ортиши билан магнит кучланишнинг максимал қиймати магнит нейтралдан магнит занжирнинг четки қисмига силжийди.

Назарий ва экспериментал натижалар ўртасидаги фарқ  $8 \div 11$  %ни ташкил этиши, қўзғатиш чулғамларининг тақсимланганлигини ҳисобга олиш эса ҳисоб-китоблардаги хатоликни  $3 \div 5$  %га камайтириши аниқланди.

Мазкур ишда кўндаланг йиғиқ секцияли қўзғатиш чулғамларига эга МКМЭЎ магнит занжирлари тадқиқ этилган (9, а-расм),  $x_1^* = -x^*$  ва  $x_2^* = x^*$  ни ҳисобга олган ҳолда қўзғатиш чулғами секцияларининг ўзаро кетма-кет-мос (к-м) ва кетма-кет-қарама-қарши (к-к) уланишида магнит кучланиш ва магнит оқимнинг қуйидаги ифодалари ҳосил қилинди:

$$\dot{U}_{\mu x^* (\text{п-с})} = \frac{2\dot{F}_B Z_\mu}{\Delta_1} sh(\beta x^*), \quad (15)$$

$$\dot{Q}_{\mu x^* (\text{п-с})} = \frac{\beta \dot{F}_B}{\Delta_1} ch(\beta x^*), \quad (16)$$



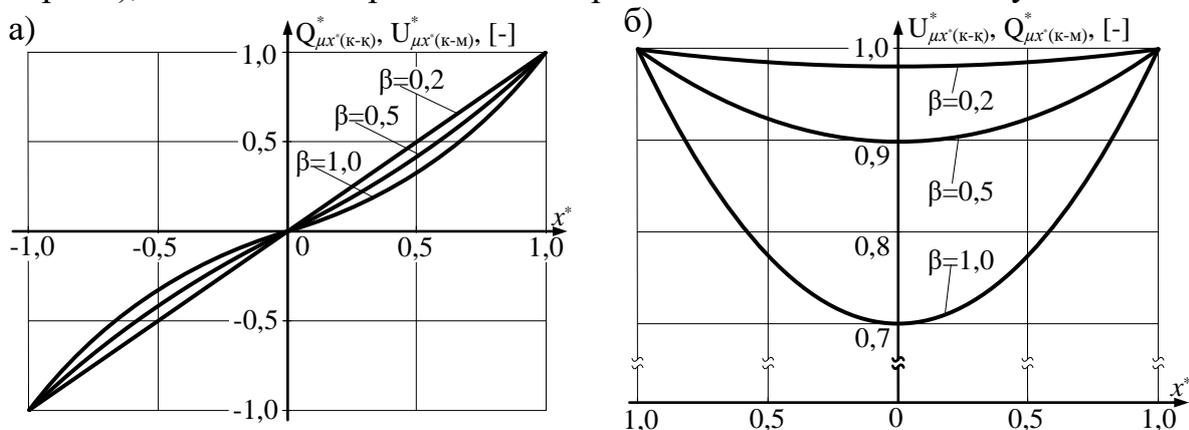
9-расм. Йиғиқ (а) ва тақсимланган (б) кўндаланг қўзғатиш чулғамига эга МКМЭЎ магнит занжирларининг конструктив схемалари:  $l_k^* = l_k/X_M$ ;  $l_k$  – кўндаланг тақсимланган чулғам кенглиги

$$\dot{U}_{\mu x^* (\text{п-в})} = \frac{2\dot{F}_B Z_\mu}{\Delta_2} ch(\beta x^*), \quad (17)$$

$$\dot{Q}_{\mu x^* (\text{п-в})} = \frac{\beta \dot{F}_B}{\Delta_2} sh(\beta x^*), \quad (18)$$

бу ерда  $\Delta_1 = 2Z_\mu sh\beta + \beta Z_{\mu T} ch\beta$ ,  $[\text{H}^{-1}]$ ;  $\Delta_2 = 2Z_\mu ch\beta + \beta Z_{\mu T} sh\beta$ ,  $[\text{H}^{-1}]$ .

$Z_{\mu \text{п}}$ ,  $C_{\mu \text{п}}$  каби тақсимланган параметрларга ва узун ўзақлар чет қисмларидаги туташтиргичларида йиғиқ ҳолда жойлашган қўзғатиш чулғамининг кетма-кет-мос (кетма-кет-қарама-қарши) уланган секцияларга эга МКМЭЎ магнит занжиридаги магнит кучланиш ва магнит оқим учун ҳосил қилинган (15)-(18) ифодалар ва улар эгри чизиклари таҳлили шуни кўрсатдики (10- расм), магнит занжир магнит нейтрал кесимидаги магнит кучланиш



10-расм.  $\beta$  нинг турли қийматларида қўзғатиш чулғамининг кетма-кет-мос (к-м) ва кетма-кет-қарама-қарши (к-к) уланган секциялари учун  $U_{\mu x^*} = f(x^*)$  (а) ва

$Q_{\mu x^*} = f(x^*)$  (б) функциялари графиклари

(магнит оқими) нолга тенг бўлиб, улар магнит ўтказгичнинг четларида максимал қийматга эга ҳамда магнит занжири узунлиги бўйлаб ночизик тақсимланган ва магнит занжиридаги магнит майдон сўниш коэффициенти  $\beta$  қийматининг ортиши билан ушбу ночизикликнинг даражаси ортади.

$Z_{\mu\pi}$ ,  $C_{\mu\pi}$  ва  $f_{C\mu}$  тақсимланган параметрларга эга магнит занжирларнинг кучланиши ва оқими учун қуйидаги ифодалар ҳосил қилинди (9-расм, б):

$$\dot{U}_{\mu x_{1(3)}^*} = \frac{\left[ \underline{\beta} \dot{F}_B - \dot{f}_{C\mu} X_M \text{sh}(\underline{\beta} l_K^*) \right] + \underline{\beta} \dot{f}_{C\mu} X_M k_1 \left[ 1 - \text{ch}(\underline{\beta} l_K^*) \right]}{\underline{\beta} \underline{\Delta}_1^*} \text{sh}(\underline{\beta} x_{1(3)}^*), \quad (19)$$

$$\dot{Q}_{\mu x_{1(3)}^*} = \frac{\left[ \underline{\beta} \dot{F}_B - \dot{f}_{C\mu} X_M \text{sh}(\underline{\beta} l_K^*) \right] + \underline{\beta} \dot{f}_{C\mu} X_M k_1 \left[ 1 - \text{ch}(\underline{\beta} l_K^*) \right]}{2 \underline{\Delta}_1^* Z_\mu} \text{ch}(\underline{\beta} x_{1(3)}^*), \quad (20)$$

$$\dot{U}_{\mu x_{2(4)}^*} = \frac{\left( \dot{F}_B + \dot{f}_{C\mu} X_M k_1 \right)}{\underline{\Delta}_1^*} \text{sh} \left[ \underline{\beta} (1 - l_K^* + x_{2(4)}^*) \right] - \frac{\dot{f}_{C\mu} X_M (1 + \underline{\beta} k_1)}{\underline{\beta} \underline{\Delta}_1^*} \text{sh} \left[ \underline{\beta} (1 - l_K^*) \right] \cdot \left\{ \text{sh} \left[ \underline{\beta} (l_K^* - x_{2(4)}^*) \right] + \text{ch} \left[ \underline{\beta} (l_K^* - x_{2(4)}^*) \right] \right\}, \quad (21)$$

$$\dot{Q}_{\mu x_{2(4)}^*} = \frac{\underline{\beta} \left( \dot{F}_B + \dot{f}_{C\mu} X_M k_1 \right)}{2 \underline{\Delta}_1^* Z_\mu} \text{ch} \left[ \underline{\beta} (1 - l_K^* + x_{2(4)}^*) \right] + \frac{\dot{f}_{C\mu} X_M (1 + \underline{\beta} k_1)}{2 \underline{\Delta}_1^* Z_\mu} \text{sh} \left[ \underline{\beta} (1 - l_K^*) \right] \cdot \left\{ \text{sh} \left[ \underline{\beta} (l_K^* - x_{2(4)}^*) \right] + \text{ch} \left[ \underline{\beta} (l_K^* - x_{2(4)}^*) \right] \right\}, \quad (22)$$

бу ерда  $l_K^* = l_K / X_M$ ;  $l_K$  – кўндаланг тақсимланган чулғам кенглиги.

(19)-(22) ифодалар таҳлили шуни кўрсатдики, МКМЭЎларнинг бу каби магнит занжирларида магнит занжир бўйлаб магнит кучланиш ва магнит оқимларининг тақсимланиш қонуни йиғиқ секцияларга эга қўзғатиш чулғамлари занжирларига хос бўлган бундай катталикларнинг тақсимланиш қонунларидан фарқ қилмайди. Кўндаланг қўзғатиш чулғамларининг тақсимланганлигини ҳисобга олиш ҳисоб-китоблардаги хатоликни фақатгина 1,5÷2,0 %га камайтириш имконини бериши аниқланди.

Мазкур диссертация ишида магнит эластик материалларнинг магнит тавсифларига таъсир этувчи механик кучланишларни ҳисобга олган ҳолда МКМЭЎлар ночизик магнит занжирларининг математик моделлари ишлаб чиқилган. Бунда аппроксимацияловчи функция сифатида муҳандислик ҳисоблари учун анча содда ва шу билан бирга етарли даражада аниқ бўлган икки ҳадли даражали полином кўринишидаги функция  $H = pV + qV^3$  (бу ерда  $p, q$  – аппроксимация коэффицентлари) танланган.

МКМЭЎ ночизик магнит занжирларининг умумий математик моделини ифодаловчи қуйидаги дифференциал тенглама ҳосил қилинди:

$$\frac{d^2 \dot{Q}_{\mu x}}{dx^2} - m \dot{Q}_{\mu x} - n \dot{Q}_{\mu x}^3 = -C_{\mu\pi} \left( \dot{f}_{Z\mu} + \dot{f}_{C\mu} \right), \quad (23)$$

бу ерда  $m = 2pC_{\mu\pi} S_\mu^{-1}$ ,  $[m^{-2}]$ ;  $n = 2qC_{\mu\pi} S_\mu^{-3}$ ,  $[Wb^{-2} \cdot m^{-2}]$ ;  $S_\mu$  – магнит ўтказгичнинг узун стерженлари кесими,  $[m^2]$ .

Диссертация иши жараёнида МКМЭЎларнинг тадқиқ этилаётган магнит занжирлари учун итерация усули ёрдамида (23) тенглама ечимлари ҳосил қилинди. Хусусан, бўйлама ва кўндаланг тақсимланган кўзғатиш чулғамларига эга магнит занжирлари учун қуйидаги натижалар олинди:

$$\dot{Q}_{\mu x} = \frac{1}{m} \cdot \frac{\underline{\gamma}^3 \dot{f}_{Z_{\mu}}}{2\underline{Z}_{\mu\pi}\underline{\Delta}_1} ch(\underline{\gamma}x) - \frac{n}{m} \left[ \frac{\underline{\gamma} \dot{f}_{Z_{\mu}}}{2\underline{Z}_{\mu\pi}\underline{\Delta}_1} ch(\underline{\gamma}x) + C_{\mu\pi} \dot{f}_{Z_{\mu}} \right]^3 + \frac{1}{m} C_{\mu\pi} \dot{f}_{Z_{\mu}}. \quad (24)$$

$$\dot{Q}_{\mu x} = \frac{1}{m} \underline{K}_1 ch(\underline{\gamma}x) - \frac{n}{m} \underline{K}_1^3 ch^3(\underline{\gamma}x) + \frac{1}{m} C_{\mu\pi} \dot{f}_{C_{\mu}}, \quad (25)$$

бу ерда  $\underline{K}_1 = \frac{\underline{\gamma}}{2\underline{Z}_{\mu\pi}\underline{\Delta}_1} (2\dot{F}_B \underline{Z}_{\mu\pi} + \dot{f}_{C_{\mu}} \underline{Z}_{\mu\pi})$ , [Wb].

Таъкидлаш жоизки, тўйиниш участкаси унча катта бўлмаган материаллар магнитланиш тавсифларининг ноқизиқлигини ҳисобга олиш ҳисоб-китоблардаги хатоликни 2,5 % гача камайтириш имконини беради.

Вибрация параметрларини ўлчовчи янги МЭЎ учун магнит оқимининг вибрация амплитудаси ва частотасига боғлиқлиги кўринишидаги математик моделларининг қуйидаги ифодалари ҳосил қилинди:

$$Q_{\mu 1(2)} = Q_{\mu 0} + \Delta Q_{\mu 1m} \sin \Omega t, \quad (26) \quad Q_{\mu 3(4)} = Q_{\mu 0} - \Delta Q_{\mu 2m} \sin \Omega t, \quad (27)$$

бу ерда  $Q_{\mu 0} = (2F_B)/W_{\mu 0}$ ;  $W_{\mu 0}$  – вибрация мавжуд бўлмаганда асосий стерженлардаги магнит оқимлар қиймати ва уларнинг магнит қаттиқлиги;  $\Delta Q_{\mu 1m} = [2F_B \Delta W_{\mu 2}(U_M)] / (5W_{\mu 0}^2)$ ,  $\Delta Q_{\mu 2} = [2F_B \Delta W_{\mu 1}(U_M)] / (5W_{\mu 0}^2)$ ;  $\Delta W_{\mu 2}(U_M)$ ,  $\Delta W_{\mu 1}(U_M)$  – мос стерженлардаги магнит оқимларининг амплитуда қийматлари ва уларнинг вибрация таъсири остида механик куч  $U_M$  билан модуляцияланган магнит қаттиқликларининг ўзгариши.

Диссертациянинг **“Механик катталиклар магнит эластик ўзгартиргичлари асосий тавсифларини тадқиқ этиш”** номли бешинчи бобида ишлаб чиқилган МКМЭЎ ларнинг статик, динамик тавсифлари, хатоликлари ва ишончлилиги ўрганилган, шунингдек уларнинг асосий техник тавсифлари келтирилган.

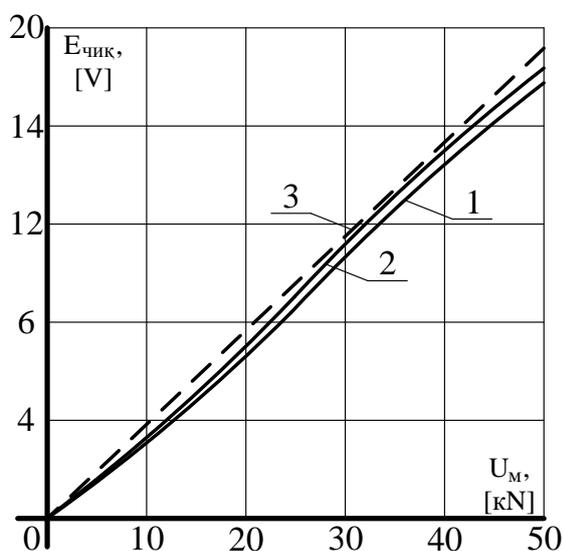
Куч, вибрация тезланишлари, бурчак силжишлари, тезлик ва тезланишни ўлчашга мўлжалланган янги МЭЎларнинг статик тавсифлари ифодалари олинди. Хусусан, бўйлама тарқоқ кўзғатиш чулғамига эга чўзувчи куч МЭЎ нинг статик тавсифи тенгламаси қуйидаги кўринишга эга:

$$\dot{E}_{\text{чиқ}} = j\omega_{\text{э}} W_{\text{чиқ, кол.}} \left\{ \left\{ \frac{X_M \dot{f}_{Z_{\mu}} \Delta_{3\text{ч}}^*(U_M) sh[\underline{\beta}_{\text{ч}}(U_M) l_6^*]}{2\underline{Z}_{\mu\text{ч}}(U_M) \Delta_{1\text{р}}^*(U_M)} - \Delta_{1\text{ч}}^*(U_M) \right\} - \left\{ \frac{X_M \dot{f}_{Z_{\mu}} \Delta_{3\text{с}}^*(U_M) sh[\underline{\beta}_{\text{с}}(U_M) l_6^*]}{2\underline{Z}_{\mu\text{с}}(U_M) \Delta_{1\text{с}}^*(U_M)} - \Delta_{1\text{с}}^*(U_M) \right\} \right\}, \quad (28)$$

бу ерда  $\Delta_{3\text{ч}}^*(U_M) = sh[\underline{\beta}_{\text{ч}}(U_M)(1 - l_6^*)] + \underline{\beta}_{\text{ч}}(U_M) \underline{k}_{1\text{ч}}(U_M) ch[\underline{\beta}_{\text{ч}}(U_M)(1 - l_6^*)]$ ;  $\Delta_{3\text{с}}^*(U_M) = sh[\underline{\beta}_{\text{с}}(U_M)(1 - l_6^*)] + \underline{\beta}_{\text{с}}(U_M) \underline{k}_{1\text{с}}(U_M) ch[\underline{\beta}_{\text{с}}(U_M)(1 - l_6^*)]$ ;

$\beta_{\text{ч}}(U_{\text{м}}) = \gamma_{\text{ч}}(U_{\text{м}})X_{\text{м}}; \beta_{\text{с}}(U_{\text{м}}) = \gamma_{\text{с}}(U_{\text{м}})X_{\text{м}}; \gamma_{\text{ч}}(U_{\text{м}}) = \sqrt{2Z_{\mu\text{чп}}(U_{\text{м}})C_{\mu\text{п}}}; \gamma_{\text{с}}(U_{\text{м}}) = \sqrt{2Z_{\mu\text{сп}}(U_{\text{м}})C_{\mu\text{п}}};$   
 $Z_{\mu\text{чп}}(U_{\text{м}}) = [\mu_{\text{ч.и.}}(U_{\text{м}})\mu_0 S_{\mu}]^{-1}; Z_{\mu\text{сп}}(U_{\text{м}}) = [\mu_{\text{с.и.}}(U_{\text{м}})\mu_0 S_{\mu}]^{-1};$   
 $Z_{\mu\text{ч}}(U_{\text{м}}) = Z_{\mu\text{чп}}(U_{\text{м}})X_{\text{м}}; Z_{\mu\text{с}}(U_{\text{м}}) = Z_{\mu\text{сп}}(U_{\text{м}})X_{\text{м}}\mu_{\text{ч.и.}}; \mu_{\text{с.и.}}$  – мос ҳолда сўниш, магнит майдонининг тарқалиши, МЭЎ магнит занжири чўзувчи (ч) ва сиқувчи (с) участкаларининг погон ва тўлиқ магнит қаршилиқлар ҳамда нисбий магнит ўтказувчанлиги коэффициентларининг қийматлари;  $k_{1\text{ч}} = Z_{\mu\text{ч}}(U_{\text{м}})/2Z_{\mu\text{ч}}(U_{\text{м}}); k_{1\text{с}} = Z_{\mu\text{ч}}(U_{\text{м}})/2Z_{\mu\text{с}}(U_{\text{м}})$  – коэффициентлар.

Янги МКМЭЎларнинг статик тавсифлари (11- расм) деярли чизиқли табиатга эга, ҳисоб-китобларда чулғамларнинг тақсимланганлигини эътиборга олиш эса статик тавсифларни ҳисоблашдаги хатоликларни 3÷8 %га қисқартириш имконини беради.



**11-расм. Ишлаб чиқилган МЭЎларнинг статик тавсифлари:** 1, 2 – мос ҳолда чулғамларнинг тақсимланганлик табиатини ҳисобга олмаган ва ҳисобга олган ҳолати; 3 – экспериментал тавсиф

Сакраб ўзгарувчи ва синусоидал кириш таъсирларида, шунингдек ўзгартиргичга доимий кириш таъсири берилганда МЭЎнинг кўзғатиш чулғамини синусоидал кучланиш манбаига улаш ҳолатидаги МКМЭЎларнинг динамик тавсифлари тадқиқ этилди. МЭЎнинг киришига сакрашсимон кириш таъсири берилганда, қуйида ифодаси келтирилган ўтиш кучланиши ( $U_{\text{э·чик}}(t)$ ) кўзғатиш токи частотасига тенг частота билан ўзгарадиган синусоидал мажбурий таркибий қисм ва магнит занжирининг параметрларига боғлиқ бўлган эркин аperiодик таркибий қисм йиғиндисидан иборат:

$$U_{\text{э·чик}}(t) = U_{\text{э·маж.м}} \sin(\omega_3 t + \varphi_1) - U_{\text{э·эрк.}} e^{-\frac{t}{T_{\mu}}} = u_{\text{э·маж.}}(t) - u_{\text{э·эрк.}}(t), \quad (29)$$

бу ерда  $U_{\text{э·маж.м}} = 2k_2 U_{\text{м}} I_{\text{эқт}} (\sqrt{1 + \omega_3^2 T_{\mu}^2})^{-1}; U_{\text{э·эрк.}} = 2k_2 U_{\text{м}} \omega_3 T_{\mu} I_{\text{эқт}} (1 + \omega_3^2 T_{\mu}^2)$  – мос равишда мажбурий таркибий қисмнинг амплитуда қиймати ва ўтиш кучланиши  $t = 0$  бўлганда эркин таркибий қисм қиймати;

$\varphi_1 = 90^\circ + \arctg(\omega_3 T_{\mu})$  – ўтиш кучланишининг мажбурий таркибий қисми ва кўзғатиш токи орасидаги фазаларнинг силжиш бурчаги;  $k_2, [H \cdot N^{-1}]$  – механик, электр ва магнит занжирларнинг параметрларига боғлиқ пропорционаллик коэффициенти;  $I_{\text{эқт}}, \omega_3$  – кўзғатиш токининг амплитудаси ва бурчак частотаси;  $T_{\mu} = R_{\mu} C_{\mu\Sigma\text{ўр}}; R_{\mu}; C_{\mu\Sigma\text{ўр}}$  – МЭЎ магнит занжирининг мос ҳолда вақт доимийси, фаол магнит қаршилиги ва умумий сифмининг ўртача қиймати.

МЭЎ киришига синусоидал таъсир кучи берилганда, ўтиш кучланиши (12, а- расм) частоталари кўзғатиш токи ва кириш таъсирининг мос равишда

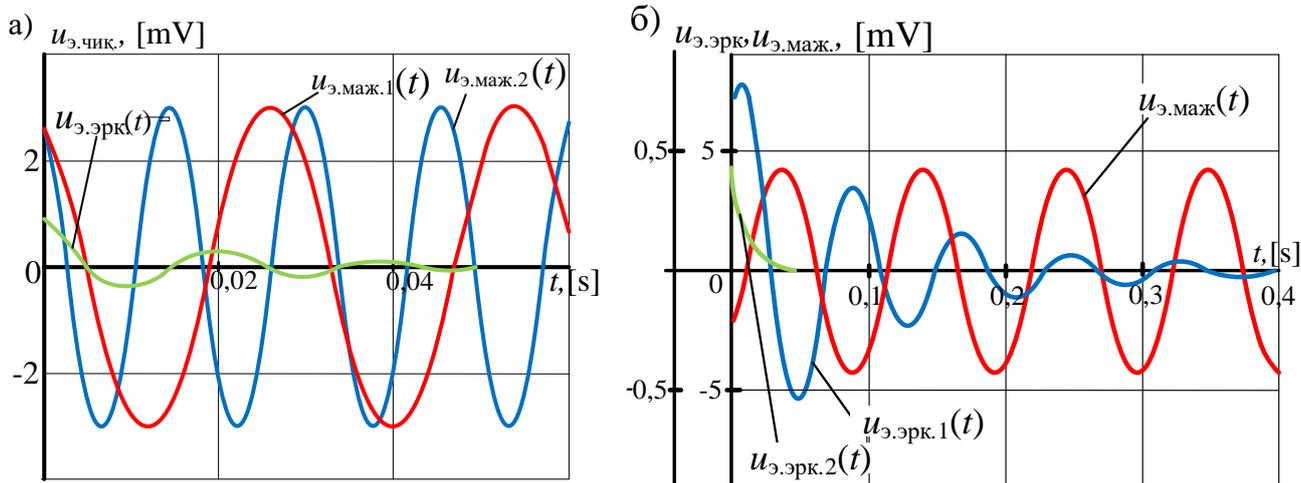
билан ўзгарадиган ва МЭЎ магнит занжири параметрларига боғлиқ ҳолда сўнадиган эркин таркибий қисм йиғиндисидан иборат. Бунда ўтиш кучланишининг ифодаси куйидаги кўринишга эга бўлади:

$$U_{\text{э.чик.}}(t) = U_{\text{э.маж.}m} \cos[(\omega_{\text{э}} - \Omega_{\text{М}})t + \varphi_2] + U_{\text{э.маж.}m} \cos[(\omega_{\text{э}} + \Omega_{\text{М}})t + \varphi_2] - U_{\text{э.эрк.}m} e^{-\frac{t}{T_{\mu}}} \cos \omega_{\text{э}} t = u_{\text{э.маж.}1}(t) + u_{\text{э.маж.}2}(t) + u_{\text{э.эрк.}}(t), \quad (30)$$

бу ерда  $U_{\text{э.маж.}m} = 2k_2 U_{\text{М.}m} \omega_{\text{э}} I_{\text{э}k m} (\sqrt{1 + \Omega_{\text{М}}^2 T_{\mu}^2})^{-1}$ ;  $U_{\text{э.эрк.}m} = 2k_2 U_{\text{М.}m} \omega_{\text{э}} I_{\text{э}v m} \Omega_{\text{М}} T_{\mu} (1 + \Omega_{\text{М}}^2 T_{\mu}^2)^{-1}$ ;  $U_{\text{М.}m}$ ,  $\Omega_{\text{М}}$  – механик куч амплитудаси ва частотаси.

Сезгирлик элементи доимий таъсир остида бўлган МЭЎ кўзғатиш чулғамини синусоидал кучланиш манбаига улашда вужудга келадиган ўтиш кучланиши синусоидал кучланиш манбаига уланган МЭЎ киришига сакрашсимон таъсир берилганда вужудга келадиган ўтиш кучланишини сифат жиҳатдан такрорлаши аниқланди.

Ушбу диссертация ишида ҳаракат параметрлари МЭЎларининг динамик тавсифлари тадқиқ этилган. Хусусан, механик занжирдаги сўниш коэффициентини ( $\delta_{\text{М}}$ ) ўз частотасидан ( $\omega_{\text{М}}$ ) кам бўлган вибрация тезланиши МЭЎ



12-расм. Куч (а) ва вибрация тезланишлари (б) МЭЎларининг киришига синусоидал таъсир берилганда улардаги ўткинчи кучланишлар эгри чизиқлари

киришига гармоник таъсир берилганда, куйида ифодаси келтирилган ўткинчи кучланиш мажбурий ва эркин гармоник ҳамда аперидик эркин ташкил этувчилар йиғиндисидан ташкил топади, мажбурий ташкил этувчи кириш катталиги частотаси билан тебранади, унинг амплитудаси бошланғич шартлар ва вақтга боғлиқ эмас, гармоник эркин ташкил этувчининг сўниш тезлиги механик занжир сўниш коэффициентининг қийматига боғлиқ, аперидик эркин ташкил этувчининг сўниш тезлиги эса ўзгартиргич магнит занжирининг вақт доимийсига боғлиқ бўлади (12, б-расм):

$$U_{\text{э.чик.}}(t) = U_{\text{э.чик.}m} \cos[\Omega_{\text{М}} t + 90^{\circ} - \varphi_{2\text{эрк}}] + U_{\text{э.эрк.}m1} e^{-\delta_{\text{М}} t} \cos[\omega_{\text{М.эрк}} t - \varphi_{3\text{эрк}}] + U_{\text{э.эрк.}m2} e^{-\frac{t}{T_{\mu}}} = u_{\text{э.маж.}}(t) + u_{\text{э.эрк.}1}(t) + u_{\text{э.эрк.}2}(t), \quad (31)$$

бу ерда  $U_{\text{э.эрк.}m1} = \frac{K_5 \sqrt{\omega_{\text{М}}^4 + 4\delta_{\text{М}}^2 (\delta_{\text{М}}^2 - \omega_{\text{М}}^2)}}{2\sqrt{\delta_{\text{М}}^2 - \omega_{\text{М}}^2} \sqrt{4\delta_{\text{М}}^2 (\delta_{\text{М}}^2 + \omega_{\text{М}}^2) + (\omega_{\text{М}}^2 + \Omega_{\text{М}}^2)^2} \cdot \sqrt{(1 - \delta_{\text{М}} T_{\mu})^2 + T_{\mu}^2 (\delta_{\text{М}}^2 - \omega_{\text{М}}^2)}};$

$$U_{\text{э.маж.т}} = \frac{K_5 \Omega_M}{\sqrt{1 + T_\mu^2 \Omega_M^2 \sqrt{(\Omega_M^2 - \omega_M^2)^2 + 4\delta_M^2 \Omega_M^2}}}; U_{\text{э.эрк.т2}} = \frac{K_5 T_\mu}{(1 + \omega_M^2 T_\mu^2)(T_\mu^2 \omega_M^2 - 2\delta_M T_\mu + 1)};$$

$\varphi_{2\text{эрк}} = \arctg \frac{2\delta_M \omega_{\text{м.эрк}}}{\Omega_M^2} + \arctg \frac{\omega_{\text{м.эрк}}(\omega_M^2 + \Omega_M^2)}{2\delta_M(\delta_M^2 - \omega_M^2)}$  – ўткинчи кучланишнинг мажбурий ташкил этувчиси ва ўлчанаётган кириш катталиги ўртасидаги фазалар силжиш бурчаги;  $\varphi_{3\text{эрк}} = \arctg \frac{T_\mu \omega_{\text{м.эрк}}}{1 - \delta_M T_\mu} + \arctg \frac{2\delta_M \Omega_M}{\Omega_M^2 - \omega_M^2} + \arctg \Omega_M T_\mu$  – ўткинчи кучланиш эркин тебранувчи ташкил этувчисининг бошланғич фазаси;  $\omega_{\text{м.эрк}} = \sqrt{\omega_M^2 - \delta_M^2}$  – эркин тебранишларнинг бурчак частотаси.

Куч параметрлари МЭЎларида ўткинчи жараёнларнинг давомийлиги магнит занжир параметрлари (магнит сиғими ва актив магнит қаршилиги) билан, ҳаракат параметрлари МЭЎларидаги ўткинчи жараёнларнинг давомийлиги эса, асосан, маҳаник занжир параметрлари (актив қаршилик, индуктивлик ва сиғим) билан белгиланиши аниқланди. Ҳаракат параметрлари МЭЎларидаги ўткинчи жараёнларнинг давомийлиги куч параметрлари МЭЎлариникидан ўртача саккиз марта кўп.

МКМЭЎ хатоликларини ПСС усули орқали тадқиқ этиш ва улар манбаларининг таҳлили шуни кўрсатдики, хатоликни камайтиришнинг мавжуд усуллари ёрдамида МЭЎнинг статик тавсиф нозизиқлигидан вужудга келадиган хатолиги (1,5÷2,0 %)ни (бир хил белгили нозизиқликка эга иккита тавсифни қўшиш ва айириш орқали) 0,2 %гача; магнит эластик гистерезисдан вужудга келадиган хатолик (1,5÷2,0 %)ни (магнит ўтказгични юқори эластик материаллардан тайёрланган қистирмалар билан навбатма-навбат қўлланиладиган алоҳида электротехник пўлат пластиналаридан йиғиш орқали) – 0,2 %гача; ташқи муҳит ҳароратининг ўзгаришидан вужудга келадиган хатолик (1,5÷2,5 %)ни (МЭЎнинг кириш қаршилигини кўзғатиш ампер-ўрамларини тўғрилаш ҳисобига барқарорлаштириш орқали) – 10°C га 0,01 % гача; таъминот манбалари параметрларининг беқарорлигидан вужудга келадиган хатоликлар (1,5 %) ни (юқори барқарор ўзгармас кучланишни тўғри бурчакли импульсларга ўзгартириш орқали) – 0,01 %гача қисқартириш мумкинлиги аниқланди.

Ҳаракат параметрлари МЭЎ хатоликларига куч параметрлари МЭЎларига хос бўлган хатоликлардан ташқари ўлчанаётган ҳаракат параметрини механик кучга ўзгартиришдаги хатолик ташкил этувчилари қўшилиши аниқланди. Мазкур ишда ушбу хатоликлар баҳоланган. Хусусан, механик сиғим  $C_M$  ва механик қаршилик  $R_M$  нинг ҳарорат беқарорлигидан вужудга келадиган амплитуда ( $\gamma_{(\Delta T)}$ ) ва фаза ( $\Delta\varphi_{(\Delta T)}$ ) хатоликларининг қуйидаги ифодалари аниқланди:

$$\gamma_{C_M(\Delta T)} = \frac{\Omega_M^2 [L_M (L_M C_M \Omega_M^2 - 1) + R_M^2 C_M] C_{M0} \alpha_W \Delta T}{(1 + \alpha_W \Delta T)^2 [(1 - L_M C_M \Omega_M^2)^2 + \Omega_M^2 (R_M C_M)^2]} \cdot 100 \%, \quad (32)$$

$$\Delta\varphi_{C_M(\Delta T)} = \frac{\Omega_M R_M (1 - L_M C_M \Omega_M^2)^2 C_{M0} \alpha_W \Delta T}{(1 + \alpha_W \Delta T)^2 [(1 - L_M C_M \Omega_M^2)^2 + \Omega_M^2 (R_M C_M)^2]}, \quad (33)$$

$$\gamma_{R_M(\Delta T)} = \frac{\Omega_M^2 C_M^2 R_M R_{M0} \alpha_R \Delta T}{(1 - L_M C_M \Omega_M^2)^2 + \Omega_M^2 (R_M C_M)^2}, \quad (34)$$

$$\Delta \varphi_{R_M(\Delta T)} = \frac{\Omega_M C_M (L_M C_M \Omega_M^2 - 1) R_{M0} \alpha_R \Delta T}{(1 - L_M C_M \Omega_M^2)^2 + \Omega_M^2 (R_M C_M)^2}, \quad (35)$$

бу ерда  $\alpha_W$  ва  $\alpha_R$  – мос ҳолда эластиклик ва механик қаршилиқнинг ҳарорат коэффициентлари,  $[(^{\circ}\text{C})^{-1}]$ ;  $C_{M0}$ ,  $R_{M0}$  – мос ҳолда  $C_M(\Delta T)$  ва  $R_M(\Delta T)$  нинг нормал ҳароратдаги қийматлари;  $\Delta T$  – ҳароратнинг ўзгариши,  $[^{\circ}\text{C}]$ ;  $L_M$  – механик занжирнинг индуктивлиги (массаси),  $[kg]$ .

Ўтказилган назарий ва экспериментал тадқиқотлар натижасида ишлаб чиқилган куч параметрлари МЭЎларининг нисбий хатолиги  $\pm 1,0$  % дан, ҳаракат параметрлари МЭЎларининг нисбий хатолиги эса  $\pm 1,5$  %дан ошмаслиги аниқланди.

Тадқиқот жараёнида МКМЭЎларнинг ишончилиги тадқиқ этилди. Ишлаб чиқилган МКМЭЎлар юқори ишончилик кўрсаткичларига эгаллиги аниқланди, хусусан чўзувчи куч МЭЎларининг ишдан чиқмасдан ишлаш эҳтимоллиги 0,9673 ни ташкил этади, бу эса назорат ва бошқарув тизимлари томонидан ишончилик бўйича қўйиладиган талабларга мос келади.

Диссертациянинг иловасида турли физик табиатга эга занжирлар энергия-ахборот моделлари ва ПСС аппарати асосий элементлари, ишлаб чиқилган МКМЭЎларни тадқиқ этишда фойдаланиладиган занжирлараро ФТЭ ва занжир ичидаги параметрларнинг техник тавсифлари, ихтиро учун олинган патентлар ҳамда ЭХМ дастурлари гувоҳномаларининг тавсифлари, шунингдек илмий тадқиқот натижаларининг ишлаб чиқаришга жорий қилиниши тўғрисидаги маълумотлар келтирилган.

## ХУЛОСА

1. Мавжуд механик катталиқлар ўзгартиргичларининг асосий тавсифларини қиёсий таҳлил қилиш натижасида магнит эластик ўзгартиргич(МЭЎ)лар катта чиқиш қувватига, экстремал шароитларда ишлашда юқори ишончиликка ва барқарор тавсифларга эгаллиги, аксарият механик катталиқларни ўлчашда қўзғалувчан қисмнинг йўқлиги туфайли назорат ва бошқарув тизимлари талабларига тўлиқ жавоб бериши аниқланган.

2. МЭЎларни энергия-ахборот усули ёрдамида дастлабки конструкциялашда ўзгартиргичларнинг морфологик таҳлил ва синтез босқичини танланган параметрик структура схемаси ва ҳар бир физик-техник эффект бўйича алоҳида морфологик таҳлил ва синтезлаш кичик босқичларига ажратиш синтезланаётган вариантлар сонини ошириш ҳамда назорат ва бошқарув тизимлари учун талаб этилган тавсифларга эга МЭЎларни танлаш имконини бериши кўрсатилган.

3. Механик катталиқлар МЭЎларини турли физик табиатга эга занжирлар ўртасидаги боғлиқликлар топограммаси кўринишида қуришнинг умумий тамойиллари ишлаб чиқилиб, улар бу каби ўзгартиргичлар структуравий тузилишларининг турли вариантларини бирлаштириш имконини берган.

4. Кенг функционал имкониятларга, юқори сезгирликка ва чизиқли ўзгартириш тавсифларининг эга механик катталиклар МЭЎларининг янги конструкциялари, шунингдек илк бор маҳаллий кучлар, бурчак тезлиги ва тезланишларини ўлчаш имконини берадиган МЭЎлар ишлаб чиқилган.

5. Механик катталиклар МЭЎлари учун тўғриланган кучланишни юқори сифатда барқарорлаштирадиган ҳамда чиқиш кучланишида юқори гармоникаларнинг улуши камайтирилган таъминот манбаларининг янги схемалари ишлаб чиқилган.

6. Бир вақтнинг ўзида магнит эластик ўзаклар магнит қаршиликлари, улар орасидаги магнит сиғими ҳамда чекланган узунликдаги бўйлама ва кўндаланг кўзғатиш чулғамларининг тарқоқлигини ҳисобга оладиган механик катталиклар МЭЎларини таҳлил қилиш методикаси ишлаб чиқилган.

7. Электромагнит занжирлари параметрларининг тарқоқлиги ва магнит эластик материаллар магнит тавсифларининг параметрларига механик кучланишлар таъсирини ҳисобга олган ҳолда механик катталиклар МЭЎларининг математик моделлари ишлаб чиқилган.

8. МЭЎнинг киришига сақраб ўзгарувчи катталик берилганда, ўткинчи кучланиш частотаси кўзғатиш токи частотасига тенг синусоидал мажбурий ва магнит занжирининг параметрларига боғлиқ ҳолда сўнадиган эркин апериодик ташкил этувчилар йиғиндисидан иборатлиги аниқланган.

9. Вибрация тезланиши МЭЎ киришига гармоник таъсир берилганда, ўткинчи кучланиш мажбурий ва эркин гармоник ҳамда апериодик эркин ташкил этувчилар йиғиндисидан ташкил топади, мажбурий ташкил этувчи кириш катталиги частотаси билан тебранади, унинг амплитудаси бошланғич шартлар ва вақтга боғлиқ бўлмайди, гармоник эркин ташкил этувчининг сўниш тезлиги механик занжир сўниш коэффициентининг қийматига, апериодик эркин ташкил этувчининг сўниш тезлиги эса ўзгартиргич магнит занжирининг вақт доимийсига боғлиқлиги кўрсатилган.

10. Хатоликни камайтиришнинг мавжуд усуллари ёрдамида МЭЎнинг статик тавсиф ноқизиқлигидан вужудга келадиган хатолик ( $1,5 \div 2,0$  %)ни 0,2 % гача; магнит эластик гистерезисдан вужудга келадиган хатолик ( $1,5 \div 2,0$  %)ни – 0,2 % гача; ташқи муҳит ҳароратининг ўзгаришидан вужудга келадиган хатолик ( $1,5 \div 2,5$  %)ни –  $10^{\circ}\text{C}$  га 0,01 % гача; таъминот манбалари параметрларининг беқарорлигидан вужудга келадиган хатолик (1,5 % гача)ни – 0,01 % гача камайтириш мумкинлиги аниқланган.

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

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**ЖУРАЕВА КАМИЛА КОМИЛОВНА**

**МАГНИТОУПРУГИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МЕХАНИЧЕСКИХ  
ВЕЛИЧИН ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА НАУК (DSc) ПО ТЕХНИЧЕСКИМ  
НАУКАМ**

**Ташкент – 2025**

**Тема диссертации доктора наук (DSc) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за B2022.3.DSc/T542**

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном транспортном университете.

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

**Научный консультант:**

**Амиров Султон Файзуллаевич**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Плахтиев Анатолий Михайлович**  
доктор технических наук, профессор

**Мамаджанов Алишер Мамаджанович**  
доктор технических наук, профессор

**Жумаев Одил Абдужалилович**  
доктор технических наук, профессор

**Ведущая организация:**

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий

Защита диссертации состоится «31» мая 2025 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.15/31.08.2022 Т.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 №251). (Адрес: 100167, г.Ташкент, ул. Темирийулчилар, 1. Тел.: (99871) 299-05-66).

Автореферат диссертации разослан «20» мая 2025 года.  
(реестр протокола рассылки №031 от «7» мая 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 докторской диссертации (DSc))

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире особое внимание уделяется интенсификации технологических и производственных процессов в машиностроении, химической промышленности, сельском хозяйстве и на транспорте путем внедрения в них современных автоматических систем контроля и управления. В этом направлении особое внимание уделяется разработке элементов и устройств систем управления, в частности, измерительных преобразователей механических величин (усилий, крутящего момента, перемещения, скорости и ускорения, а также параметров вибрации), позволяющие обеспечить достоверной измерительной информацией. В связи с этим, большое значение имеет конструирование преобразователей механических величин для автоматического управления и совершенствование методов, позволяющих получать высокоточные данные от этих преобразователей.

В мире ведутся научные исследования по совершенствованию систем управления и разработке для этих систем измерительных преобразователей, преобразующие усилия, крутящего момента и параметров движения контролируемых объектов в электрические сигналы. В связи с этим, одной из важных задач является разработка новых конструкций преобразователей, их схематических и аналитических выражений для исследования основных электрических и магнитных параметров вторичных цепей, для повышения их надёжности и стабильности характеристик при экстремальных условиях эксплуатации и обладающих высокой чувствительностью, линейностью характеристик преобразования.

В нашей республике идет развитие различных отраслей транспорта, в том числе инфраструктуры железнодорожного транспорта, расширение участков для высокоскоростного подвижного состава, электрификации существующих участков железных дорог и увеличению пропускной способности электрифицированных участков. В Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы, определены важные задачи, такие как «...интенсивное развитие национальной экономики и обеспечение высоких темпов роста, ...повышение энергоэффективности зданий и сооружений, ...обсуждение системных проблем совместно с учеными, экспертным сообществом и представителями общественности и разработка конкретных предложений по их устранению, ...развитие транспортного рынка и инфраструктуры, ...повышение уровня электрификации железнодорожной инфраструктуры до 60%, поддержка форм сотрудничества, направленные на развитие отношений в области энергетики и транспорта»<sup>1</sup>. Реализация данных задач, в том числе разработка новых магнитоупругих преобразователей механических величин с расширенными функциональными возможностями, повышенной чувствительностью, надежностью и линейностью характеристик преобразования являются важными

---

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

задачами.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит решению задач, предусмотренных Законом Республики Узбекистан №766-І от 15 апреля 1999 года «О железнодорожном транспорте», Указом Президента Республики Узбекистан №УП-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», Постановлением ПК-57 от 16 февраля 2023 года «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий», а также другими нормативно-правовыми документами, относящимися к данному виду деятельности.

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

**Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации.** Научные исследования, направленные на решение актуальных задач, связанных с развитием теории, проектирования и разработкой магнитоупругих преобразователей механических величин, осуществляются в ведущих научных центрах и высших образовательных учреждениях мира, в том числе University of Michigan и General Elektric, Bergen Laboratories Ins. (США), Technical University of Ilmenau и Siemens, Siemens ind Halke (Германия), Davy and United Instrumets (Великобритания), Sony и Tokyo technology institute, Toshiba (Япония), ASEA (Швеция), Kelk Electronics (Канада), Technical Laboratories “TECH LAB” (Катар), HAWK (Великобритания), в Уфимском университете науки и технологий, научно-производственном объединении «Геотехника» (Россия), Киевском институте автоматике (Украина), Ташкентском государственном техническом университете, Национальном исследовательском университете «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства» и Ташкентском государственном транспортном университете (Узбекистан).

В мире по развитию теории, усовершенствованию конструкции и схемных решений магнитоупругих преобразователей получены ряд научных результатов, в частности: разработаны теоретические основы магнитоупругого эффекта (Россия, США), предложены новые контрукции магнитоупругих преобразователей сжимающих, растягивающих усилий, крутящего момента, перемещения, скорости, ускорения, а также параметров вибрации (Германия, Франция, АҚШ, Швеция, Япония, Россия).

В мире с целью дальнейшего развития теории и совершенствования конструкций магнитоупругих преобразователей ведутся научно-исследовательские работы по приоритетным направлениям разработки новых эффективных методов их анализа, созданию преобразователей с расширенными функциональными возможностями, высокой чувствительностью, точностью и линейной функций преобразования.

**Степень изученности проблемы.** Определенный вклад в решение научных проблем совершенствования магнитоупругих преобразователей

механических величин внесли А. Lotze, P. Kauert, C. Enke, L. Walther, T. Barthon, R. Ionedes, Ф.В. Майоров, М.Н. Гуманюк, В.Б. Гинзбург, Г.И. Шевченко, В.М. Панченко, Б.В. Загорюкин, М.И. Столбун, М.Ф. Зарипов, Н.Е. Конюхов, М.А. Ураксеев, Р.К. Азимов, А.М. Мамаджанов, А.М. Плахтиев, Л.Х. Зайнутдинова, И.Х. Сиддиков, С.Ф. Амиров, О.В. Тарханов, М.С. Бахарев, А.В. Капцов, А.В., Мостовой, В.В. Проботюк и др. Усилиями этих ученых разработаны и развиты теоретические основы проектирования и расчета магнитоупругих преобразователей механических величин, предложены и внедрены в производство оригинальные конструкции и схемные решения этих преобразователей.

Вместе с тем, не уделено достаточного внимания созданию магнитоупругих преобразователей сжимающих и растягивающих усилий, локальных усилий, перемещения, скорости, ускорения, в том числе вибрационных параметров движения, источников питания к этим преобразователям, предназначенных для систем контроля и управления различными объектами и имеющих расширенные функциональные возможности, повышенную чувствительность, надежность и линейность характеристик преобразования, а также развитию теории и методов поискового конструирования магнитоупругих преобразователей с учетом распределенных намагничивающих обмоток конечной длины и влияния механических напряжений на соответствующие параметры магнитных характеристик магнитоупругих материалов.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ №3 «Совершенствование электромагнитных и электроизмерительных приборов для железнодорожного транспорта» (2018-2024 годы) Ташкентского государственного транспортного университета.

**Целью исследования** является дальнейшее развитие теории, методов поискового конструирования и разработка магнитоупругих преобразователей механических величин для систем контроля и управления.

**Задачи исследования:**

изучение преобразователей механических величин на современном этапе и формулировка основных требований к ним со стороны систем контроля и управления;

проведение сравнительного анализа основных характеристик существующих преобразователей механических величин, выбор и обоснование типа преобразователя для систем контроля и управления;

развитие методов поискового конструирования магнитоупругих преобразователей механических величин;

разработка общих принципов построения магнитоупругих преобразователей механических величин;

разработка математических моделей магнитоупругих преобразователей механических величин с учетом распределенных обмоток возбуждения

конечной длины и влияния механических напряжений на соответствующие параметры магнитных характеристик магнитоупругих материалов;

разработка новых магнитоупругих преобразователей механических величин и источников питания к ним с улучшенными информационно-энергетическими показателями;

исследование основных технических характеристик, разработанных магнитоупругих преобразователей механических величин.

**Объектом исследования** являются магнитоупругие преобразователи механических величин с расширенными функциональными возможностями, повышенной чувствительностью, надежностью и линейностью характеристик преобразования.

**Предметом исследования** являются электромагнитные процессы в магнитоупругих преобразователях механических величин и разработка их новых конструкций с расширенными функциональными возможностями, повышенной чувствительностью, надежностью и линейностью характеристик преобразования, а также исследование основных технических характеристик.

**Методы исследования.** В ходе исследований использовались теории электрических и магнитных цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами, теория электромагнитного поля и погрешностей, энергоинформационный и морфологический методы технического творчества, метод параметрических структурных схем, а также экспериментальные методы.

**Научная новизна исследования заключается в следующем:**

развит энергоинформационный и морфологический методы поискового контурирования магнитоупругих преобразователей механических величин на этапе их морфологического анализа и синтеза, позволяющие увеличить количества синтезируемых вариантов и выбрать преобразователи с требуемыми характеристиками;

разработан общий принцип построения магнитоупругих преобразователей механических величин в виде топограммы зависимостей между цепями различной физической природы, позволяющие объединить всевозможные варианты получения структурных реализаций этих преобразователей;

разработаны новые конструкции магнитоупругих преобразователей механических величин с расширенными функциональными возможностями, повышенной чувствительностью, надежностью и линейностью характеристик преобразования, в том числе разработаны впервые магнитоупругие преобразователи, позволяющие измерять локальные усилия, угловые скорости и ускорения;

разработаны новые схемы источников питания для магнитоупругих преобразователей механических величин с лучшим качеством стабилизации выпрямленного напряжения, с уменьшенным уровнем высших гармоник в стабилизированном напряжении;

разработана методика анализа магнитоупругих преобразователей механических величин, одновременно учитывающая распределенный характер магнитных сопротивлений магнитоупругих сердечников, магнитные емкости

между ними, а также распределенности продольных и поперечных обмоток возбуждения конечной длины;

разработаны математические модели магнитоупругих преобразователей механических величин с учетом распределенности параметров электромагнитной цепи и влияния механических напряжений на параметры магнитных характеристик магнитоупругих материалов.

**Практические результаты исследования заключаются в следующем:**

Выявлены обобщенные приемы и составлены морфологические матрицы для разработки новых конструкций магнитоупругих преобразователей механических величин с улучшенными техническими характеристиками;

разработаны математические модели основной кривой намагничивания и модель петли гистерезиса магнитоупругих материалов с учетом влияния на них механических напряжений;

разработаны устройства магнитоупругих преобразователей для измерения сжимающих локальных усилий, растягивающих усилий и угловых перемещений, скорости и ускорения, имеющие расширенные функциональные возможности, повышенную чувствительностью и высокую надежность;

разработано устройство источника питания для магнитоупругих преобразователей с лучшим качеством стабилизации выпрямленного напряжения.

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность результатов исследования основана на корректном применении методов расчета магнитоупругих преобразователей механических величин, основанных на теории электрических и магнитных цепей, электромагнитного поля, а также полученными результатами теоретических и экспериментальных исследований и их взаимной согласованностью.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования заключается в разработке математических моделей магнитоупругих преобразователей механических величин с учетом распределенности параметров электромагнитной цепи и влияния механических напряжений на параметры магнитных характеристик магнитоупругих материалов и методики расчета магнитоупругих преобразователей механических величин, одновременно учитывающая распределенный характер магнитных сопротивлений магнитоупругих сердечников, магнитные емкости между ними, а также распределенности продольных и поперечных обмоток возбуждения конечной длины.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что развиты энергоинформационный и морфологический методы поискового контурирования магнитоупругих преобразователей механических величин, выявлены обобщенные приемы и составлены морфологические матрицы, позволяющие разработать магнитоупругие преобразователи механических величин с улучшенными техническими характеристиками.

**Внедрение результатов исследования.** На основе полученных результатов по разработке магнитоупругих преобразователей механических величин: получен патент на изобретение Агентства по интеллектуальной

собственности при Министерстве Юстиции Республики Узбекистан (№IAP 06441, 2021 г.) на магнитоупругий преобразователь сжимающих усилий. В результате появилась возможность измерять локальные усилия с высокой чувствительностью и точностью;

получен патент на изобретение Центра интеллектуальной собственности при Министерстве Юстиции Республики Узбекистан (№IAP 07237, 2023 г.) на источник питания постоянного напряжения. В результате появилась возможность обеспечить магнитоупругие преобразователи с источником питания постоянного напряжения, имеющим высокое качество стабилизации выпрямленного напряжения;

получен патент на изобретение Центра интеллектуальной собственности при Министерстве Юстиции Республики Узбекистан (№IAP 07490, 2023 г.) на трехфазный стабилизатор напряжений. В результате появилась возможность обеспечить магнитоупругие преобразователи источником питания переменного напряжения, имеющим уменьшенный уровень высших гармоник в стабилизированном напряжении;

получен патент на изобретение Центра интеллектуальной собственности при Министерстве Юстиции Республики Узбекистан (№IAP 7715, 2024 г.) на магнитоупругий преобразователь растягивающих усилий, что позволило создать устройство для измерения растягивающих усилий с высокой точностью;

получен патент на изобретение Центра интеллектуальной собственности при Министерстве Юстиции Республики Узбекистан (№IAP 7870, 2024 г.) на магнитоупругий преобразователь для измерения параметров вибрации. В результате появилась возможность измерять параметров вибрации по двум взаимно перпендикулярным осям и получения выходных сигналов от двух независимых отдельных измерительных обмоток;

получен патент на изобретение Центра интеллектуальной собственности при Министерстве Юстиции Республики Узбекистан (№IAP 7878, 2024 г.) на магнитоупругий преобразователь параметров вращения. В результате появилась возможность создать устройство, позволяющее измерять угловые перемещения, скорости и ускорения;

новое устройство магнитоупругого преобразователя усилий с расширенными функциональными возможностями, высокой чувствительностью, надежностью в экстремальных условиях эксплуатации внедрено в производственный процесс диагностирования и контроля технического состояния токоприемников электровазозов депо “Ўзбекистон” управления «Эксплуатация локомотивов» АО “Темирйўлинфратузилма” АО “Ўзбекистон темир йўллари” (Справка №4/Е503 от 10 апреля 2025 года Министерства Транспорта Республики Узбекистан). В результате достигнуто повышение точности диагностирования и контроля технического состояния токоприемников электровазозов, способствующего увеличения срока службы контактных проводов контактной подвески и избежать выхода их из строя.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследования были апробированы на 25 научно-практических конференциях, в том числе на 22 международных и 3 республиканских конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** Всего по теме диссертации опубликовано 61 научная работа, в том числе 1 монография, 23 статьи в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов докторских диссертаций (из них 7 в зарубежных и 16 в республиканских периодических научных журналах), а также 12 статей в Scopus и 2 в других зарубежных журналах. Получены 6 патентов Республики Узбекистан на изобретения и 5 свидетельств на программный продукт для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Объем диссертационной работы составляет 197 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обосновывается актуальность и необходимость проведения исследований, представлено соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и техники республики, описывается уровень изученности проблемы, излагается соответствие диссертационного исследования с научно-исследовательским планом высшего учебного заведения, в котором выполнена научная работа, формулируются цель и задачи, объект и предмет исследования, научная новизна, практические результаты и методы исследования, а также обоснована достоверность, теоретическая и практическая значимость работы, представлены сведения о внедрении результатов диссертационного исследования в производство, сведения по опубликованным работам, сведения о структуре и объеме диссертации.

В первой главе диссертации **«Состояние проблемы и постановка задач исследования»** изучением характерных схем автоматических систем контроля и управления объектами и технологическими процессами в машиностроении, химической промышленности, сельском хозяйстве и на транспорте, в которых в качестве измерительных элементов используются преобразователи механических величин (усилий, крутящего момента, перемещения, скорости и ускорения, а также параметров вибрации), выявлены основные требования к этим преобразователям. Установлено, что преобразователи механических величин, применяемые в системах контроля и управления, должны иметь расширенные функциональные возможности (измерение одним преобразователем нескольких механических величин, локальных (местных) усилий, измерение механической величины по нескольким осям и т.д.), большую выходную мощность, повышенную чувствительность, точность, линейную статическую характеристику, высокую надежность и стабильные метрологические характеристики в тяжелых условиях эксплуатации.

Сравнительным анализом основных характеристик существующих преобразователей механических величин установлено, что благодаря большой выходной мощности, перегрузочной способности, высокой надежности работы и стабильности характеристик в экстремальных условиях, отсутствия подвижной части при измерении усилия, крутящего момента, ускорения и параметров вибрации наиболее полно отвечают требованиям систем контроля и

управления магнитоупругие преобразователи механических величин (МУПМВ).

Вместе с этим показано, что существующие МУПМВ имеют ограниченные функциональные возможности: с помощью одного МУП невозможно измерять нескольких механических величин (например, перемещения, скорости этого перемещения и ускорения) осуществлять измерения локальных усилий, а также измерение одной механической величины (например, параметров вибрации) по нескольким взаимно перпендикулярным осям. Кроме того, существующие МУП имеют относительно низкую чувствительность и точность измерения. Выявлено, что одним из причин относительно низкой точности МУП являются неудовлетворительные выходные характеристики их источников питания: в источниках постоянного и переменного напряжения в составе напряжения питания присутствуют высшие гармонические составляющие, являющиеся причинами источников дополнительных погрешностей МУП.

Установлено, что дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку новых МУПМВ с требуемыми характеристиками для систем контроля и управления с привлечением методов поискового конструирования, их общих принципов построения, а для более полного исследования основных технических характеристик МУП необходимо развивать теорию этих преобразователей, в частности, разработать методику расчета МУП, одновременно учитывающую распределенный характер магнитных сопротивлений магнитоупругих сердечников, магнитные емкости между ними, а также распределенности продольных и поперечных обмоток возбуждения конечной длины и математических моделей МУП с учетом распределенных параметров и влияния механических напряжений на магнитные характеристики магнитоупругих материалов.

Исходя из результатов анализа литературных источников и в соответствии с поставленной целью, сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе **«Поисковое конструирование и принципы построения магнитоупругих преобразователей механических величин»** развит энергоинформационный и морфологические методы технического творчества, разработаны общие принципы построения и новые конструкции МУПМВ.

Показано, что при поисковом конструировании МУПМВ энергоинформационным методом, разделение этапа морфологического анализа и синтеза преобразователей на отдельные подэтапы морфологического анализа и синтеза по параметрической структурной схеме (ПСС) и по каждому физико-техническому эффекту (ФТЭ) позволяет увеличить количества синтезируемых вариантов и выбрать МУПМВ с требуемыми для систем контроля и управления характеристиками. При этом на первом этапе решения физического принципа действия МУПМВ в виде ПСС с использованием базы данных морфологических матриц по каждому элементарному преобразователю находят наилучшие варианты физического принципа действия всего преобразователя, т.е. производят морфологический синтез по выбранной ПСС. На этом этапе синтеза в качестве морфологических признаков выступает ФТЭ или параметр, участвовавший в выбранной ПСС МУПМВ, причем в качестве значения

каждого признака морфологической матрицы выступает вариант реализации ФТЭ или параметра, наилучшего по отдельной технической характеристике, например, по чувствительности, погрешности, надежности т.п.

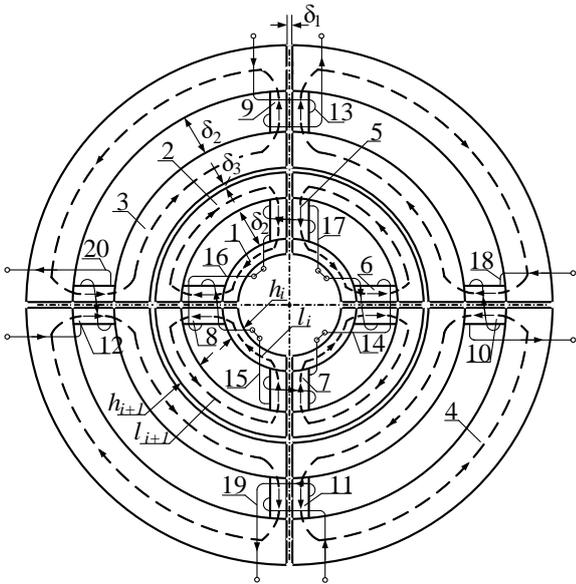
Разработаны общие принципы построения МУПМВ в виде топограммы зависимостей между цепями различной физической природы, позволяющие объединить всевозможные варианты получения структурных реализаций этих преобразователей. При этом в топограмме взаимодействие величин цепи одной физической природы осуществляется соответствующими параметрами этой цепи и операторами дифференцирования и интегрирования, а взаимодействие величин цепей разной физической природы - отражается наличием ФТЭ между этими цепями. Анализ составленной топограммы показывает, что чем больше ФТЭ между различной физической природы, тем больше появляется варианты построения МУПМВ в виде структурных схем. Например, использование в топограмме зависимостей между цепями различной физической природы ФТЭ между механической угловой скорости и механическим линейным напряжением позволили впервые синтезировать МУП для измерения угловой скорости и углового ускорения.

С помощью развитых методов технического творчества и общих принципов построения МУПМВ в виде топограммы зависимостей между цепями различной физической природы разработаны новые конструкции МУП сжимающих и растягивающих усилий, угловых перемещения, скорости, ускорения и параметров вибрации, а также новые схемы источников питания постоянного и переменного напряжений к этим МУП.

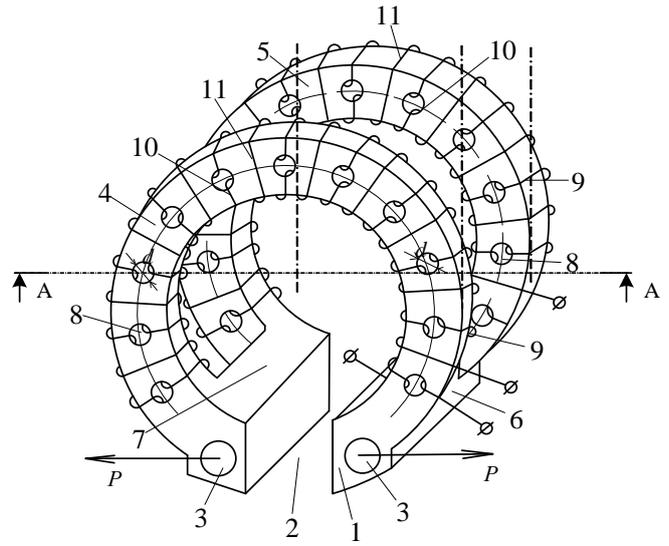
В МУП сжимающих усилий (рис.1) благодаря расположению кольцевых магнитопроводов в одной горизонтальной плоскости и снабжению сквозными радиальными вырезами, расположенными по оси стержней и разделяющими стержни и магнитопроводы на отдельные кольцевые сектора, соединению секций обмоток последовательно-согласно, а выполнение соотношения толщины внутренних и внешних стенок каждого кольцевого сектора магнитопровода выбираемая из условия:  $(h_{i+1})/(h_i) = (l_{i+1})/(l_i)$ , здесь  $h_i, h_{i+1}, l_i, l_{i+1}$  – соответственно толщины и средние длины соответствующих колцевых секторов магнитопровода, существенно уменьшается габаритный размер и упрощается конструктивное исполнение МУП по сравнению с его прототипом, а благодаря разделению кольцевых магнитопроводов на соответствующие секторы, появляется возможность измерять локальные усилия, в результате чего расширяются функциональные возможности МУП.

В МУП растягивающих усилий (рис.2) благодаря конструктивному изменению магнитопровода путем выполнения незамкнутых колец полыми и подбору геометрических размеров сечений внутреннего и внешнего участков этих колец по отношению их средних линий из условия равенства магнитных сопротивлений этих участков на пути намагничивающих магнитных потоков исключается нулевой сигнал и сигналы помех от изменений магнитных свойств материала магнитопровода под воздействием различных факторов, что приводит к повышению точности по сравнению с его прототипом.

В МУП для измерения параметров вибрации (рис.3) благодаря тому, что

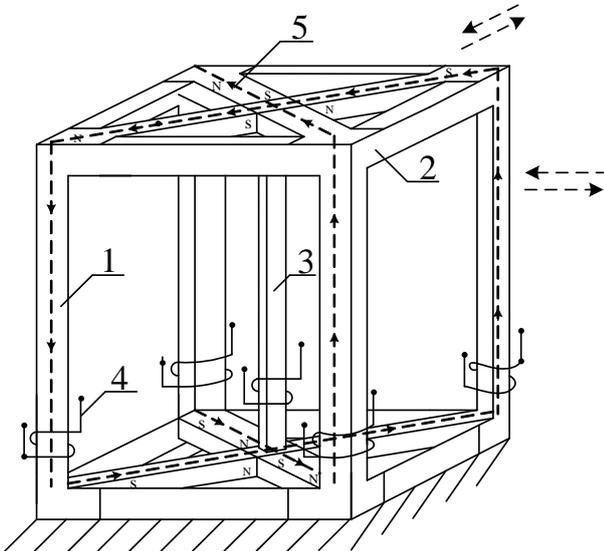


**Рис. 1. Конструктивная схема МУП сжимающих усилий:** 1-4 – кольцевые магнитопроводы; 5-12 –перемычки; 13-20 – секции обмоток;  $h_i, h_{i+1}, l_i, l_{i+1}$  –толщины и средние длины кольцевых секторов;  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – нерабочий и рабочий зазоры.

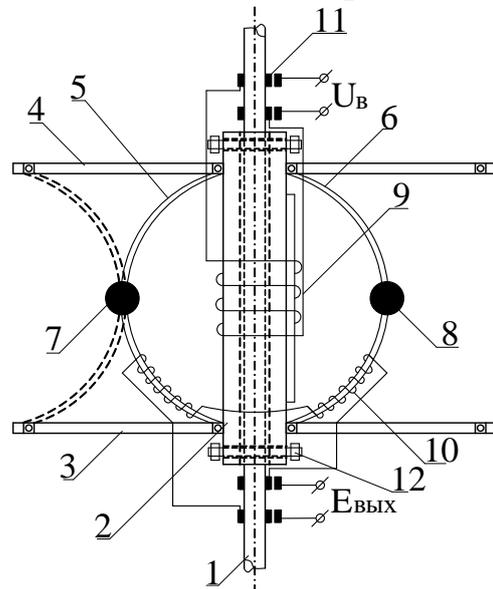


**Рис. 2. Конструктивная схема МУП растягивающих усилий:** 1 – магнитопровод; 2 – зазор; 3 – отверстия; 4,5 - незамкнутые кольца прямоугольного сечения; 6,7 – перемычки; 8 – отверстия; 9,10 – измерительные обмотки; 11 – обмотки возбуждения;  $P$  – прилагаемое усилие;  $d$  – диаметр отверстия.

основные стержни расположены так, что они представляют собой ребра четырехугольной прямой правильной призмы, ребра оснований призмы выполнены в виде металлических стержней из немагнитного материала,



**Рис. 3. Конструктивная схема МУП параметров вибрации:** 1 – основные магнитоупругие стержни; 2 – немагнитные стержни; 3 – дополнительный стержень; 4 – измерительные обмотки; 5 – постоянные магниты;  $\leftarrow \text{---} \rightarrow$  - направление вибрации



**Рис. 4. Конструктивная схема МУП параметров вращения:** 1 – вал; 2 – перемычка; 3,4 – стержни; 5,6 – полукольца; 7,8 – инерционные элементы; 9,10 – возбуждающая и измерительная обмотки; 11 – контакты; 12 – болты;  $U_B, E_{\text{ВЫХ}}$  –напряжение возбуждения и выходная ЭДС

дополнительный стержень соединяет между собой центры оснований призмы, по два постоянных магнита согласно размещены на каждой диагонали оснований призмы, две смежные основные измерительные обмотки, размещенные на двух основных стержнях, лежащих в перпендикулярных плоскостях к оси, по которой происходит вибрация, включены между собой последовательно-согласно, а пары этих обмоток соединены между собой последовательно-встречно, при этом у закрепленного конца дополнительного стержня размещена дополнительная кольцевая измерительная обмотка расширяются его функциональные возможности путем обеспечения измерения параметров вибрации по двум взаимно перпендикулярным осям и получения выходных сигналов от двух независимых отдельных измерительных обмоток, а также повышается чувствительность преобразователя.

В МУП параметров вращения (рис.4) благодаря выполнению перемычки магнитопровода полым и его свободному насаждению на вал, с возможностью поворота, появляется возможность измерения угловых перемещений (наклонов) объекта от его исходного вертикального положения в любом направлении, а благодаря коаксиальному расположению полуколец с сохранением расстояния от оси перемычки до инерционных элементов появляется возможность измерения преобразователем угловой скорости и углового ускорения контролируемого вала.

В схеме источника питания постоянного напряжения благодаря тому, что шесть вторичных обмоток на каждом из трех сердечников устройства расположены на тех же стержнях магнитопровода, что и феррорезонансные контуры, магнитный поток в которых является неизменным, улучшается качество стабилизации выходных напряжений фаз, а вся система сердечников позволяет получить искусственную 18- фазную систему выпрямления, что улучшает качество стабилизации выпрямленного напряжения за счет уменьшения потерь напряжения на выпрямительных диодах, так как в любой момент времени выпрямленный ток протекает только по одному диоду.

В схеме источника питания переменного напряжения благодаря тому, что вторичные обмотки, к которым подключаются цепи возбуждения МУП, расположены на тех же стержнях магнитопровода, что и феррорезонансные контуры, магнитный поток в которых является неизменным, улучшается качество стабилизации выходных напряжений фаз, а подключение первичной цепи устройства по схеме звезды с нулевым проводом и трех выходных обмоток по схеме треугольника, позволяет исключить из нагрузочного тока гармоники, кратные трем, что уменьшает уровень содержания высших гармоник в стабилизированном трехфазном напряжении.

В третьей главе **«Исследование магнитоупругого преобразования в преобразователях механических величин»** разработаны математические модели магнитоупругого преобразования, гистерезисных магнитных характеристик чувствительного элемента (ЧЭ) МУП с учетом влияния механических усилий, а также исследованы особенности магнитоупругого преобразования в МУПМВ.

Получено следующее аналитическое уравнение, позволяющее определить

относительную магнитную проницаемость магнитоупругого участка без потерь ( $\mu_{б.п.}$ ) на основе значений магнитных индукций магнитоупругого и немагнитоупругого участков магнитной цепи и напряженности поля:

$$\mu_{б.п.} = \zeta_0 \{ (\mu_0 H) [ (\zeta_0 + 1) (B_{1m \text{ уср.}0} / B_{1m \text{ уср.}\sigma}) - 1 ] \}^{-1} B_{1m \text{ уср.}0}, \quad (1)$$

здесь  $\zeta_0 = W_{\mu_{му}} / W_{\mu_{нму}}$ ;  $W_{\mu_{му}}$ ,  $W_{\mu_{нму}}$ ,  $B_{1m \text{ уср.}0}$  – магнитные жесткости и усредненное значение магнитной индукции магнитоупругого и немагнитоупругого участков МУП в разгруженном состоянии;  $B_{1m \text{ уср.}\sigma}$ , – усредненное значение магнитной индукции магнитоупругого участка МУП, находящейся под механическим напряжением.

Установлено, что при работе МУП на линейном участке магнитной характеристики можно считать, что относительная магнитная проницаемость магнитоупругого участка является функцией только одного параметра – механических усилий. Это позволило аппроксимировать зависимости  $\mu_{б.п.} = f(U_M)$  в виде линейной функции  $\mu_{б.п.} = a_1 \pm a_2 U_M$ , (2), здесь  $a_1$ , [–] и  $a_2$ , [ $N^{-1}$ ] – коэффициенты аппроксимации;  $U_M$  – усилие.

Получены следующие выражения математических моделей (аппроксимирующих функций) гистерезисных петель магнитоупругих материалов, используемых в МУПМВ, с учетом влияния механических усилий, воздействующих на ЧЭ преобразователей:

$$J_{100}^* = \frac{th(M \mp M_c)}{1 + 2e^{-\tau} sch(M \mp M_c)} \pm 0,5 \Delta J_{100}^*, \quad (3)$$

$$J_{110}^* = \frac{(\sqrt{2})^{-1} th [ (\sqrt{2})^{-1} (M \mp M_c) ]}{1 + 2e^{-0,5\tau} sch [ (\sqrt{2})^{-1} M_{BH} ]} \pm 0,5 \Delta J_{100}^*, \quad (4)$$

$$J_{111}^* = (\sqrt{3})^{-1} th [ (\sqrt{3})^{-1} (M \mp M_c) ] \pm 0,5 \Delta J_{100}^*, \quad (5)$$

$$\Delta J_{100}^* = \left[ \frac{th(M_{max} + M_c)}{1 + 2e^{-\tau} sch(M_{max} + M_c)} - \frac{th(M_{max} - M_c)}{1 + 2e^{-\tau} sch(M_{max} - M_c)} \right], \quad (6)$$

$$j^* = \xi \cdot J_{100}^* + \zeta \cdot J_{110}^* + \varrho \cdot J_{111}^*, \quad (7)$$

здесь  $j^* = j/j_s$ , [–] – соответственно намагниченность и намагниченность насыщения;  $J_{100}^*$ ,  $J_{110}^*$  и  $J_{111}^*$  – относительные значения намагниченности по главным кристаллографическим осям [100], [110] и [111];  $M_c = (3\chi_0 H_c) / j_s$ , [T];  $H_c$ , [ $A \cdot m^{-1}$ ] – коэрцитивная сила;  $\chi_0 = dM/dH$ , [ $T \cdot A^{-1} \cdot m$ ] – дифференциальная магнитная восприимчивость при  $H = H_c$ ;  $H$ ,  $H_{max}$  – напряженность магнитного поля обмотки возбуждения МУПМВ ее максимальное значение;  $M_{BH} = (3\chi_0 H_{BH}) / j_s$ ;  $H_{BH} = H \mp H_c$ ;  $H_{BH}$  – напряженность внутреннего магнитного поля;  $M_{max} = (3\chi_0 H_{max}) / j_s$ ;  $\tau = (9\chi_0 \lambda_{100} S U_M) / (2\mu_0 j_s)$ , [–];  $\lambda_{100}$ , [–] – относительное магнитоупругое удлинение;  $S$ , [ $m^2$ ] – площадь ЧЭ, на которой воздействует механическое усилие  $U_M$ ;  $\xi$ ,  $\zeta$  и  $\varrho$  – весовые коэффициенты, оценивающие долю составляющих намагниченности, при этом  $\xi + \zeta + \varrho = 1$ .

Получено следующее аналитическое выражение зависимости коэрцитивной силы от растягивающих усилий:

$$H_c = [H_{c0} - M(1 - e^{-\eta U_M})](1 + \vartheta U_M), \quad (8)$$

здесь  $H_{c0}$  – значение коэрцитивной силы при  $U_M = 0$ ;  $M, [-]$ ;  $\eta, [N^{-1}]$ ;  $\vartheta, [N^{-1}]$  – коэффициенты, значения которых определяются структурными особенностями материала чувствительного элемента МУП.

Анализ кривых гистерезисных петель (рис.5), построенных по выражению (7) с учетом (8) для сплава пермендюра 50КФ показал, что с увеличением прилагаемого к ЧЭ МУП механического усилия изменяется место расположения гистерезисной петли на плоскости – она поворачивается в сторону, противоположную направлению часовой стрелки, а значение  $H_c$  с увеличением механического усилия  $U_M$  сперва уменьшается (петля 2), а потом возрастает (петли 3 и 4). С изменением формы гистерезисной петли под воздействием усилия меняется форма основной кривой намагничивания. Поэтому при аппроксимации основной кривой намагничивания магнитоупругих материалов требуется учесть это изменение в виде усредненной кривой намагничивания.

Проведенными экспериментальными исследованиями установлено (рис.6), что: 1) кривые зависимости измерительного напряжения ( $U_{изм.}$ ) МУП от

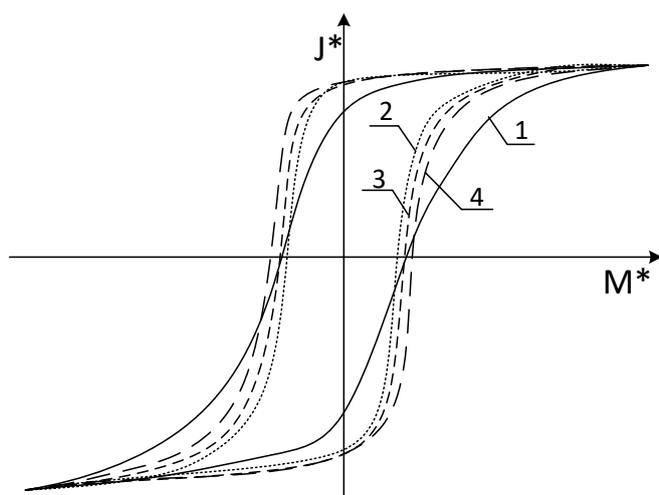


Рис. 5. Изменение формы гистерезисного петля под действием растягивающих усилий  $U_M$ : 1)  $U_M = 0$ ; 2) 50 N; 3) 100 N; 4) 200 N

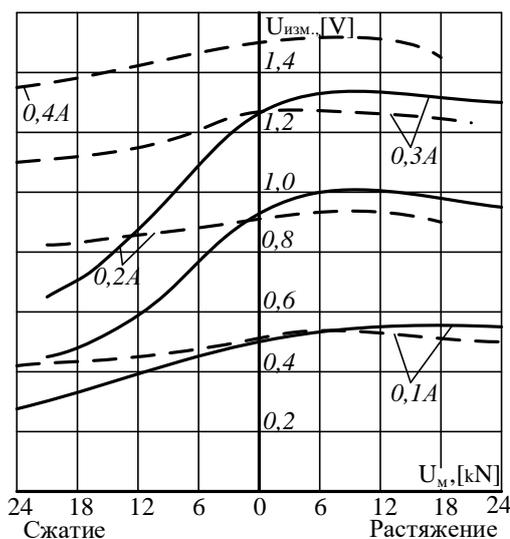


Рис. 6. Зависимость измерительного напряжения ( $U_{изм.}$ ) магнитных систем МУПМВ от механической нагрузки ( $U_M$ ) при продольном (сплошные кривые) и поперечном (пунктирные кривые) МУП

прилагаемого усилия ( $U_M$ ) при растяжении имеют максимум, при этом чувствительность к сжатию ( $S_c = [\Delta U_{изм.с.} / \Delta U_{м.с.}]|_{U_M \rightarrow 0}$ ) превышает чувствительность к растяжению ( $S_p = [\Delta U_{изм.р.} / \Delta U_{м.р.}]|_{U_M \rightarrow 0}$ ), здесь  $\Delta U_{изм.с.}$ ,  $\Delta U_{изм.р.}$ ,  $\Delta U_{м.с.}$  и  $\Delta U_{м.р.}$  – приращения измерительного напряжения и нагрузки, определенные для усилий соответственно сжатия и растяжения вблизи точки

$U_M = 0$ ; 2) при растягивающих нагрузках четко проявляется смещение максимума функции  $U_{\text{изм.}} = f(U_M)$  в сторону меньших нагрузок по мере возрастания тока возбуждения; 3) кривые функции  $U_{\text{изм.}} = f(U_M)$  в условиях поперечного магнитоупругого преобразования качественно аналогичны кривым при продольном магнитоупругом преобразовании, а именно: при сжатии значение относительной магнитной проницаемости уменьшается, а при растяжении – увеличивается; 4) количественные изменения относительной магнитной проницаемости ЧЭ МУП при поперечном магнитоупругом преобразовании значительно меньше по сравнению с продольным магнитоупругим преобразованием.

В четвертой главе «**Математические модели магнитоупругих преобразователей механических величин**» рассмотрены особенности магнитных цепей МУПМВ, разработаны их математические модели с учетом распределенности магнитных сопротивлений длинных сердечников и магнитной емкости между ними, а также без учета и с учетом распределенности обмоток возбуждения конечной длины.

Выявлено, что магнитные цепи большинства МУПМВ относятся к цепям с распределенными параметрами, к которым относятся погонные (удельные) значения магнитных сопротивлений ( $Z_{\mu\text{п}}$ ) длинных ферромагнитных сердечников, магнитных емкостей ( $C_{\mu\text{п}}$ ) зазоров между этими сердечниками, продольных ( $f_{Z_{\mu}}$ ) и (или) поперечных ( $f_{C_{\mu}}$ ) намагничивающих сил, приходящиеся на единицу длины (угла) магнитной цепи. Установлено, что как правило, на практике встречаются МУПМВ с распределенными параметрами  $Z_{\mu\text{п}}$ ,  $C_{\mu\text{п}}$  и  $f_{Z_{\mu\text{п}}}$  или  $Z_{\mu\text{п}}$ ,  $C_{\mu\text{п}}$  и  $f_{C_{\mu\text{п}}}$ .

При анализе магнитных цепей МУПМВ приняты следующие, допустимые для подобных магнитных цепей, допущения: 1) пренебрегается нелинейность характеристик намагничивания магнитоупругого материала, т.е. считается, что магнитная цепь линейная; 2) пренебрегается магнитные потоки выпучивания на концах и на боковых гранях магнитопроводов; 3) считается, что магнитное поле в воздушном зазоре между ферромагнитными сердечниками, в частности, между коаксиально или соосно расположенными кольцевыми магнитоупругими магнитопроводами плоскопараллельное; 4) погонные значения параметров  $Z_{\mu\text{п}}$ ,  $C_{\mu\text{п}}$ ,  $f_{Z_{\mu}}$  и  $f_{C_{\mu}}$  цепи постоянны по рассматриваемой координате; 5) ферромагнитные сердечники и обмотки возбуждения, в том числе соосно расположенные кольцевые магнитопроводы взаимно идентичны.

При исследовании магнитных цепей МУПМВ использован классический метод составления и решения дифференциальных уравнений, как наиболее удобный и точный при расчете цепей с распределенными параметрами.

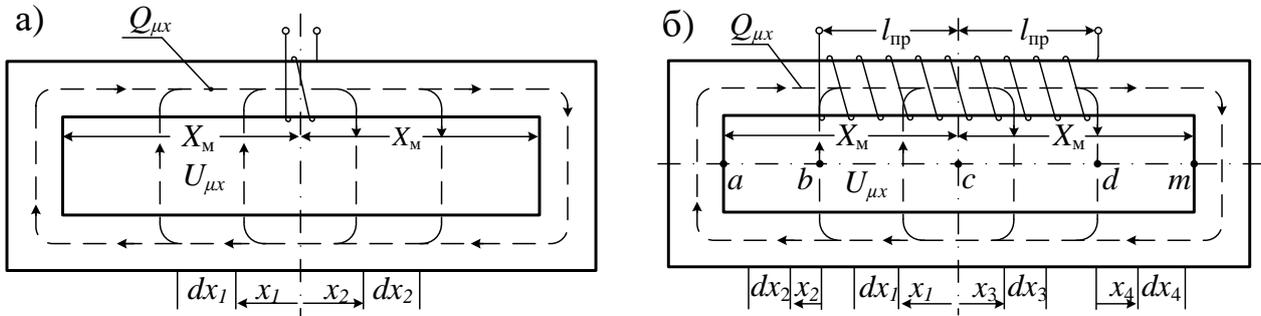
Составлены и решены дифференциальные уравнения для магнитного напряжения ( $U_{\mu x}$ ) и магнитного потока ( $Q_{\mu x}$ ) магнитных цепей МУПМВ с распределенными магнитными сопротивлениями длинных ферромагнитных стержней, магнитной емкости зазора между ними и сосредоточенной продольной обмоткой возбуждения, размещенной на середине одного или на обеих длинных стержнях (рис.7, а), и получены следующие выражения:

$$\dot{U}_{\mu x_{1(2)}}^* = \frac{\dot{F}_B}{2\Delta_1^*} \left[ sh \left[ \underline{\beta} (1 - x_{1(2)}^*) \right] + \underline{\beta} \underline{k}_1 ch \left[ \underline{\beta} (1 - x_{1(2)}^*) \right] \right], \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{\mu x_{1(2)}}^* = \frac{\underline{\beta} \dot{F}_B}{2Z_{\mu\pi} X_M \Delta_1^*} \left[ ch \left[ \underline{\beta} (1 - x_{1(2)}^*) \right] + \underline{\beta} \underline{k}_1 sh \left[ \underline{\beta} (1 - x_{1(2)}^*) \right] \right], \quad (10)$$

здесь  $\dot{F}_B$  – магнитодвижущая сила (МДС) обмотки возбуждения, [A];

$\Delta_1^* = sh \underline{\beta} + \underline{\beta} \underline{k}_1 ch \underline{\beta}$ , [-];  $\underline{\beta} = \underline{\gamma} X_M$ , [-];  $\underline{k}_1 = Z_{\mu T} / (2Z_{\mu\pi} X_M)$ , [-];



**Рис. 7. Конструктивные схемы магнитных цепей МУПМВ с сосредоточенной (а) и распределенной (б) продольной обмоткой возбуждения:**  $Q_{\mu x}$ ,  $U_{\mu x}$  – магнитный поток в стержнях и магнитное напряжение между ними;  $x_1 \div x_4$  и  $X_M$  – координаты и полудлина стержней;  $l_{пр}$  – полудлина распределенной обмотки;  $a, b, c, d$  – точки, определяющие границы соответствующих участков магнитной цепи

$\underline{\gamma} = \sqrt{2Z_{\mu\pi} C_{\mu\pi}}$ , [ $m^{-1}$ ] – соответственно коэффициенты затухания и распространения магнитного поля в магнитной цепи;  $Z_{\mu T}$ , [H] – магнитное сопротивление торцевой части магнитопровода;  $Z_{\mu\pi}$ , [ $H^{-1} \cdot m^{-1}$ ];  $C_{\mu\pi}$ , [ $H \cdot m^{-1}$ ] – погонные значения магнитных сопротивлений длинных ферромагнитных стержней и магнитной емкости зазора между ними, приходящиеся на единицу длины магнитной цепи;  $x_1^* = x_1/X_M$ ;  $x_2^* = x_2/X_M$  – координаты в относительных единицах;  $X_M$ , [m] – полудлина стержней. Обозначение 1(2) в индексах координат означает, что соответствующее выражение справедливо для участков с координатами  $x_1^*$  и  $x_2^*$ .

При выводе выражений (9) и (10) граничными условиями были следующие уравнения: 1)  $\dot{Q}_{\mu x_1=0} = \dot{Q}_{\mu x_2=0}$ ; 2)  $\dot{U}_{\mu x_1=0} + \dot{U}_{\mu x_2=0} = \dot{F}_B$ ; 3)  $\dot{U}_{\mu x_1=X_M} = Z_{\mu T} \dot{Q}_{\mu x_1=X_M}$ ; 4)  $\dot{U}_{\mu x_2=X_M} = Z_{\mu T} \dot{Q}_{\mu x_2=X_M}$ .

Анализ выражений (9) и (10) показал, что в магнитных цепях МУПМВ с распределенными параметрами  $Z_{\mu\pi}$ ,  $C_{\mu\pi}$  и с сосредоточенной обмоткой возбуждения, размещенными на середине длинных стержнях, магнитное напряжение и магнитный поток имеет максимальное значение в сечении магнитопровода, где установлена обмотка возбуждения и они уменьшаются в сторону торцевых частей, причем скорость уменьшения магнитного потока значительно меньше скорости уменьшения магнитного напряжения.

Предложена методика анализа магнитных цепей МУПМВ с распределенными параметрами  $Z_{\mu\pi}$ ,  $C_{\mu\pi}$  и  $f_{Z_\mu}$  (рис.7. б), суть которой сводится в следующем: магнитная цепь с распределенными параметрами расчленяется на характерные участки, составляются дифференциальные уравнения для каждого

участка магнитной цепи и они совместно решаются с учетом граничных условий. Особенностью предложенной методики анализа заключается в том, что расчленение магнитной цепи на характерные участки и составление уравнений на их границе исходят из равенства нулю значения магнитного напряжения или магнитного потока на магнитной нейтрали цепи.

С помощью вышеописанной методики анализа получены следующие выражения для магнитного напряжения и магнитного потока магнитных цепей МУПМВ с распределенными параметрами  $Z_{\mu\text{п}}$ ,  $C_{\mu\text{п}}$  и  $f_{Z_{\mu}}$ :

$$\dot{U}_{\mu x_{1(3)}}^* = \frac{X_M \dot{f}_{Z_{\mu}}}{\underline{\beta} \underline{\Delta}_1^*} \left\{ \text{sh} \left[ \underline{\beta} (1 - l_{\text{пр}}^*) \right] + \underline{\beta} \underline{k}_1 \text{ch} \left[ \underline{\beta} (1 - l_{\text{пр}}^*) \right] \right\} \text{sh} (\underline{\beta} x_1^*), \quad (11)$$

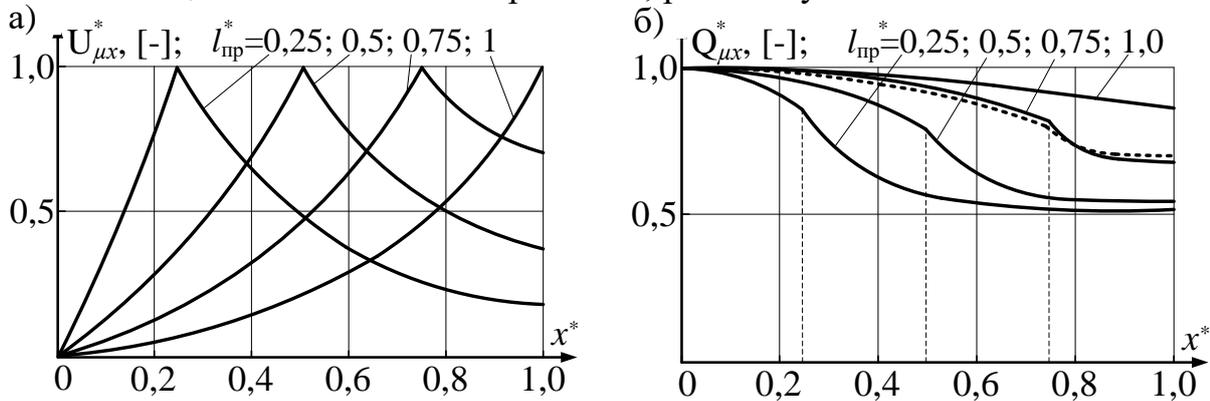
$$\dot{Q}_{\mu x_{1(3)}}^* = - \frac{X_M \dot{f}_{Z_{\mu}}}{2 \underline{Z}_{\mu} \underline{\Delta}_1^*} \left\{ \left\{ \text{sh} \left[ \underline{\beta} (1 - l_{\text{пр}}^*) \right] + \underline{\beta} \underline{k}_1 \text{ch} \left[ \underline{\beta} (1 - l_{\text{пр}}^*) \right] \right\} \text{ch} (\underline{\beta} x_1^*) - \underline{\Delta}_1^* \right\}, \quad (12)$$

$$\dot{U}_{\mu x_{2(4)}}^* = \frac{X_M \dot{f}_{Z_{\mu}} \text{sh} (\underline{\beta} l_{\text{пр}}^*)}{\underline{\beta} \underline{\Delta}_1^*} \left\{ \text{sh} \left[ \underline{\beta} (1 - l_{\text{пр}}^* - x_2^*) \right] + \underline{\beta} \underline{k}_1 \text{ch} \left[ \underline{\beta} (1 - l_{\text{пр}}^* - x_2^*) \right] \right\}, \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{\mu x_{2(4)}}^* = \frac{X_M \dot{f}_{Z_{\mu}} \text{sh} (\underline{\beta} l_{\text{пр}}^*)}{2 \underline{Z}_{\mu} \underline{\Delta}_1^*} \left\{ \text{ch} \left[ \underline{\beta} (1 - l_{\text{пр}}^* - x_2^*) \right] + \underline{\beta} \underline{k}_1 \text{sh} \left[ \underline{\beta} (1 - l_{\text{пр}}^* - x_2^*) \right] \right\}, \quad (14)$$

здесь  $l_{\text{пр}}^* = l_{\text{пр}}/X_M$ ;  $x_{1(3)}^* = x_{1(3)}/X_M$ ;  $0 \leq x_{1(3)}^* \leq l_{\text{пр}}^*$ ;  $x_{2(4)}^* = x_{2(4)}/X_M$ ;  $0 \leq x_{2(4)}^* \leq (1 - l_{\text{пр}}^*)$ ;  $l_{\text{пр}}$  - полудлина распределенной обмотки;  $\underline{Z}_{\mu} = \underline{Z}_{\mu\text{п}} X_M$ ,  $[H^{-1}]$ . С учетом того, что  $x_1^* = -x_3^*$  и  $x_2^* = -x_4^*$ , то  $\dot{U}_{\mu x_1^*} = -\dot{U}_{\mu x_3^*}$  и  $\dot{U}_{\mu x_2^*} = -\dot{U}_{\mu x_4^*}$ .

Анализ выражений (11)-(14) и их кривых (рис.8) показал, что в подобных магнитных цепях магнитное напряжение, равная нулю в сечение магнитной



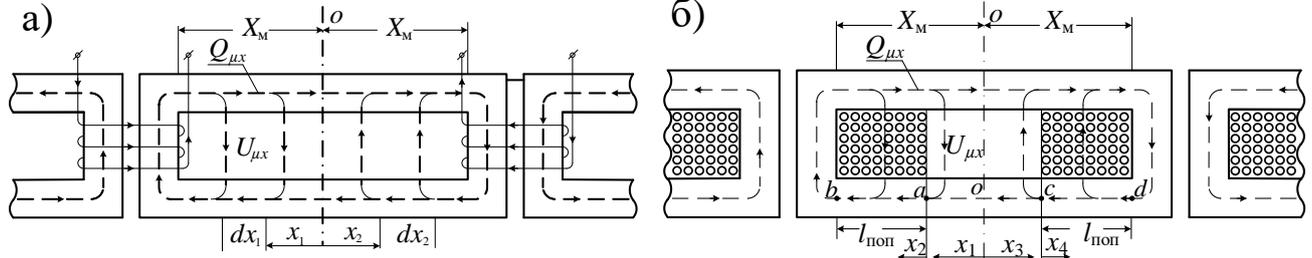
**Рис. 8. Графики функции  $U_{\mu x}^* = f(x^*)$  (а) и  $Q_{\mu x}^* = f(x^*)$  (б) для одной половины магнитной цепи МУПМВ с распределенными параметрами  $Z_{\mu\text{п}}$ ,  $C_{\mu\text{п}}$ ,  $f_{Z_{\mu}}$  при различных длины распределенной обмотки  $l_{\text{пр}}^*$**

нейтрали цепи, увеличивается до границы распределенной обмотки, а магнитный поток – уменьшается, при этом с увеличением длины распределенной обмотки, максимальное значение магнитного напряжения смещается от магнитной нейтрали в торцевую часть магнитной цепи.

Установлено, что расхождение теоретических и экспериментальных результатов составляет  $8 \div 11$  %, а учет распределенности обмоток возбуждения

позволяет снизить погрешность расчета на 3÷5 %.

В работе исследованы магнитные цепи МУПМВ с сосредоточенными секциями обмотки возбуждения (рис.9, а). Получены следующие выражения магнитного напряжения и магнитного потока при последовательно-согласном (п-с) и последовательно-встречном (п-в) включении между собой секции обмотки возбуждения с учетом того, что  $x_1^* = -x^*$  и  $x_2^* = x^*$ :



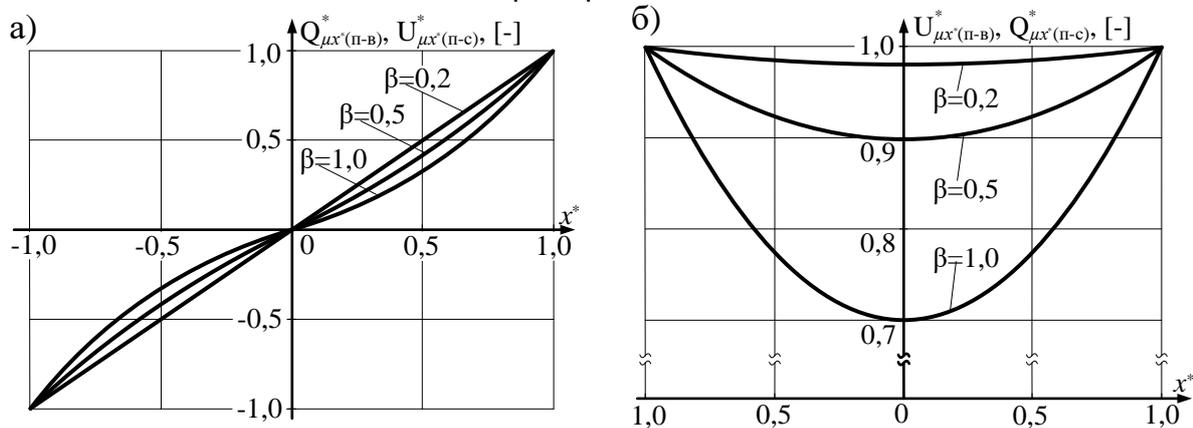
**Рис. 9. Конструктивные схемы магнитных цепей МУПМВ с сосредоточенной (а) и распределенной (б) поперечной обмоткой возбуждения:  $l_{\text{поп}}^* = l_{\text{поп}}/X_M$ ;  $l_{\text{поп}}$  – ширина поперечно распределенной обмотки**

$$\dot{U}_{\mu x^* (\text{п-с})} = \frac{2\dot{F}_B Z_{\mu}}{\Delta_1} \text{sh}(\beta x^*), \quad (15) \quad \dot{Q}_{\mu x^* (\text{п-с})} = \frac{\beta \dot{F}_B}{\Delta_1} \text{ch}(\beta x^*), \quad (16)$$

$$\dot{U}_{\mu x^* (\text{п-в})} = \frac{2\dot{F}_B Z_{\mu}}{\Delta_2} \text{ch}(\beta x^*), \quad (17) \quad \dot{Q}_{\mu x^* (\text{п-в})} = \frac{\beta \dot{F}_B}{\Delta_2} \text{sh}(\beta x^*), \quad (18)$$

здесь  $\Delta_1 = 2Z_{\mu} \text{sh} \beta + \beta Z_{\mu T} \text{ch} \beta$ ,  $[\text{H}^{-1}]$ ;  $\Delta_2 = 2Z_{\mu} \text{ch} \beta + \beta Z_{\mu T} \text{sh} \beta$ ,  $[\text{H}^{-1}]$ .

Анализ полученных функций (15)-(18) и их кривых (рис.10) для магнитного напряжения и магнитного потока в магнитной цепи МУПМВ с распределенными параметрами  $Z_{\mu \text{п}}$ ,  $C_{\mu \text{п}}$  и с двумя секциями последовательно-



**Рис. 10. Графики функции  $U_{\mu x^*}^* = f(x^*)$  (а) и  $Q_{\mu x^*}^* = f(x^*)$  (б) для последовательно-согласно (п-с) и последовательно-встречно (п-в) включенных секциях обмотки возбуждения при разных значениях  $\beta$**

согласно (последовательно-встречно) включенных секций обмотки возбуждения, расположенными сосредоточенно на перемычках у торцов длинных стержней, показывает, что магнитное напряжение (магнитный поток) в сечение магнитной нейтрали магнитной цепи равно нулю, магнитный поток и магнитное напряжение имеют максимальное значение у торцов магнитопровода, они распределены по длине магнитной цепи нелинейно и с

увеличением значения коэффициента затухания магнитного поля в магнитной цепи  $\beta$  степень этой нелинейности возрастает.

Получены следующие выражения для магнитных напряжения и потока магнитных цепей с распределенными  $Z_{\mu\text{п}}$ ,  $C_{\mu\text{п}}$  и  $f_{C_{\mu}}$  (рис.9, б):

$$\dot{U}_{\mu x_{1(3)}^*} = \frac{[\underline{\beta}\dot{F}_B - \dot{f}_{C_{\mu}} X_M \text{sh}(\underline{\beta}l_{\text{поп}}^*)] + \underline{\beta}\dot{f}_{C_{\mu}} X_M \underline{k}_1 [1 - \text{ch}(\underline{\beta}l_{\text{поп}}^*)]}{\underline{\beta}\underline{\Delta}_1^*} \text{sh}(\underline{\beta}x_{1(3)}^*), \quad (19)$$

$$\dot{Q}_{\mu x_{1(3)}^*} = \frac{[\underline{\beta}\dot{F}_B - \dot{f}_{C_{\mu}} X_M \text{sh}(\underline{\beta}l_{\text{поп}}^*)] + \underline{\beta}\dot{f}_{C_{\mu}} X_M \underline{k}_1 [1 - \text{ch}(\underline{\beta}l_{\text{поп}}^*)]}{2\underline{\Delta}_1^* \underline{Z}_{\mu}} \text{ch}(\underline{\beta}x_{1(3)}^*), \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\mu x_{2(4)}^*} = & \frac{(\dot{F}_B + \dot{f}_{C_{\mu}} X_M \underline{k}_1)}{\underline{\Delta}_1^*} \text{sh}[\underline{\beta}(1 - l_{\text{поп}}^* + x_{2(4)}^*)] - \frac{\dot{f}_{C_{\mu}} X_M (1 + \underline{\beta}\underline{k}_1)}{\underline{\beta}\underline{\Delta}_1^*} \text{sh}[\underline{\beta}(1 - l_{\text{поп}}^*)] \\ & \cdot \{ \text{sh}[\underline{\beta}(l_{\text{поп}}^* - x_{2(4)}^*)] + \text{ch}[\underline{\beta}(l_{\text{поп}}^* - x_{2(4)}^*)] \}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\mu x_{2(4)}^*} = & \frac{\underline{\beta}(\dot{F}_B + \dot{f}_{C_{\mu}} X_M \underline{k}_1)}{2\underline{\Delta}_1^* \underline{Z}_{\mu}} \text{ch}[\underline{\beta}(1 - l_{\text{поп}}^* + x_{2(4)}^*)] + \frac{\dot{f}_{C_{\mu}} X_M (1 + \underline{\beta}\underline{k}_1)}{2\underline{\Delta}_1^* \underline{Z}_{\mu}} \text{sh}[\underline{\beta}(1 - l_{\text{поп}}^*)] \cdot \\ & \cdot \{ \text{sh}[\underline{\beta}(l_{\text{поп}}^* - x_{2(4)}^*)] + \text{ch}[\underline{\beta}(l_{\text{поп}}^* - x_{2(4)}^*)] \}, \end{aligned} \quad (22)$$

здесь  $l_{\text{поп}}^* = l_{\text{поп}}/X_M$ ;  $l_{\text{поп}}$  – ширина поперечно распределенной обмотки.

Анализ выражений (19)-(22) показал, что в подобных магнитных цепях МУПМВ законы распределения магнитных напряжений и магнитных потоков вдоль магнитной цепи практически не отличаются от законов распределения этих величин для цепей с сосредоточенными секциями обмоток возбуждения.

Установлено, учет распределенности поперечных обмоток возбуждения позволяет снизить погрешность расчета лишь на 1,5÷2,0 %.

В диссертации разработаны математические модели нелинейных магнитных цепей МУПМВ с учетом влияния механических напряжений на магнитной характеристики магнитоупругих материалов. При этом в качестве аппроксимирующей функции выбрана функция в виде двухчленного степенного полинома  $H = pV + qV^3$  (здесь  $p, q$  – коэффициенты аппроксимации) как наиболее простой и в тоже время достаточно точной аппроксимирующей функцией для инженерных расчетов.

Получено следующее дифференциальное уравнение, представляющее общую математическую модель нелинейных магнитных цепей МУПМВ:

$$\frac{d^2 \dot{Q}_{\mu x}}{dx^2} - m \dot{Q}_{\mu x} - n \dot{Q}_{\mu x}^3 = -C_{\mu\text{п}} (\dot{f}_{Z_{\mu}} + \dot{f}_{C_{\mu}}), \quad (23)$$

здесь  $m = 2pC_{\mu\text{п}}S_{\mu}^{-1}$ ,  $[m^{-2}]$ ;  $n = 2qC_{\mu\text{п}}S_{\mu}^{-3}$ ,  $[Wb^{-2} \cdot m^{-2}]$ ;  $S_{\mu}$  – сечение длинных стержней магнитопровода,  $[m^2]$ .

В работе решено уравнение (15) итерационным методом для исследуемых магнитных цепей МУПМВ. В частности, для магнитных цепей с продольно и поперечно распределенными обмотками возбуждения следующие результаты:

$$\dot{Q}_{\mu x} = \frac{1}{m} \cdot \frac{\underline{\gamma}^3 \dot{f}_{Z_{\mu}}}{2\underline{Z}_{\mu\text{п}}\underline{\Delta}_1} \text{ch}(\underline{\gamma}x) - \frac{n}{m} \left[ \frac{\underline{\gamma} \dot{f}_{Z_{\mu}}}{2\underline{Z}_{\mu\text{п}}\underline{\Delta}_1} \text{ch}(\underline{\gamma}x) + C_{\mu\text{п}} \dot{f}_{Z_{\mu}} \right]^3 + \frac{1}{m} C_{\mu\text{п}} \dot{f}_{Z_{\mu}}. \quad (24)$$

$$\dot{Q}_{\mu x} = \frac{1}{m} K_1 \text{ch}(\underline{\gamma}x) - \frac{n}{m} K_1^3 \text{ch}^3(\underline{\gamma}x) + \frac{1}{m} C_{\mu\text{п}} \dot{f}_{Z_{\mu}}, \quad (25)$$

здесь  $K_1 = \frac{\underline{\gamma}}{2\underline{Z}_{\mu\text{п}}\underline{\Delta}_1} (2\dot{F}_B \underline{Z}_{\mu\text{п}} + \dot{f}_{C_{\mu}} \underline{Z}_{\mu\text{т}})$ , [Wb].

Отметим, что учет нелинейности характеристик намагничивания слабо насыщенных материалов позволяет снизить погрешность расчета до 2,5 %.

Получены следующие выражения математических моделей для нового МУП параметров вибрации в виде зависимости магнитного потока от амплитуды и частоты вибрации:

$$Q_{\mu 1(2)} = Q_{\mu 0} + \Delta Q_{\mu 1m} \sin \Omega t, \quad (26) \quad Q_{\mu 3(4)} = Q_{\mu 0} - \Delta Q_{\mu 2m} \sin \Omega t, \quad (27)$$

здесь  $Q_{\mu 0} = (2F_B)/W_{\mu 0}$ ;  $W_{\mu 0}$  – значение магнитных потоков в основных стержнях и их магнитной жесткости при отсутствии вибрации;  $\Delta Q_{\mu 1m} = [2F_B \Delta W_{\mu 2}(U_M)] / (5W_{\mu 0}^2)$ ,  $\Delta Q_{\mu 2} = [2F_B \Delta W_{\mu 1}(U_M)] / (5W_{\mu 0}^2)$ ;  $\Delta W_{\mu 2}(U_M)$ ,  $\Delta W_{\mu 1}(U_M)$  – амплитудные значения магнитных потоков в соответствующих стержнях и изменения их магнитных жесткостей, модулированных механическим усилием  $U_M$  под воздействием вибрации.

В пятой главе «**Исследование основных характеристик магнитоупругих преобразователей механических величин**» изучены статические, динамические характеристики, погрешность и надежность разработанных МУМУПМВ, а также приведены их основные технические характеристики.

Получены выражения статических характеристик новых МУП усилий, вибрационных ускорений, угловых перемещений, скорости и ускорения. В частности, уравнение статической характеристики нового МУП растягивающих усилий с продольно распределенными обмотками возбуждения имеет следующий вид:

$$\dot{E}_{\text{вых}} = j\omega_{\text{э}} W_{\text{вых.уд.}} \left\{ \left\{ \frac{X_M \dot{f}_{Z_{\mu}} \Delta_{3p}^*(U_M) \text{sh} \left[ \underline{\beta}_p(U_M) l_{\text{пр}}^* \right]}{2\underline{Z}_{\mu\text{р}}(U_M) \Delta_{1p}^*(U_M)} - \Delta_{1p}^*(U_M) \right\} - \left\{ \frac{X_M \dot{f}_{Z_{\mu}} \Delta_{3c}^*(U_M) \text{sh} \left[ \underline{\beta}_c(U_M) l_{\text{пр}}^* \right]}{2\underline{Z}_{\mu\text{с}}(U_M) \Delta_{1c}^*(U_M)} - \Delta_{1c}^*(U_M) \right\} \right\}, \quad (28)$$

здесь  $\Delta_{3p}^*(U_M) = \text{sh} \left[ \underline{\beta}_p(U_M) (1 - l_{\text{пр}}^*) \right] + \underline{\beta}_p(U_M) \underline{k}_{1p}(U_M) \text{ch} \left[ \underline{\beta}_p(U_M) (1 - l_{\text{пр}}^*) \right]$ ;

$\Delta_{3c}^*(U_M) = \text{sh} \left[ \underline{\beta}_c(U_M) (1 - l_{\text{пр}}^*) \right] + \underline{\beta}_c(U_M) \underline{k}_{1c}(U_M) \text{ch} \left[ \underline{\beta}_c(U_M) (1 - l_{\text{пр}}^*) \right]$ ;

$\underline{\beta}_p(U_M) = \underline{\gamma}_p(U_M) X_M$ ;  $\underline{\beta}_c(U_M) = \underline{\gamma}_c(U_M) X_M$ ;  $\underline{\gamma}_p(U_M) = \sqrt{2\underline{Z}_{\mu\text{рп}}(U_M) C_{\mu\text{п}}}$ ;

$\underline{\gamma}_c(U_M) = \sqrt{2\underline{Z}_{\mu\text{сп}}(U_M) C_{\mu\text{п}}}$ ;  $\underline{Z}_{\mu\text{рп}}(U_M) = \left[ \underline{\mu}_{\text{р.б.п.}}(U_M) \mu_0 S_{\mu} \right]^{-1}$ ;

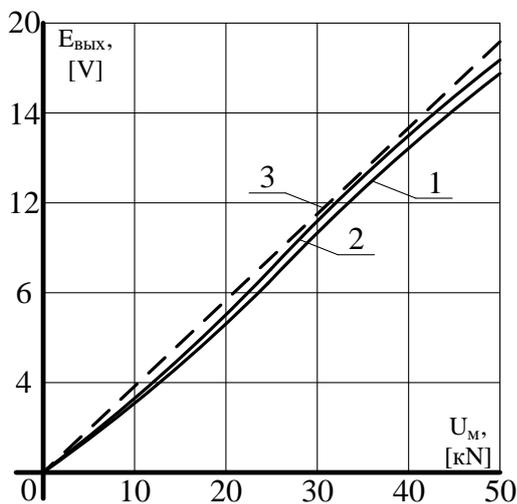
$Z_{\mu\text{сп}}(U_M) = [\mu_{\text{с.б.п.}}(U_M)\mu_0 S_\mu]^{-1}$ ;  $Z_{\mu\text{р}}(U_M) = Z_{\mu\text{рп}}(U_M)X_M$ ;  $Z_{\mu\text{с}}(U_M) = Z_{\mu\text{сп}}(U_M)X_M\mu_{\text{р.б.п.}}$ ;  
 $\mu_{\text{с.б.п.}}$  – соответственно значения коэффициентов затухания, распространения магнитного поля, погонных, полных магнитных сопротивлений и относительных магнитных проницаемостей растягивающиеся (р) и сжимающиеся (с) участков магнитной цепи МУП;  $k_{1\text{р}} = Z_{\mu\text{т}}(U_M)/2Z_{\mu\text{р}}(U_M)$ ;  $k_{1\text{с}} = Z_{\mu\text{т}}(U_M)/2Z_{\mu\text{с}}(U_M)$  – коэффициенты.

Статические характеристики новых МУПМВ (рис.11) имеют практически линейный характер, а учет в расчетах распределенности обмоток позволяет снизить погрешность расчета статических характеристик на 3÷8 %.

Динамические характеристики МУПМВ исследованы при скачкообразном и синусоидальном входном воздействиях, а также при подключении обмотки возбуждения МУП к источнику синусоидального напряжения, когда на преобразователь действует постоянное входное воздействие. При подаче на вход МУП скачкообразного входного воздействия, переходное напряжение, выражение которого приведено ниже, состоит из суммы синусоидальной вынужденной составляющей, изменяющейся с частотой, равной частоте тока возбуждения и свободной аperiодической составляющей, затухающее в зависимости от параметров магнитной цепи:

$$U_{\text{э.вых}}(t) = U_{\text{э.вын.т}} \sin(\omega_3 t + \varphi_1) - U_{\text{э.св.}} e^{-\frac{t}{T_\mu}} = u_{\text{э.вын.}}(t) - u_{\text{э.св.}}(t), \quad (29)$$

здесь  $U_{\text{э.вын.т}} = 2k_2 U_M I_{\text{эвт}} (\sqrt{1 + \omega_3^2 T_\mu^2})^{-1}$ ;  $U_{\text{э.св.}} = 2k_2 U_M \omega_3 T_\mu I_{\text{эвт}} (1 + \omega_3^2 T_\mu^2)$  – амплитудное значение вынужденного составляющего и значение свободного составляющего при  $t = 0$  переходного напряжения;



**Рис. 11. Статические характеристики разработанных МУП:**

- 1, 2 – соответственно без и с учетом распределенного характера обмоток;
- 3 – экспериментальная характеристика

$\varphi_1 = 90^\circ + \arctg(\omega_3 T_\mu)$  – угол сдвига фаз между вынужденной составляющей переходного напряжения и тока возбуждения;  $k_2, [H \cdot N^{-1}]$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров механической, электрической и магнитной цепей;  $I_{\text{эвт}}$ ,  $\omega_3$  – амплитуда и круговая частота тока возбуждения;  $T_\mu = R_\mu C_{\mu\Sigma.\text{ср}}$ ;  $R_\mu$ ;  $C_{\mu\Sigma.\text{ср}}$  – соответственно постоянная времени, активное магнитное сопротивление и среднее значение общей емкости магнитной цепи МУП.

Установлено, что при подаче на вход МУП усилий синусоидального воздействия, переходное напряжение (рис.12, а) состоит из суммы

косинусоидальных двух вынужденных составляющих одинаковых амплитуд, частоты которых равны соответственно разнице и сумме частот тока возбуждения и входного воздействия, и свободной составляющей,

изменяющейся с частотой тока возбуждения и затухающей в зависимости от параметров магнитной цепи МУП. При этом выражение переходного напряжения имеет следующий вид:

$$U_{\text{Э.ВЫХ}}(t) = U_{\text{Э.ВЫН.}m} \cos[(\omega_{\text{Э}} - \Omega_{\text{М}})t + \varphi_2] + U_{\text{Э.ВЫН.}m} \cos[(\omega_{\text{Э}} + \Omega_{\text{М}})t + \varphi_2] - U_{\text{Э.СВ.}m} e^{-\frac{t}{T_{\mu}}} \cos \omega_{\text{Э}} t = u_{\text{Э.ВЫН.}1}(t) + u_{\text{Э.ВЫН.}2}(t) + u_{\text{Э.СВ}}(t), \quad (30)$$

здесь  $U_{\text{Э.ВЫН.}m} = 2k_2 U_{\text{М.}m} \omega_{\text{Э}} I_{\text{ЭВМ}} (\sqrt{1 + \Omega_{\text{М}}^2 T_{\mu}^2})^{-1}$ ;  $U_{\text{Э.СВ.}m} = 2k_2 U_{\text{М.}m} \omega_{\text{Э}} I_{\text{ЭВМ}} \Omega_{\text{М}} T_{\mu} \cdot (1 + \Omega_{\text{М}}^2 T_{\mu}^2)^{-1}$ ;  $U_{\text{М.}m}$ ,  $\Omega_{\text{М}}$  – амплитуда и частота механического усилия.

Установлено, что при подключении обмотки возбуждения МУП к источнику синусоидального напряжения, чувствительный элемент которого испытывает постоянное воздействие, переходное напряжение качественно повторяет переходное напряжение, когда на вход МУП, подключенного к источнику синусоидального напряжения, подается скачкообразное воздействие.

В работе исследованы динамические характеристики МУП параметров

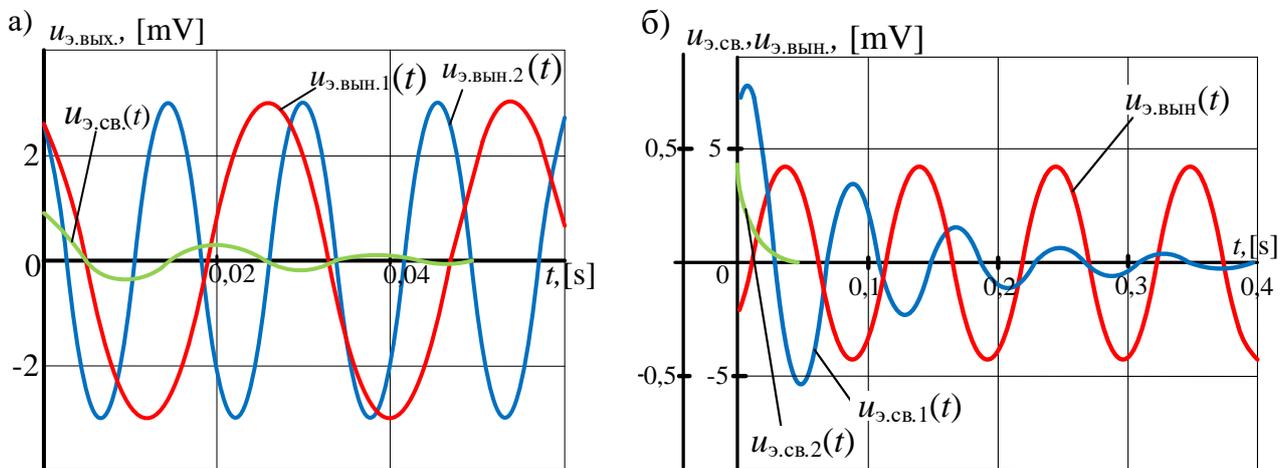


Рис. 12. Кривые переходных напряжений МУП усилия (а) и вибрационных ускорений (б) при подаче на их вход синусоидального воздействия

движения. В частности, при подаче на вход МУП вибрационного ускорения гармонического воздействия, в механической цепи которого коэффициент затухания ( $\delta_{\text{М}}$ ) меньше собственной частоты ( $\omega_{\text{М}}$ ), переходное напряжение, выражение которого приведены ниже, состоит из суммы гармонических вынужденного и свободного составляющих, а также аperiodического свободного составляющего. Вынужденная составляющая колеблется с частотой возмущающей силы, а ее амплитуда не зависит от начальных условий и времени. Скорость затухания гармонического свободного составляющего зависит от значения коэффициента затухания механической цепи, а скорость затухания аperiodического свободного составляющего – от постоянной времени магнитной цепи преобразователя (рис.12, б):

$$U_{\text{Э.ВЫХ}}(t) = U_{\text{Э.ВЫН.}m} \cos[\Omega_{\text{М}} t + 90^{\circ} - \varphi_{2\text{СВ}}] + U_{\text{Э.СВ.}m1} e^{-\delta_{\text{М}} t} \cos[\omega_{\text{М.СВ}} t - \varphi_{3\text{СВ}}] + U_{\text{Э.СВ.}m2} e^{-\frac{t}{T_{\mu}}} = u_{\text{Э.ВЫН.}}(t) + u_{\text{Э.СВ.}1}(t) + u_{\text{Э.СВ.}2}(t), \quad (31)$$

здесь  $U_{\text{Э.СВ.}m1} = \frac{K_5 \sqrt{\omega_{\text{М}}^4 + 4\delta_{\text{М}}^2 (\delta_{\text{М}}^2 - \omega_{\text{М}}^2)}}{2\sqrt{\delta_{\text{М}}^2 - \omega_{\text{М}}^2} \sqrt{4\delta_{\text{М}}^2 (\delta_{\text{М}}^2 + \omega_{\text{М}}^2) + (\omega_{\text{М}}^2 + \Omega_{\text{М}}^2)^2} \cdot \sqrt{(1 - \delta_{\text{М}} T_{\mu})^2 + T_{\mu}^2 (\delta_{\text{М}}^2 - \omega_{\text{М}}^2)}}$ ;

$$U_{\text{э.вын.м}} = \frac{K_5 \Omega_M}{\sqrt{1 + T_\mu^2 \Omega_M^2 \sqrt{(\Omega_M^2 - \omega_M^2)^2 + 4\delta_M^2 \Omega_M^2}}}; U_{\text{э.св.м2}} = \frac{K_5 T_\mu}{(1 + \omega_M^2 T_\mu^2)(T_\mu^2 \omega_M^2 - 2\delta_M T_\mu + 1)};$$

$\varphi_{2\text{св}} = \arctg \frac{2\delta_M \omega_{\text{м.св}}}{\Omega_M^2} + \arctg \frac{\omega_{\text{м.св}}(\omega_M^2 + \Omega_M^2)}{2\delta_M(\delta_M^2 - \omega_0^2)}$  – угол сдвига фаз между вынужденной составляющей переходного напряжения и входной измеряемой величины;  $\varphi_{3\text{св}} = \arctg \frac{T_\mu \omega_{\text{м.св}}}{1 - \delta_M T_\mu} + \arctg \frac{2\delta_M \Omega_M}{\Omega_M^2 - \omega_M^2} + \arctg \Omega_M T_\mu$  – начальная фаза свободного колебательного составляющего переходного напряжения;  $\omega_{\text{м.св}} = \sqrt{\omega_M^2 - \delta_M^2}$  – круговая частота свободных колебаний в механической цепи.

Установлено, что продолжительность переходного процесса у МУП силовых параметров (усилия и момента) определяется параметрами (магнитной емкостью и активным магнитным сопротивлением) магнитной цепи, а продолжительность переходного процесса у МУП параметров движения в основном определяется параметрами (активного сопротивления, индуктивности и емкости) механической цепи. Продолжительность переходного процесса МУП параметров движения в среднем восемь раз больше продолжительности переходного процесса МУП силовых параметров.

Исследование погрешности МУПМВ методом ПСС и анализ их источников показали, что существующими способами снижения погрешности составляющую погрешности МУП от нелинейности статической характеристики (1,5÷2,0 %) (сложением и вычитанием двух характеристик с нелинейностью одинакового знака) можно снизить до 0,2 %; от магнитоупругого гистерезиса (1,5÷2,0 %) (набором магнитопровода из отдельных пластин электротехнической стали, чередующихся с прокладками из высокоупругих материалов) – до 0,2 %; от изменения температуры окружающей среды (1,5÷2,5 %) (стабилизацией входного сопротивления МУП за счет коррекции ампер-витков возбуждения) – до 0,01 % на 10°C; от нестабильности параметров источника питания (до 1,5 %) (преобразованием высокостабильного постоянного напряжения в прямоугольные импульсы) – до 0,01 %.

Установлено, что к погрешностям МУП параметров движения, кроме тех составляющих погрешности, характерных для МУП силовых параметров, прибавляются составляющие погрешности преобразования измеряемого параметра движения в механическое усилие. В работе оценены эти погрешности. В частности, определены следующие выражения амплитудной ( $\gamma_{C_M(\Delta T)}$ ) и фазовой ( $\Delta\varphi_{C_M(\Delta T)}$ ) погрешности от температурной нестабильности механической емкости  $C_M$  и механического сопротивления  $R_M$ :

$$\gamma_{C_M(\Delta T)} = \frac{\Omega_M^2 [L_M (L_M C_M \Omega_M^2 - 1) + R_M^2 C_M] C_{M0} \alpha_W \Delta T}{(1 + \alpha_W \Delta T)^2 [(1 - L_M C_M \Omega_M^2)^2 + \Omega_M^2 (R_M C_M)^2]} \cdot 100 \%, \quad (32)$$

$$\Delta\varphi_{C_M(\Delta T)} = \frac{\Omega_M R_M (1 - L_M C_M \Omega_M^2)^2 C_{M0} \alpha_W \Delta T}{(1 + \alpha_W \Delta T)^2 [(1 - L_M C_M \Omega_M^2)^2 + \Omega_M^2 (R_M C_M)^2]}, \quad (33)$$

$$\gamma_{R_M(\Delta T)} = \frac{\Omega_M^2 C_M^2 R_M R_{M0} \alpha_R \Delta T}{(1 - L_M C_M \Omega_M^2)^2 + \Omega_M^2 (R_M C_M)^2}, \quad (34)$$

$$\Delta\varphi_{R_M(\Delta T)} = \frac{\Omega_M C_M (L_M C_M \Omega_M^2 - 1) R_{M0} \alpha_R \Delta T}{(1 - L_M C_M \Omega_M^2)^2 + \Omega_M^2 (R_M C_M)^2}, \quad (35)$$

здесь  $\alpha_W$  и  $\alpha_R$  – температурные коэффициенты соответственно упругости и механического сопротивления,  $[(^\circ\text{C})^{-1}]$ ;  $C_{M0}$ ,  $R_{M0}$  – значения соответственно  $C_M(\Delta T)$  и  $R_M(\Delta T)$  при нормальной температуре;  $\Delta T$  – изменение температуры,  $[^\circ\text{C}]$ ;  $L_M$  – индуктивность (масса) механической цепи,  $[kg]$ .

Проведенными теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что относительная погрешность разработанных МУП силовых параметров не превышает  $\pm 1,0\%$ , а МУП параметров движения –  $\pm 1,5\%$ .

В работе исследована надежность МУПМВ. Показано, что разработанные МУПМВ имеют высокие показатели надежности, в частности, вероятность безотказной работы МУП растягивающих усилий составляет 0,9673, что вполне удовлетворяет требованию систем контроля и управления по надежности.

В приложении диссертации приведены основные элементы энергоинформационной модели цепей различной физической природы и аппарата ПСС, технические характеристики межцепных ФТЭ и внутрицепных параметров, используемых при исследовании разработанных МУПМВ, описания полученных патентов на изобретение, свидетельств на программный продукт для ЭВМ, а также акты внедрения и справки об использовании результатов научных исследований в производство.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сравнительным анализом основных характеристик существующих преобразователей механических величин установлено, что благодаря большой выходной мощности, высокой надежности работы и стабильности характеристик в экстремальных условиях, отсутствия подвижных частей при измерении большинства механических величин магнитоупругие преобразователи (МУП) наиболее полно отвечают требованиям систем контроля и управления.

2. Показано, что при поисковом конструировании МУП энергоинформационным методом, разделение этапа морфологического анализа и синтеза преобразователей на отдельные подэтапы морфологического анализа и синтеза по параметрической структурной схеме и по каждому физико-техническому эффекту, позволяет увеличить количества синтезируемых вариантов и выбрать МУПМВ с требуемыми для систем контроля и управления характеристиками.

3. Разработаны общие принципы построения МУП механических величин в виде топограммы зависимостей между цепями различной физической природы, позволяющие объединить всевозможные варианты получения структурных реализаций этих преобразователей.

4. Разработаны новые конструкции МУП механических величин с расширенными функциональными возможностями, повышенной чувствительностью, надежностью и линейностью характеристик преобразования, в том числе разработаны впервые магнитоупругие

преобразователи, позволяющие измерять локальные усилия, угловые скорости и угловые ускорения.

5. Разработаны новые схемы источников питания для МУП механических величин с лучшим качеством стабилизации выпрямленного напряжения и с уменьшенным уровнем высших гармоник в выходном напряжении.

6. Разработана методика анализа МУП механических величин, одновременно учитывающая распределенный характер магнитных сопротивлений магнитоупругих сердечников, магнитные емкости между ними, а также распределенность продольных и поперечных обмоток возбуждения конечной длины.

7. Разработаны математические модели МУП механических величин с учетом распределенности параметров электромагнитной цепи и влияния механических напряжений на параметры магнитных характеристик магнитоупругих материалов.

8. Установлено, что при подаче на вход МУП усилий скачкообразного входного воздействия, переходное напряжение состоит из суммы синусоидальной вынужденной составляющей, изменяющейся с частотой, равной частоте тока возбуждения и свободной апериодической составляющей, затухающее в зависимости от параметров магнитной цепи.

9. Показано, что при подаче на вход МУП вибрационного ускорения, переходное напряжение состоит из суммы гармонических вынужденного и свободного составляющих, а также апериодического свободного составляющего, вынужденная составляющая колеблется с частотой возмущающей силы, ее амплитуда не зависит от начальных условий и времени, скорость затухания гармонического свободного составляющего зависит от значения коэффициента затухания механической цепи, а скорость затухания апериодического свободного составляющего – от постоянной времени магнитной цепи преобразователя.

10. Показано, что существующими способами можно снизить погрешности МУП от нелинейности статической характеристики ( $1,5 \div 2,0$  %) до 0,2 %; от магнитоупругого гистерезиса ( $1,5 \div 2,0$  %) – до 0,2 %; от изменения температуры окружающей среды ( $1,5 \div 2,5$  %) – до 0,01 % на  $10^\circ\text{C}$ ; от нестабильности параметров источника питания (до 1,5 %) – до 0,01 %.

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

---

**TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY**

**JURAYEVA KAMILA KOMILOVNA**

**MAGNETOELASTIC TRANSDUCERS FOR MEASURING MECHANICAL  
QUANTITIES FOR MONITORING AND CONTROL SYSTEMS**

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

**ABSTRACT OF THE DISSERTATION DOCTOR OF  
TECHNICAL SCIENCES**

**Tashkent-2025**

**The theme of the doctoral dissertation (DSc) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher Education, Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan in number B2022.3.DSc/T542.**

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.tstu.uz](http://www.tstu.uz)) and Information and educational portal «ZiyoNet» ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

**Scientific supervisor:**

**Amirov Sulton Fayzullaevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

**Official opponents:**

**Plaxtiev Anatoliy Mihaylovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

**Mamadjanov Alisher Mamadjanovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

**Jumaev Odil Abdujalilovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

**Leading organization:**

Tashkent university of information technologies  
named after Muhammad al-Khwarizmi

The defense will be take place on «31» may 2025 at 10<sup>00</sup> the meeting of the scientific council DSc.15/31.08.2022 T.73.07 Tashkent state transport university. (Address: 100167, Tashkent, str. Temiryo‘lchilar-1, tel.: (99871) 299-00-1; fax: (99871) 293-57-54; e-mail: rektorat@tstu.uz.)

The doctoral (DSc)dissertation can be reviewed at the Information-Resource Center of the Tashkent state transport university (Registered number 251). (Address: 100167, Tashkent, str. Temiryo‘lchilar-1, tel.: (99871) 299-00-1; fax: (99871) 293-57-54; e-mail: rektorat@tstu.uz.)

Abstract of the dissertation was distributed on «20» may 2025 year.

(mailing report №031 on «7» may 2025 year).

**R.V. Rahimov**

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 (abstract of DSc dissertation)**

**The aim of the research** is to further develop the theory, methods of exploratory design and the development of magnetically elastic transducers of mechanical quantities for monitoring and control systems.

**The object of the research** is magnetoelastic converters of mechanical quantities with enhanced functionality, increased sensitivity, reliability and linearity of conversion characteristics.

**The subject of the research** is electromagnetic processes in magnetically elastic converters of mechanical quantities and the development of their new designs with enhanced functionality, increased sensitivity, reliability and linearity of conversion characteristics, as well as the study of basic technical characteristics.

### **Research objectives:**

the study of converters of mechanical quantities at the present stage and the formulation of the basic requirements for them from the monitoring and control systems;

conducting a comparative analysis of the main characteristics of existing mechanical quantity converters, selecting and justifying the type of converter for monitoring and control systems;

development of methods for the exploratory design of magneto-elastic transducers of mechanical quantities;

development of general principles for the construction of magnetically elastic transducers of mechanical quantities;

development of mathematical models of magnetically elastic transducers of mechanical quantities, taking into account distributed excitation windings of finite length and the influence of mechanical stresses on the corresponding parameters of the magnetic characteristics of magnetically elastic materials;

development of new magnetoelastic converters of mechanical quantities and power sources for them with improved information and energy performance;

investigation of the main technical characteristics of the developed magneto-elastic transducers of mechanical quantities.

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

the energy-informational and morphological methods of searching for magnetoelastic converters of mechanical quantities at the stage of their morphological analysis and synthesis have been developed, which make it possible to increase the number of synthesized variants and select converters with the required characteristics.;

a general principle has been developed for constructing magnetically elastic transducers of mechanical quantities in the form of a topogram of dependencies between circuits of various physical nature, allowing combining all possible options for obtaining structural implementations of these transducers.;

new designs of magnetoelastic transducers of mechanical quantities with enhanced functionality, increased sensitivity, reliability and linearity of conversion characteristics have been developed, including for the first time magnetoelastic transducers allowing the measurement of local forces, angular velocities and accelerations;

new power supply circuits for magnetically elastic converters of mechanical quantities have been developed with the best quality of rectified voltage stabilization, with a reduced level of higher harmonics in the stabilized voltage;

a method for analyzing magnetically elastic transducers of mechanical quantities has been developed that simultaneously takes into account the distributed nature of the magnetic resistances of magnetically elastic cores, the magnetic capacitances between them, and the distribution of longitudinal and transverse excitation windings of finite length.;

mathematical models of magnetically elastic transducers of mechanical quantities have been developed taking into account the distribution of electromagnetic circuit parameters and the influence of mechanical stresses on the parameters of magnetic characteristics of magnetically elastic materials.

**Implementation of the research results.** Based on the results obtained on the development of magnetically elastic transducers of mechanical quantities:

a patent was obtained for an invention of the Agency for Intellectual Property under the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan (№. IAP 06441, 2021) for a magnetically elastic compressive force sensor. As a result, it became possible to measure local forces with high sensitivity and accuracy;

a patent was obtained for the invention of the Agency for Intellectual Property under the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan (№. IAP 07237, 2023) for a DC power supply. As a result, it became possible to provide magnetically elastic converters with a constant voltage power source with high-quality rectified voltage stabilization;

a patent was obtained for the invention of the Agency for Intellectual Property under the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan (№. IAP 07490, 2023) for a three-phase voltage stabilizer. As a result, it became possible to provide magnetoelastic converters with an AC power source having a reduced level of higher harmonics in a stabilized voltage;

a patent was obtained for the invention of the Agency for Intellectual Property under the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan (№. IAP 7715, 2024) for a magnetoelastic tensile force sensor, which made it possible to create a device for measuring tensile forces with high accuracy;

a patent was obtained for the invention of the Agency for Intellectual Property under the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan (№. IAP 7870, 2024) for a magnetoelastic transducer for measuring vibration parameters. As a result, it became possible to measure vibration parameters along two mutually perpendicular axes and obtain output signals from two independent separate measuring windings;

a patent was obtained for the invention of the Agency for Intellectual Property under the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan (№. IAP 7878, 2024) for a magnetoelastic converter of rotation parameters. As a result, it became possible to create a device that allows you to measure angular movements, speeds and accelerations;

A new magnetically elastic force converter device with enhanced functionality, high sensitivity, and reliability in extreme operating conditions has been introduced into the production process of diagnosing and monitoring the technical condition of

electric locomotive pantographs at the Uzbekiston depot of the Locomotive Operation Department of Joint Stock Company Temiryo‘linfratuzilma of the Joint Stock Company Uzbekistan Temir Yo‘llari was used (Certificate № 4/E503 dated April 10, 2025 of the Ministry of Transport of the Republic of Uzbekistan). As a result, an increase in the accuracy of diagnosis and monitoring of the technical condition of electric locomotive pantographs has been achieved, which helps to increase the service life of the contact wires of the contact suspension and avoid their failure.

**Structure and scope of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of references and applications. The volume of the dissertation is 199 pages.

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

**I бўлим (I часть; I part)**

1. Амиров С.Ф., Жураева К.К. Магнитоупругие датчики усилий для систем контроля и управления объектами железнодорожного транспорта// Монография. «Fan va texnologiya», Ташкент, 2019 – 162 с.

2. Патент РУз (UZ) № IAP 06441. Магнитоупругий преобразователь сжимающих усилий/ Амиров С.Ф., Файзуллаев Ж.С., Жураева К.К., Болтаев О.Т. // 2021 г. Официальный бюллетень. – № 3. 12.02.2021 г.

3. Патент РУз (UZ) № IAP 07715. Магнитоупругий преобразователь растягивающих усилий/ Амиров С.Ф., Жураева К.К., Файзуллаев Ж.С., Юлдашев Н.Р. // 2024 г. Официальный бюллетень. – № 6. 31.05.2024 г.

4. Патент РУз (UZ) № IAP 7870. Магнитоупругий преобразователь для измерения параметров вибрации/Амиров С.Ф., Жураева К.К., Файзуллаев Ж.С., Тураев Ш.Д. // 2024 г. Официальный бюллетень. – № 11. 12.11.2024 г.

5. Патент РУз (UZ) № IAP 7878. Магнитоупругий преобразователь параметров вращения / Амиров С.Ф., Жураева К.К., Файзуллаев Ж.С., Тураев Ш.Д. // 2024 г. Официальный бюллетень. – № 12. 27.11.2024 г.

6. Патент РУз (UZ) № IAP 07237. Источник питания постоянного напряжения / Амиров С.Ф., Бедрицкий И.М., Жураева К.К., Базаров Л.Х. // 2022 г. Официальный бюллетень. – № 1. 21.12.2022 г.

7. Патент РУз (UZ) № IAP 07490. Трехфазный стабилизатор напряжений/ Амиров С.Ф., Бедрицкий И.М., Базаров Л.Х., Жураева К.К. // 2023 г. Официальный бюллетень. – № 10. 21.09.2023 г.

8. Амиров С.Ф., Жураева К.К. Исследование погрешности разработанных датчиков измерения усилий// Всероссийский институт научной и технической информации (ВИНИТИ РАН) «ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление», Москва, 2019. - №7. - С.41-44 (05.00.00; №12).

9. Амиров С.Ф., Жураева К.К., Болтаев О.Т. Исследование магнитных цепей новых преобразователей усилий// Автоматизация. Современные Технологии. Ежемесячный межотраслевой научно-технический журнал. Том 74. 2020 - №1. - С.24-26 (05.00.00; №12).

10. Бедрицкий И.М., Жураева К.К. Оценка погрешностей расчета ферромагнитных элементов, используемых в параметрических стабилизаторах транспортных средств// Всероссийский институт научной и технической информации (ВИНИТИ РАН) “ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление”, Москва, 2020. - №6. - С.48-52 (05.00.00; №12).

11. Jurayeva K.K. Investigation of magnetic circuits of a magnetoelastic converter with magnetic fields of various frequencies// International Journal of Advanced Logistics, Transport and Engineering, 2022. №2 – P.20-25 (05.00.00; №12).

12. Bazarov L.X., Bedritsky I.M., Jurayeva K.K., Mirasadov M.S.

Approximation of magnetization curves of electrical steel // Вестник КазАТК, 2022 – №2(121). – С. 274-281 (05.00.00; №12).

13. Жураева К.К. Влияние посторонних магнитных полей на основные характеристики магнитоупругих преобразователей механических величин// Всероссийский институт научной и технической информации (ВИНИТИ РАН) «ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление», Москва, 2023 - №5. С.22-25 DOI:10.36535/0236-1914-2023-05-3 (05.00.00; №12).

14. Амиров С.Ф., Жураева К.К. Исследование динамических характеристик новых магнитоупругих датчиков усилий// “Мухаммад ал-Хоразмий авлодлари” илмий-амалий ва ахборот-тахлилий журнал. Тошкент, 2019 - №2(7)/2019. 109-112 б. (05.00.00; №10).

15. Амиров С.Ф., Жураева К.К., Болтаев О.Т. Исследование магнитных цепей с распределенными намагничивающими обмотками// ТошТЙМИ Ахбороти, Тошкент, 2019 – №1. – С.100-106 (05.00.00; №12).

16. Жураева К.К. Оценка влияния механических и магнитных свойств магнитных материалов на чувствительность магнитоупругого датчика// Железнодорожный транспорт: актуальные задачи и инновации. Ташкент, 2022 - №4. - С. 46-52 (05.00.00; №12)

17. Амиров С.Ф., Жураева К.К. Влияние магнитных свойств ферромагнетиков на точностные характеристики магнитоупругого преобразователя и их исследование методом степенных полиномов// Журнал Доклады Академии Наук Республики Узбекистан. Ташкент, 2022 - №3. - С. 53-57 (05.00.00; №12).

18. Амиров С.Ф., Жураева К.К. Исследование магнитной цепи магнитоупругого преобразователя механических величин// Журнал «Проблемы информатики и энергетики» Ташкент. 2022 - №1. - С.52-59 (05.00.00; №12).

19. Жураева К.К. Исследование влияния дестабилизирующих факторов на характеристики магнитоупругих преобразователей механических величин// “Развитие науки и технологий” Научно–технический журнал. Бухара. 2023 - №1. - С. 298-302 (05.00.00; №24).

20. Amirov S.F., Jurayeva K.K. Influence of magnetomechanical properties of ferromagnetic materials on the sensitivity of a magnetoelastic sensor// Chemical technology. Control and Management International Scientific and Technical Journal, Tashkent. 2023 - №1(109). P.19-24 (05.00.00; №12).

21. Жураева К.К. Конструкция нового магнитоупругого преобразователя локальных механических усилий// Железнодорожный транспорт: актуальные вопросы и инновации. 2023 - №4. - С. 61-65 (05.00.00; №12).

22. Жураева К.К. Анализ и классификация существующих магнитоупругих преобразователей механических величин// Железнодорожный транспорт: актуальные вопросы и инновации. 2023 - №4. - С. 127-132 (05.00.00; №12).

23. Amirov S.F., Jurayeva K.K. Research of the basic characteristics of the new magnetic elastic force sensors// E3S Web of Conferences 139, 01084 (2019) RSES 2019, P-5. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901084> (Scopus, SJR 0.182).

24. Jurayeva K.K., Fayzullayev J.S., Mukhtorov U.B. Flow distribution in magnetic circuits of measuring transducers with distributed parameters and a

concentrated longitudinal excitation winding// Chemical technology. Control and Management International Scientific and Technical Journal, Tashkent. 2024 - №5-6(109). P.9-17 (05.00.00; №12).

25. Fayzullayev J.S., Jurayeva K.K., Mukhtorov U.B. Investigation of magnetic circuits of measuring transducers with a distributed longitudinal excitation winding// Chemical technology. Control and Management International Scientific and Technical Journal, Tashkent. 2024 - №5-6(109). P.68-78 (05.00.00; №12).

26. Амиров С.Ф., Жураева К.К. Принципы построения магнитоупругих преобразователей механических величин// “Железнодорожный транспорт: актуальные задачи и инновации”, 2024, №3. – С.162-172 (05.00.00; №12).

27. Амиров С.Ф., Жураева К.К. Методика поискового конструирования магнитоупругих преобразователей механических величин// “Железнодорожный транспорт: актуальные задачи и инновации”, 2024, №4. – С. 23-31 (05.00.00; №12).

28. Амиров С.Ф., Жураева К.К. Погрешности новых магнитоупругих преобразователей механических величин// Железнодорожный транспорт: актуальные вопросы и инновации. 2025 - №1. - С. 56-68 (05.00.00; №12).

29. Амиров С.Ф., Жураева К.К., Тураев Ш.Д. Математические модели магнитоупругих преобразователей для измерения параметров вибрации// Железнодорожный транспорт: актуальные вопросы и инновации. 2025 - №2. - С. 6-14 (05.00.00; №12).

30. Amirov S.F., Jurayeva K.K. Investigation of dynamic characteristics of new magneto-elastic transducers of mechanical quantities// Chemical technology. Control and Management International Scientific and Technical Journal, Tashkent. 2025 - №1(121). P.18-28 (05.00.00; №12).

## **II бўлим (чаft II; part II)**

31. Амиров С.Ф., Жураева К.К. Разработка математической модели кривой намагничивания магнитной цепи магнитоупругого преобразователя// Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. Москва, 2022 - №6(216). - С.31-33.

32. Жураева К.К., Назирова З.Г. Об одном методе улучшения статической характеристики магнитоупругих датчиков// Национальная ассоциация ученых (НАУ). 2021. №67 – С. 35-38 DOI:10.31618/nas.2413-5291.2021.1.67.428.

33. Bedritsky I.M., Jurayeva K.K., Bazarov L.Kh Mirasadov M.Zh. Comparison of models of magnetization curves and hysteresis loops according to the giles-atherton model for soft magnetic amorphous alloys// International journal of advance scientific research. Volume 03 Issue 02, 2023 - P. 38-52 <https://doi.org/10.37547/ijasr-03-02-06>.

34. Бедрицкий И.М., Жураева К.К. Погрешности расчетов ферромагнитных элементов стабилизаторов напряжения и тока параметрической природы// “Муҳаммад ал-Хоразмий авлодлари” илмий-амалий ва ахборот-таҳлилий журнал. Тошкент, 2020. - №1(11)/2020. 90-94 б.

35. Базаров Л.Х., Бедрицкий И.М., Жураева К.К. Амплитудно-фазовые соотношения в двухконтурной параметрической цепи с выходом на постоянном токе// “Мухаммад ал-Хоразмий авлодлари” илмий-амалий ва ахборот-таҳлилий журнал. 2022 - № 1(19). 149-153 б.
36. Jurayeva K.K., Fayzullayev J.S. Mathematical model of magnetic circuit of sensors of functional diagnostic systems of electric carriers// MIP: Engineering-2019 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 537 (2019) 062026 doi:10.1088/1757-899X/537/6/062026, P. 5 (Scopus)
37. Amirov S.F., Jurayeva K.K. Research of magnetic circuits magnetoelastic sensors efforts with the method for creating equivalent circuits// International Conference on Information Science and Communications Technologies Applications, Trends and Opportunities ICISCT 2019, Tashkent, 4-6 November, 2019 DOI: 10.1109/ICISCT47635.2019.9011970 ©2019 IEEE. (Scopus)
38. Bedritsky I.M., Jurayeva K.K. Estimation of Errors in Calculations of Coils with Ferromagnetic Core// 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 978-1-7281-4590-7/20 ©2020 IEEE. (Scopus)
39. Bedritsky I.M., Jurayeva K.K., Bazarov L.X., Nazirova Z.G. Amplitude and phase relations in a two-circuit parametric circuit of ferroresonance nature //E3S Web of Conferences – 2021. Vol. 264. CONMECHYDRO – 2021. (Scopus)
40. Jurayeva K.K., Nazirova Z.G., Mirasadov M.J. Identification and analysis of sources of errors of the magnetoelastic sensor// AIP Conference Proceedings 2402, 060019 (2021), <https://doi.org/10.1063/5.007183>.
41. Bedritsky I.M., Jurayeva K.K., Bazarov L.X., Nazirova Z.G. Using incomplete polynomials to approximate of magnetization curves of electrical steels// AIP Conference Proceedings. – 2023. Iss. 2612. – P. 1-6. (Scopus)
42. Jurayeva K., Nazirova Z., Mamadaliyev U. Increasing the sensitivity of magnetoelastic sensors using the energy-information method// AIP Conference Proceedings, 2023, 2476, 020013, <https://doi.org/10.1063/5.0105791>. (Scopus)
43. Jurayeva K., Sattarov Kh. Issues of investigation of the dependence of static characteristics of magnetoelastic converters of mechanical quantities on the influence of external// E3S Web of Conferences, 2023, 389, 01060 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338901060>. (Scopus)
44. Amirov S., Jurayeva K., Nazirova Z. Development of magneto elastic transducers of mechanical quantities invariant to destabilizing factors// E3S Web of Conferences 461, 01058 (2023) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346101058> (Scopus)
45. Bazarov L., Bedritsky I., Jurayeva K., Toshpulatova D., Nazirova Z. Dynamic modes of the phase number converter based on LC circuits with a common magnetic circuit// E3S Web of Conferences, 2023, 383, 01026 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338301026> (Scopus)
46. Amirov S., Yakubov M., Jurayeva K., Saydivaliyev S. Features of spectral vibration diagnostics of traction power transformers in high-speed motion// E3S Web of Conferences, 2023, 401, 04002 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340104002> (Scopus)

47. Жураева К.К., Файзуллаев Ж.С. Исследование погрешности разработанных магнитоупругих датчиков усилий методом параметрических структурных схем// Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации II Международная научно-техническая конференция, посвященная 90-летию со дня рождения профессора Зарипова Мадияра Фахритдиновича, 19-20 сентября 2019г., Уфа-2019. - С. 50–54.

48. Жураева К.К., Назирова З.Г. Методы уменьшения погрешностей магнитоупругого датчика// Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Scientific and Practical Conference “Global and Regional Aspects of Sustainable Development”, Copenhagen, Denmark, 26-28.02.2021 - №43. pp. 618-622.

49. Жураева К.К. Исследование динамических характеристик магнитоупругих преобразователей механических величин// VII Международная научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» г.Кемерово 7-9 декабря 2022 г. - С.1-4.

50. Жураева К.К. Исследование погрешности магнитоупругих преобразователей механических величин// Международная научно-техническая конференция «Ресурсосберегающие технологий на транспорте» Ташкент, 2-3 декабря 2022 г. - С.150-152.

51. Жураева К.К. О методике выявления обобщенных приемов улучшения основных характеристик магнитоупругих преобразователей механических величин// Сборник Международной научно-практической конференции – “Перспективы развития электроэнергетической отрасли на юге республики” г.Термез 16-17 декабрь, 2022 г. - С. 76-79.

52. Жураева К.К. Современные автоматизированные системы контроля и управления на основе магнитоупругих преобразователей с улучшенными характеристиками// Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) Том 2, г.Чита 18 ноября 2022 г. - С. 247-252.

53. Amirov S.F., Jurayeva K.K. About one method of improving the static characteristic magnetoelastic sensors// International Conference on Research Identity, Value and Ethics Hosted from USA, April 30th, 2022. P. 505-508.

54. Жураева К.К. Определение динамических характеристик магнитоупругих преобразователей механических величин// Актуальные проблемы энергетики в условиях цифровизации экономики. Материалы международной научно-практической конференции г.Бухара 24-26 ноября, 2022 г. - С. 443-446.

55. Жураева К.К. Расчет магнитоупругого преобразователя механической величины в зависимости от свойств магнитопровода// Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. –Чебоксары – 2023. - С. 354-358

56. Жураева К.К., Назирова З.Г. Исследование нелинейных магнитных цепей магнитоупругих датчиков механических величин// Научные труды международной научно-технической конференции с участием зарубежных ученых “Ресурсосберегающие технологии на транспорте” 20-21 декабря 2023 г. Ташкент-2023. - С. 434-437

57. DGU (UZ) № 10924. Программное обеспечение для исследования статических и динамических характеристик преобразователя тока систем контроля и управления/ Амиров С.Ф., Жураева К.К., Сафаров А.М. // Зарегистрировано в государственном реестре Республики Узбекистан от 29.04.2021 года

58. DGU (UZ) № 16044. Программное обеспечение для расчета статистической характеристики магнитоупругого преобразователя/ Амиров С.Ф., Жураева К.К., Назирова З.Г. // Зарегистрировано в государственном реестре Республики Узбекистан от 10.05.2022 года.

59. DGU (UZ) № 19239. Программное обеспечение для расчета оптимальных размеров магнитной системы магнитоупругих преобразователей/ Амиров С.Ф., Жураева К.К. // Зарегистрировано в государственном реестре Республики Узбекистан от 11.11.2022 года.

60. DGU (UZ) № 24850. Программное обеспечение для расчета магнитоупругого преобразователя на заданную нелинейность преобразования/ Жураева К.К., Назирова З.Г. // Зарегистрировано в государственном реестре Республики Узбекистан от 23.05.2023 года.

61. DGU (UZ) № 32288. Magnit elastik uzgartirgichning sezgirligini hisoblash / Jurayeva K.K., Nazirova Z.G. // 2023 y. – O‘zbekiston Respublikasining Dasturiy mahsulotlar davlat reyestrída 26.12.2023 y. ro‘yxatdan o‘tkazilgan.

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: 4,1 б.т. Адади: 60 нусха.  
Буюртма № 43-19/2025 Нашрга рухсат этилди: 20.05.2025 й.

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



