

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017 Т.03.02 РАҶАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ТЕМИР ЙЎЛ МУҲАНДИСЛАРИ ИНСТИТУТИ

АТАУЛЛАЕВ АМИНЖОН ОДИЛОВИЧ

**ТЕХНОЛОГИК ЖАРАЁНЛАР БОШҚАРУВ ТИЗИМЛАРИ УЧУН
СҮЮҚЛИК САРФИНИ ЎЛЧОВЧИ ҲАЛҚАСИМОН КАНАЛЛИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТ ЎЗГАРТИРГИЧЛАР**

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

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

Тошкент – 2019

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

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (Phd)

Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (Phd)

Атауллаев Аминжон Одилович

Технологик жараёнлар бошқарув тизимлари учун суюқлик сарфини ўлчовчи
ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиригичлар 3

Атауллаев Аминжон Одилович

Электромагнитные преобразователи расхода жидкости с кольцевыми
каналами для систем управления технологическими процессами 21

Ataullaev Aminjon Odilovich

Electromagnetic liquid flow transducers with annular channels for process control
systems 39

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works 42

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017 Т.03.02 РАҶАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ТЕМИР ЙЎЛ МУҲАНДИСЛАРИ ИНСТИТУТИ

АТАУЛЛАЕВ АМИНЖОН ОДИЛОВИЧ

**ТЕХНОЛОГИК ЖАРАЁНЛАР БОШҚАРУВ ТИЗИМЛАРИ УЧУН
СҮЮҚЛИК САРФИНИ ЎЛЧОВЧИ ҲАЛҚАСИМОН КАНАЛЛИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТ ЎЗГАРТИРГИЧЛАР**

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

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

Тошкент – 2019

**Фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг мавзуси Ўзбекистон Республикаси
Вазирлар Маҳкамаси хузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2019.1.PhD/T998
рақам билан рўйхатга олинган.**

Диссертация Тошкент темир йўл мұхандислари институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз тилида (резюме)) Илмий
кенгаш веб-саҳифасида (www.tdtu.uz) ва «ZiyoNet» ахборот таълим порталаида
(www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Амиров Султон Файзуллаевич
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Сиддиқов Илхомжон Ҳакимович
техника фанлари доктори, профессор

Назаров Ҳайридин Нуритдинович
техника фанлари номзоди, доцент

Етакчи ташкилот:

Ирригация ва сув муаммолари
илмий-тадқиқот институти

Диссертация ҳимояси Тошкент давлат техника университети хузуридаги DSc.27.06.2017.T.03.02 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил «_____» соат ____ даги
мажлисида бўлиб ўтади. Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўч., 2. Тел.: (+99871) 246-
46-00; факс: (+99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz.

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (____ рақами билан рўйхатга
олинган). Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўч., 2. Тел.: (+99871) 246-03-41.

Диссертация автореферати 2019 йил «_____» _____ да тарқатилди.
(2019 йил «_____» _____ даги ____ рақамли реестр баённомаси).

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

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

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

Кириш (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда халқ хўжалигининг турли тармоқларидағи мавжуд технологик жараёнларини автоматик назорат қилиш ва бошқарув тизимлари ҳамда техник воситаларини такомиллаштириш, жумладан бошқариш усуллари ва алгоритмлари, уларнинг элементлари ва қурилмаларининг техник тавсифларини яхшилаш, функционал имкониятларини кенгайтириш, конструкцияларини такомиллаштириш етакчи ўринни эгалламоқда. Дунёнинг ривожланган мамлакатларида, жумладан АҚШ, Англия, Германия, Чехия, Япония, Россия, Хитой ва бошқа давлатларда, ишлаб чиқариш жараёнлари ва технологияларини комплекс автоматлаштириш базасида ишлаб чиқариш самарадорлигини оширувчи технологик ва ишлаб чиқариш параметрларини назорат қилиш ва бошқаришнинг техник воситаларини такомиллаштиришга катта эътибор қаратилмоқда. Шу билан бирга суюқлик оқимини бошқариш билан боғлиқ бўлган технологик жараёнларда суюқлик сарфини ўлчовчи бошқарув тизимларини ўзгартиргичларининг ўлчаш сезгирилиги, аниқлиги ва тезкорлигини ошириш, асимметрик суюқлик оқими сарфларини ўлчаш хатолигининг камайтириш, экстремал эксплуатация шароитларида ишончлилигини ошириш, масса-габарит ўлчамларининг кичиклаштириш муҳим аҳамият касб этмоқда.

Жаҳонда технологик жараёнларни назорат қилиш ва бошқариш ҳамда ахборот-ўлчаш тизимларининг суюқлик сарфини ўлчовчи ўзгартиргичларнинг ўлчаш сезгирилиги, аниқлиги ва тезкорлигини ошириш, асимметрик суюқлик оқими сарфларини ўлчаш хатолигининг камайтиришга боғлиқ бўлган тавсифларини яхшилаш, уларнинг конструкция ва схемаларини яратишга қаратилган илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. Бу борада, жумладан суюқлик сарфини ўлчовчи электромагнит ўзгартиргичлар магнит занжирлари ва уларнинг актив зонасида ҳаракатланаётган суюқлиқда магнит майдони таъсирида ҳосил бўладиган электр майдони математик моделларини ишлаб чиқиши, суюқлик сарфини ўлчовчи ўзгартиргичларнинг конструкция ва схемаларини такомиллаштиришга катта аҳамият берилмоқда. Шу билан бирга сезгирилиги ва аниқлиги юқори ҳамда бутун ўлчаш диапазонида чизиқли статик тавсифларга эга бўлган суюқлик сарфини ўлчовчи янги электромагнит ўзгартиргичларни ишлаб чиқиши зарур ҳисобланмоқда.

Республикамизда энергия ва ресурслар сарфини камайтирувчи энергия тежамкор технология ва техник воситалари ҳамда ишлаб чиқаришда технологик жараёнларини назорат қилиш ва бошқариш тизимларини такомиллаштириш чора-тадбирлари амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «... миллий иқтисодиётнинг рақобатбардошлигини ошириш,... ишлаб чиқаришни техник ва технологик янгилаш, ... ишлаб чиқаришга энергия тежовчи технологияларни кенг тадбиқ этиш»¹ вазифалари белгилаб берилган. Мазкур вазифаларни бажаришда, жумладан технологик

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

жараёнлар бошқарув тизимлари учун суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичларни яратиш мухим аҳамият касб этади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 26 майдаги ПҚ-3012-сон «2017-2021 йилларда қайта тикланувчи энергетикани янада ривожлантириш, иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳада энергия самарадорлигини ошириш чора - тадбирлари дастури тўғрисида» ги Қарори ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-хукуқий хужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши-нинг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурстежамкорлик» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Суюқлик сарфини ўлчовчи электромагнит ўзгартиргичларни ишлаб чиқиш бўйича долзарб масалаларни бажаришга қаратилган илмий тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи илмий марказларида ва олий таълим муассасаларида, жумладан University of Michigan ва General Elektric, Bergen Laboratories Ins. (АҚШ), Technical University of Ilmenau и Siemens, Siemens ind Halke (Германия), Davy and United Instruments (Буюк Британия), Sony и Tokyo Technology Institute, Toshiba (Япония), ASEA (Швеция), Kelk Electronics (Канада), «НИИтеплоприбор» АЖ, (Россия), Таллинн давлат техника университети (Эстония) ҳамда Тошкент давлат техника университети, “Ирригация ва сув муаммолари” илмий-тадқиқот институти ва Тошкент темир йўл мұхандислари институти (Ўзбекистон)да олиб борилмоқда.

J.A. Shercliff, J.S. Arnold, B. Thurlimann, A. Kolin, L.A. Salami, M.K. Bevir, T. Shimizu, И.Д. Вельт, Ю.В. Михайлова, М.Я. Гаммерман, Э.Г. Звенигородский, Б.И. Никитин, А.К. Кавиев, Л.М. Корсунский, Н.И. Логинов, В.И. Межбурд, М.П. Росманн, Г.Х. Кирштейн, Ф.П. Неймарк, Ю.П. Мальцев, М.Ф. Зарипов, Р.К. Азимов, А.А. Азимов, С.П. Колмыков, С.Ф. Амирров ва бошқа олимларнинг саъй-ҳаракатлари билан суюқлик сарфини ўлчовчи электромагнит ўзгартиргичлар назарий асослари ишлаб чиқилди, конструкциялари ва схемалари такомиллаштирилди ҳамда улар саноат миқёсида кенг қўламда ишлаб чиқарилди.

Бироқ сезгирилиги ва асимметрик суюқлик оқимлари сарфини ўлчаш аниқлигини ошириш ҳамда ўзгартериш функцияси чизиқлилигини таъминлаш бўйича тадқиқотлар етарли даражада олиб борилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент темир йўл мұхандислари институти илмий-тадқиқот ишлари режасининг №3 - «Электромагнит ўлчаш воситаларини такомиллаштириш» (2012-2016) мавзусидаги лойиҳаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади технологик жараёнлар бошқарув тизимлари учун мўлжалланган сезгирилиги ва асимметрик суюқлик оқими сарфини ўлчаш

аниқлиги юқори ҳамда чизиқли статик тавсифга эга бўлган суюқлик сарфини ўлчовчи электромагнит ўзгартиргичларни ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

замонавий босқичда технологик жараёнлар бошқарув тизимлари томонидан суюқлик сарфини ўлчаш ўзгартиргичларига қўйиладиган асосий талабларни шакллантириш;

мавжуд суюқлик сарфини ўлчаш ўзгартиргичларининг асосий техник тавсифларини қиёсий тадқиқ қилиш;

технологик жараёнлар бошқарув тизимлари учун суюқлик сарфини ўлчаш ўзгартиргичлари турини танлаш ва асослаш;

сезгирилиги ва асимметрик суюқлик оқими сарфини ўлчаш аниқлиги юқори ҳамда чизиқли статик тавсифга эга бўлган суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичларининг математик моделларини ишлаб чиқиш;

ишлаб чиқилган суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичларининг асосий тавсифларини тадқиқ қилиш;

Тадқиқотнинг объекти сифатида сезгирилиги ва аниқлиги юқори ҳамда чизиқли статик тавсифга эга бўлган суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичлар олинган.

Тадқиқотнинг предмети сезгирилиги ва аниқлиги юқори ҳамда чизиқли статик тавсифга эга бўлган суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичлари ҳамда уларнинг асосий тавсифларини ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида тақсимланган параметрларга эга электр ва магнит занжирлари, электромагнит майдон ҳамда хатоликлар назариялари, турли физик табиатга эга занжирларнинг энергия - информацион моделлари ва параметрик структура схемалари аппарати ҳамда тадқиқотнинг тажрибавий усулларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қўйидагилардан иборат:

сезгирилиги ва аниқлиги юқори ҳамда чизиқли статик тавсифга эга бўлган суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргич ишлаб чиқилган;

электромагнит ўлчаш ўзгартиргичларининг кўп контурли ва тарқоқ параметрли электромагнит занжирларини ҳисоблаш усули ишлаб чиқилган;

электр ва магнит занжирлар параметрлари тақсимланишини ҳисобга олган ҳолда янги суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичнинг математик модели ишлаб чиқилган;

суюқлик сарфини ўлчовчи электромагнит ўзгартиргич ҳалқасимон каналида қутб наконечниклари навбати билан алмашиниб келадиган магнит тизимини жойлаштириш орқали ўзгартиргич сезгирилигини ошириш мумкинлиги асосланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қўйидагилардан иборат:

суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит

ўзгартиргичнинг янги конструктив схемаси ишлаб чиқилган;

суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичлар динамик характеристикаларини тадқиқ учун уларнинг параметрик структура схемалари ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги тарқоқ параметрли занжир ва тизимларни ҳисоблаш усулларини, электромагнит майдонининг асосий қонунлари, назариялари ва ҳисоблаш усулларини тўғри қўллаш билан асосланади, шунингдек назарий ва тажриба натижаларнинг ўзаро мослиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти ўзгартиргич параметрларининг тақсимланишини ҳисобга олган ҳолда ишлаб чиқилган янги суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичларининг математик моделларини яратиш орқали битта ва кўп контурли параметрлари тарқоқ магнит занжирларини ҳисоблаш усули ишлаб чиқилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти янги суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичлар электр ва магнит занжирлари дифференциал тенгламаларини тузиш орқали тарқоқ параметрли электромагнит ўзгартиргичларининг магнит занжирларини ҳисоблаш усули ишлаб чиқилганлиги ҳамда суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичлар асосий техник тавсифларини яхшилаш ва уларнинг қидириш-лойиҳалаш босқичига сафрланадиган вақтни қисқартириш имконини берувчи умумлаштирилган усуллар аниқлаш ва морфологик жадвалларни тузиш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Технологик жараёнлар бошқарув тизимлари учун суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичлар бўйича олинган натижалар асосида:

сезгирилиги ва аниқлиги юқори ҳамда чизиқли статик тавсифга эга бўлган суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргич қурилмасига Интеллектуал мулк агентлигининг патенти олинган (№IAP 04960-2014 г.). Натижада технологик жараёнлар бошқарув тизимларида қўлланадиган суюқлик сарфини ўлчаш ўзгартиргичларида юқори сезгирилик, аниқлик, суюқлик сарфининг бутун ўлчаш диапазони бўйлаб электр сигналга ўзгартиришнинг чизиқлилиги, эксплуатациянинг экстремал шароитларида тавсифларнинг юқори ишончлилиги ва барқарорлигига эришилган;

сезгирилиги ва асимметрик суюқлик оқими сарфини ўлчашда аниқлигининг юқорилиги ҳамда бутун ўлчаш диапазонида чизиқли статик тавсифларга эга бўлган янги суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргич “Бирлашган энергия хизмати” шаҳар сув таъминоти тизимига жорий этилган (“Навоий кон-металлургия комбинати” давлат корхонасининг 2019 йил 21 октябрдаги 01-01-10/13380-сон маълумотномаси). Илмий тадқиқот натижасида суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргич сезгирилигини ошириш, асимметрик суюқлик оқими сарфини ўлчашдаги хатоликни камайтириш ва бутун ўлчаш диапазонида статик тавсифининг чизиқлилигини таъминлашга эришилган;

электромагнит ўлчаш ўзгартиргичларининг кўп контурли ва тарқоқ параметрли электромагнит занжирларини ҳисоблаш усули “Бирлашган энергия хизмати” шаҳар сув таъминоти тизимига жорий қилинган (“Навоий кон-металлургия комбинати” давлат корхонасининг 2019 йил 21 октябрдаги 01-01-10/13380-сон маълумотномаси). Натижада кўп контурли ва параметрлари тарқоқ жойлашган магнит занжирларини ҳисоблаш кетма-кетлигини ишлаб чиқиши имкони яратилган;

электр ва магнит занжирлар параметрлари тақсимланишини ҳисобга олган ҳолда янги суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичларининг математик модели “Бирлашган энергия хизмати” шаҳар сув таъминоти тизимига жорий қилинган (“Навоий кон-металлургия комбинати” давлат корхонасининг 2019 йил 21 октябрдаги 01-01-10/13380-сон маълумотномаси). Натижада яратилган ўзгартиргич қўлланиладиган тизим сифат кўрсатгичларини ҳисоблаш аниқлигини ошириш имкони яратилган.

Тадқиқот натижаларининг аprobацияси. Тадқиқотнинг назарий ва амалий натижалари 9 та халқаро ва 7 та республика илмий-амалий анжуманларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларнинг эълон қилинганини. Диссертация мавзуси бўйича жами 25 та илмий иш, шулардан – Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси тавсия этган илмий нашрларда 7 та мақола, жумладан 2 та хорижий ва 5 та республика журналларида нашр этилиб, Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг ихтирога 1 та патенти ва ЭХМлар учун дастурий воситага 1 та гувоҳномаси олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш қисми, тўртта боб, хуроса, адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ишининг ҳажми 125 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмida ишнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялар ривожланиши устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, муаммонинг ўрганилганлик даражаси баён этилган, тадқиқотнинг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги ёритилган, тадқиқот мақсади ва вазифалари шакллантирилган, тадқиқот обьекти ва предмети ифодаланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, ишнинг ишончлилиги, назарий ва амалий аҳамияти асосланган, диссертация тадқиқоти натижаларининг ишлаб чиқаришга жорий қилиниши кўрсатилган.

“Суюқлик сарфини ўлчовчи ўзгартиргичлар таҳлили” номли биринчи бобда ҳалқ хўжалигининг турли тармоқларидағи суюқлик сарфи билан боғлиқ бўлган технологик жараёнлар бошқарув тизимлари схемаларининг ўзига хос хусусиятлари ўрганилган. Ушбу бошқарув тизимларида суюқлик сарфини ўлчашда қўлланилган бирламчи ўзгартиргичларга қўйиладиган асосий талаблар белгиланди. Технологик жараёнлар бошқарув тизимларида қўлланиладиган суюқлик сарфини ўлчовчи ўзгартиргичлар оширилган сезгирликка, суюқлик

оқимининг турли (ламинар, турбулент, асимметрик ва б.) режимларида юқори аниқликка, ишончлиликка, чизиқли статик тавсифга ҳамда фойдаланишнинг экстремал ҳолатларида барқарор техник кўрсаткичларга эга бўлиши лозимлиги аниқланди.

Суюқлик сарфини ўлчовчи ўзгартиргичлар асосий техник тавсифларининг қиёсий баҳолаш натижаси шуни кўрсатдики, жуда кичик ва жуда катта миқдордаги ҳамда тескари йўналишдаги суюқлик сарфини ўлчай олиши, кўрсатишига суюқлик физик-кимёвий хоссаларининг ўзгаришини таъсир этмаслиги, агрессив, қовушқоқ, абразив суюқликлар, қуйқа (суюлтирилган ер жинслари) ва пульсацияланувчи оқим сарфини ўлчай олиши ҳамда имитация усулида ишончлаш имконияти мавжудлиги сабабли электромагнит ўзгартиргичлар технологик жараёнлар назорат ва бошқарув тизимлари талабларига бошқа русумли ўлчаш ўзгартиргичларига нисбатан тўлароқ жавоб берса олиши аниқланди.

Электромагнит принципда ишлайдиган суюқлик сарфини ўлчовчи ўзгартиргичларнинг тўлароқ таснифи тузилди. Кўндаланг, концентрик ва радиал магнит майдонли суюқлик сарфини ўлчовчи электромагнит ўзгартиргичлар конструктив схемалари, хосса ва хусусиятлари таҳлили шуни кўрсатдики, радиал магнит оқимли суюқлик сарфини ўлчовчи (ССЎ) ҳалқасимон каналли (ҲК) электромагнит ўзгартиргич(ЭМЎ)лар нисбатан кичик қувурлардаги(қувур диаметри тахминан 100 мм гача бўлганда) сарфни ўлчашда юқори сезгириликка ва асимметрик оқимлар учун юқори аниқликка эга.

Шу билан биргаликда, радиал магнит оқимли ССЎ ҲК ЭМЎлар конструктив схемалари, хосса ва хусусиятлари таҳлили шуни кўрсатдики, кейинги илмий изланишлар турли (кичик ва катта) диаметрли қувурлардаги симметрик ва асимметрик суюқлик оқимлари сарфини юқори сезгирилик ва аниқликда ўлчайдиган ҲК ЭМЎлар янги конструкцияларини ишлаб чиқиш, уларни математик моделларини яратиш ҳамда асосий техник характеристикаларини тадқиқ этишга бағишиланиши лозим аниқланди.

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

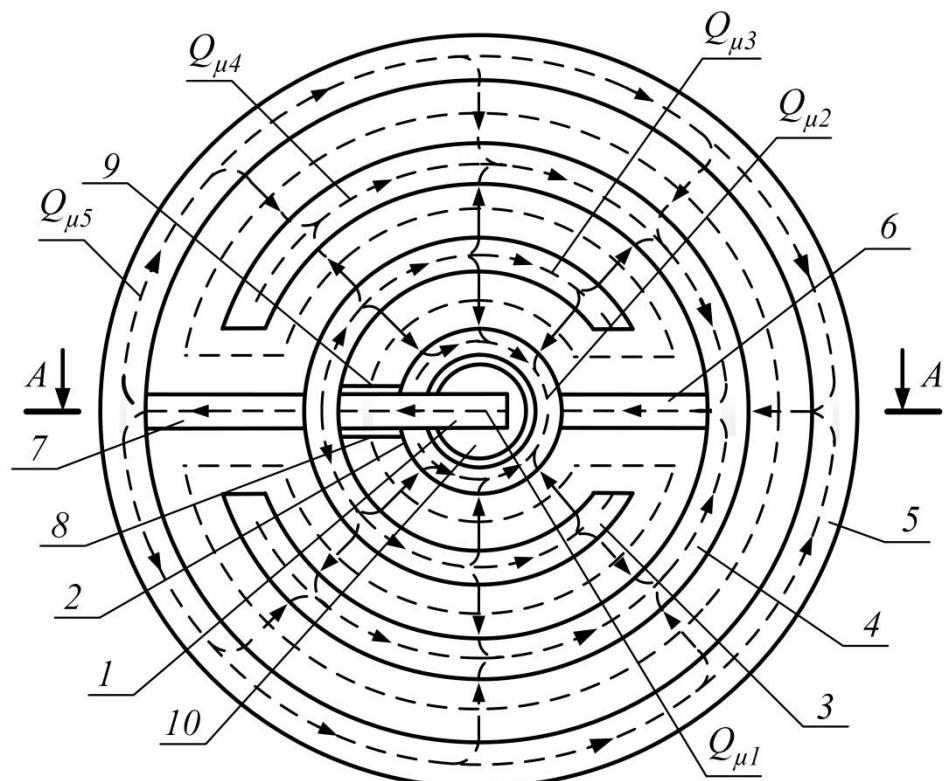
“Суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичлар конструкцияларини такомиллаштириш” номли иккинчи боб техник ижодиётнинг энергия-информацион ва морфологик матрица усувлари ҳамда ягона математик аппарат ёрдамида турли физик табиатга эга жараён ва ҳодисаларни талқин қилиш имконини берадиган параметрик структура схемалар (ПСС) аппаратидан фойдаланган ҳолда ССЎ ҲК ЭМЎлар мавжуд конструкцияларини такомиллаштиришга қаратилган.

Ихтиrolар ҳалқаро классификациясининг G 01 F 1/58 ва G 01 P 5/00 нимгурухлари таркибига киритилган патентлар “Ихтиро-прототип” жуфтликларини таҳлили асосида ССЎ ЭМЎлар конструкцияларини такомиллаштиришнинг конструктив, технологик ва параметрик умумлашган усувлари аниқланди. Уларнинг таҳлилига кўра умумлашган усувларининг энг кўп миқдори ўзгартиргичнинг магнит тизими конструкциясини, энг кам миқдори эса қувур шаклини такомиллаштиришга, шунингдек ўзгартиргичнинг

энг кўп яхшиланадиган тавсифи – бу унинг аниқлиги бўлса, энг ками – унинг тезкорлиги эканлиги аниқланган.

ССЎ ЭМЎлар конструкциялари морфологик усул ёрдамида такомиллаштиришда морфологик матрица элементлари сифатида ўзгартиргич қувури, қутб наконечниклари, магнит юритувчи куч манбаи, электродлари ва қувурнинг ички изоляцияси каби элементлари олинди. Морфологик матрицанинг энг кўп вариантга эга бўлган элементи ўзгартиргичнинг қутб наконечниклари, энг кам вариантга эга бўлган элементи эса қувурнинг ички изоляцияси эканлиги аниқланди.

ССЎ ЭМЎ қувури актив зонасида ўзаро коаксиал жойлашган бир нечта очиқ ҳалқасимон қутб наконечникларини жойлаштириш ва ҳар бир ёндош қутб наконечниклари ҳар хил номланган учларини қўзғатиш чулғами ўралган ферромагнит туташтиргичлар билан ўзаро улаш орқали ҳосил қилинган ҳалқасимон каналлардаги магнит майдони индукциясини ва актив зона узунликларини ошириш ҳисобига ўзгартиргич сезгирилигини оширишга эришилган (1- расм).



1 – Z симон ўзак; 2,5- ёпик ҳалқасимон магнит ўтказгичлар; 3,4- очиқ ҳалқасимон магнит ўтказгичлар; 6,7- ферромагнит туташтиргичлар; 8,9- юпқа электродлар; 10- қўзғатиш чулғами

1- расм ССЎ ҲК ЭМЎ конструктив схемаси

“Суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичлар математик моделлари” номли учинчи бобда яратилган ССЎ ҲК ЭМЎлар битта ва кўп контурли магнит занжирлари ва актив зонаси электр занжирлари тарқоқ параметрли занжирлар кўринишида тадқиқ этилган ҳамда

улар учун тегишли аналитик ифодалар олинган.

Тадқиқ этилаётган ССҮ ҲК ӘМҮлар магнит ва электр занжирлари таҳлилини соддалаштириш мақсадида қуидаги чекловлар киритилган: 1) ҳалқасимон ферромагнит ўзаклар ва уларни ўзаро уловчи ферромагнит стержень бир хил материалдан монолит кўринишида ясалган; 2) қувур ўқи бўйлаб ҳалқасимон ферромагнит ўзакларнинг иккала четидаги сочилган магнит оқимлари ҳисобга олмаслик даражада кам; 3) ферромагнит ўзаклар магнит қаршилиги улардаги магнит майдони индукциясининг қийматига боғлиқ эмас, яъни магнит занжири магнитланиш асосий эгри чизифининг чизиқли қисмida ишлайди; 4) магнит майдонининг вакт бўйича ўзгариш частотаси жуда паст бўлганлиги сабабли ферромагнит ўзаклардаги уюрмавий токлар ҳисобга олмаслик даражада кичик қийматга эга.

ССҮ ҲК ӘМҮлар битта контурли магнит занжирларининг математик моделлари занжирлар параметрларининг тарқоқлиги ва сочилган магнит оқимларини ҳисобга олган ҳолда қуидагича ҳосил қилинди:

$$Q_{\mu 1}(\alpha) = F_{\kappa} \frac{\beta}{\Delta_1} \{ (W_{\mu s} + Z_{\mu \pi} \alpha_m) \{ sh(\beta \alpha^*) - sh[\beta(1 - \alpha^*)] \} - (W_{\mu s} sh \beta \} \}. \quad (1)$$

$$Q_{\mu 2}(\alpha) = -F_{\kappa} \frac{\beta}{\Delta_1} \{ (W_{\mu s} + Z_{\mu \pi} \alpha_m) \{ sh(\beta \alpha^*) - sh[\beta(1 - \alpha^*)] \} + (W_{\mu s} sh \beta \}, \quad (2)$$

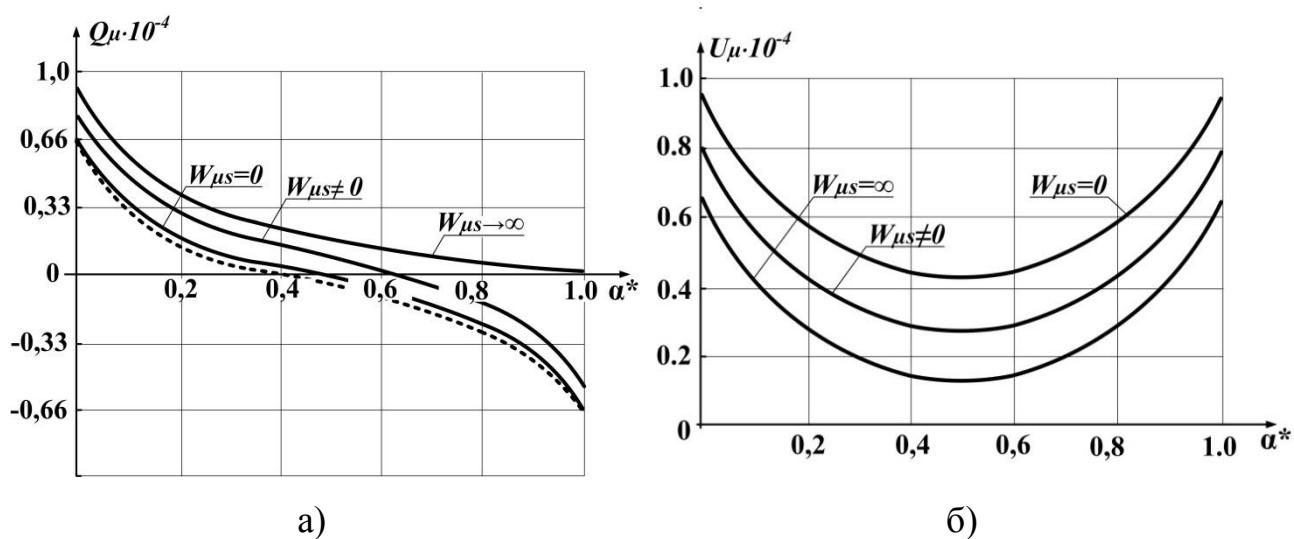
$$B(\alpha) = \mu_0 \frac{U_{\mu}(\alpha)}{\delta_{ish}} = F_{\kappa} \mu_0 \frac{2(W_{\mu s} + Z_{\mu \pi} \alpha_m)}{\delta_{ish} \Delta_1} \{ ch(\beta \alpha^*) + ch[\beta(1 - \alpha^*)] \}. \quad (3)$$

$$B(\rho) = \left| \frac{Q_{\mu 2}(\alpha_m)}{b[2\pi\rho - (\delta_{s1} + \delta_{s2} + h_3)]} \right| = \left| F_{\kappa} \frac{2\beta sh \beta (W_{\mu s} + 0.5Z_{\mu \pi} \alpha_m)}{b[2\pi\rho - (\delta_{s1} + \delta_{s2} + h_3)] \Delta_1} \right|, \quad (4)$$

бу ерда $Q_{\mu 1}(\alpha)$, $Q_{\mu 2}(\alpha)$, $B(\alpha)$, $B(\rho)$ - ҳалқасимон магнит ўтказгичлардаги магнит оқимлари ва магнит индукциялари; F_{κ} - қўзғатиши чулғами магнит юритувчи кучи; $W_{\mu s}$ - сочилган магнит оқими бирлашадиган ишчи бўлмаган ҳаво ораликлари δ_{s1} ва δ_{s2} нинг магнит қаршилиги; $\beta = \sqrt{(Z_{\mu \pi 1} + Z_{\mu \pi 2}) C_{\mu \pi}} \alpha_m$ - магнит майдонини занжир бўйлаб сўниш коэффициенти; $Z_{\mu \pi 1} = \frac{2\pi r_{1\text{yp}} - h_3 - \delta_{s1}}{\mu \mu_0 b h_1 \alpha_m}$; $Z_{\mu \pi 2} = \frac{2\pi r_{2\text{yp}} - h_3 - \delta_{s2}}{\mu \mu_0 b h_2 \alpha_m} = Z_{\mu \pi}$; $C_{\mu \pi} = \mu_0 \frac{0.5b\pi(r_{1\text{yp}} + r_{2\text{yp}})}{\delta_{ish} \alpha_m}$ - ҳалқасимон магнит ўтказгичлар магнит қаршиликлари ва улар орасидаги ҳалқасимон ҳаво оралиги магнит сифимининг α бурчак бирлигига тўғри келадиган погон қиймати; h_1 h_2 , b ва δ_{ish} - мос равища ферромагнит ўзаклар ва уларни ўзаро туташтирувчи стержень қалинликлари, уларнинг канал ўқи бўйлаб узунлиги ва ўзаклар орасидаги ишчи ҳаво оралиги; μ , $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - мос равища ферромагнит ўзак материалининг нисбий магнит сингдирувчанлиги ва ҳавонинг абсолют магнит сингдирувчанлиги (магнит доимийси); α , α_m - бурчак координатаси ва унинг максимал қиймати; $\alpha^* = \frac{\alpha}{\alpha_m}$; ρ - радиал координата; $\Delta_1 = 2Z_{\mu \pi} \alpha_m [(Z_{\mu \pi} \alpha_m + W_{\mu s})(1 + ch\beta) - \beta sh\beta (2Z_{\mu 0} W_{\mu s} + 2Z_{\mu 0} Z_{\mu \pi} \alpha_m + W_{\mu s} Z_{\mu \pi} \alpha_m)]$.

Яратилган ССҮ ҲК ЭМҮ магнит занжири ҳалқасимон ферромагнит ўзагидаги магнит оқими магнит занжирининг ўртасида ўз йўналишини ўзгартириши, магнит оқимини занжир бўйлаб тарқалиш коэффициентининг ортиши билан унинг тақсимланиш ночизиқлиги ортиб бориши, магнит кучланиши (магнит индукцияси) эса магнит занжири ҳалқасимон ҳаво оралигининг боши ва охирида максимум, занжир ўртасида эса минимум қийматларга эга бўлиб, магнит оқимини занжир бўйлаб тарқалиш коэффициентининг ортиши билан магнит кучланиши(магнит индукцияси)нинг минимум қиймати камайиб бориши аниқланган.

Яратилган ССҮ ҲК ЭМҮ магнит занжири учун ҳосил қилинган магнит оқими ва магнит кучланиши(магнит индукцияси)нинг аналитик ифодалари ва улар асосида қурилган эгри чизиклар таҳлили шуни кўрсатадики (2-расм), ишчи бўлмаган ҳаво оралиғи магнит қаршилиги ($W_{\mu s}$) чекли қийматга эга бўлганда



2- расм. Магнит оқими (а) ва магнит кучланиши (магнит индукцияси) (б) ларнинг ишчи бўлмаган ҳаво оралиғи магнит қаршилиги $W_{\mu s}$ нинг турли қийматлари учун координатага боғлиқлик эгри чизиклари

ҳалқасимон ферромагнит ўзакдаги магнит оқими занжир узунлиги бўйлаб ўз йўналишини ўзгартиради ва бу ўзгариш $W_{\mu s} = 0$ бўлганда магнит занжирининг ўртасида содир бўлади (занжирни ҳисоблаш хатолиги $7 \div 11\%$ ни ташкил этади), $W_{\mu s} = \infty$ деб олинганда эса магнит оқими занжир узунлиги бўйлаб ўз йўналишини ўзгартирмайди ва максимал қийматидан нолгача ёки аксинча ўзгараради (занжирни ҳисоблаш хатолиги $18 \div 22\%$ ни ташкил этади).

Яратилган ССҮ ҲК ЭМҮ магнит тизимлари қўп контурли ва параметрлари тарқоқ жойлашган магнит занжирларини ташкил этади ҳамда уларнинг математик моделлари қуидаги иккинчи тартибли дифференциал тенгламалар системаси кўринишида ифодаланиши аниқланди:

$$\begin{cases} \frac{d^2 U_{\mu 12}}{dx^2} = (Z_{\mu \pi 1} + Z_{\mu \pi 2}) C_{\mu \pi 12} U_{\mu 12} + Z_{\mu \pi 3} C_{\mu \pi 23} U_{\mu 23}, \\ \frac{d^2 U_{\mu 23}}{dx^2} = Z_{\mu \pi 2} C_{\mu \pi 12} U_{\mu 12} + (Z_{\mu \pi 2} + Z_{\mu \pi 3}) C_{\mu \pi 23} U_{\mu 23} + Z_{\mu \pi 3} C_{\mu \pi 34} U_{\mu 34}, \\ \frac{d^2 U_{\mu 34}}{dx^2} = Z_{\mu \pi 3} C_{\mu \pi 23} U_{\mu 23} + (Z_{\mu \pi 3} + Z_{\mu \pi 4}) C_{\mu \pi 34} U_{\mu 34} + Z_{\mu \pi 4} C_{\mu \pi 45} U_{\mu 45}, \\ \frac{d^2 U_{\mu 45}}{dx^2} = Z_{\mu \pi 4} C_{\mu \pi 34} U_{\mu 34} + (Z_{\mu \pi 4} + Z_{\mu \pi 5}) C_{\mu \pi 45} U_{\mu 45}. \end{cases} \quad (5)$$

Иккита контурли тарқоқ параметрли магнит занжири учун (5) дифференциал тенгламалар системани ечиш мисолида яратылған ССҮ ҲК ӘМҮ магнит занжиригининг ишлаб чиқылған математик моделлари қуидагига тенг:

$$U_{\mu 12} = C_1 ch[\beta_1(1 - x^*)] + C_2 sh[\beta_1(1 - x^*)] + C_3 sh(\beta_1 x^*) + C_4 sh[\beta_2(1 - x^*)] + C_5 ch[\beta_2(1 - x^*)] - C_6 sh(\beta_2 x^*), \quad (6)$$

$$U_{\mu 23} = C_1 ch[\beta_1(1 - x^*)] + C_2 sh[\beta_1(1 - x^*)] + C_3 sh(\beta_1 x^*) - C_4 sh[\beta_2(1 - x^*)] - C_5 ch[\beta_2(1 - x^*)] + C_6 sh(\beta_2 x^*), \quad (7)$$

$$Q_{\mu 1} = -\frac{1}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_1 sh[\beta_1(1 - x^*)] - \frac{1}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_2 ch[\beta_1(1 - x^*)] + \frac{1}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_3 ch(\beta_1 x^*) - \frac{1}{Z_{\mu}} \beta_2 C_4 ch[\beta_2(1 - x^*)] - \frac{1}{Z_{\mu}} \beta_2 C_5 sh[\beta_2(1 - x^*)] - \frac{1}{Z_{\mu}} \beta_2 C_6 ch(\beta_2 x^*) + \frac{2F_{\kappa}}{Z_{\mu}}, \quad (8)$$

$$Q_{\mu 2} = -\frac{2}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_1 sh[\beta_1(1 - x^*)] - \frac{2}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_2 ch[\beta_1(1 - x^*)] + \frac{2}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_3 ch(\beta_1 x^*) + \frac{F_{\kappa}}{3Z_{\mu}}, \quad (9)$$

$$Q_{\mu 3} = \frac{1}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_1 sh[\beta_1(1 - x^*)] + \frac{1}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_2 ch[\beta_1(1 - x^*)] - \frac{1}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_3 ch(\beta_1 x^*) - \frac{1}{Z_{\mu}} \beta_2 C_4 ch[\beta_2(1 - x^*)] - \frac{1}{Z_{\mu}} \beta_2 C_5 sh[\beta_2(1 - x^*)] - \frac{1}{Z_{\mu}} \beta_2 C_6 ch(\beta_2 x^*) + \frac{2F_{\kappa}}{Z_{\mu}}, \quad (10)$$

Бұрын ерда $C_1 = \frac{Q_{\mu s}(2W_{\mu s} + Z_{\mu \tau})(2Z_{\mu} \beta_1 sh \beta_2 + 4Z_{\mu ab} \beta_1 \beta_2 ch \beta_2)}{\Delta_3}$; $C_2 = \frac{(2W_{\mu s} + Z_{\mu \tau})6Q_{\mu s}Z_{\mu} \beta_2 ch \beta_2}{\Delta_3}$; $C_3 = \frac{6(Q_{\mu 1 \tau} + Q_{\mu 3 \tau})Z_{\mu \tau}Z_{\mu} \beta_2 - 4F_{\kappa}Z_{\mu} sh \beta_2 + 4F_{\kappa}Z_{\mu ab} \beta_2 ch \beta_2}{\Delta_3}$; $C_4 = \frac{2(Q_{\mu 1 \tau} + Q_{\mu 3 \tau})Z_{\mu \tau}Z_{\mu} \beta_1 ch \beta_1}{\Delta_3}$; $C_5 = \frac{2(Q_{\mu 1 \tau} + Q_{\mu 3 \tau})Z_{\mu \tau} \beta_2 (2Z_{\mu ab} \beta_1 ch \beta_1 + 3Z_{\mu} sh \beta_1)}{\Delta_3}$; $C_6 = \frac{2Q_{\mu s}Z_{\mu} \beta_1 (2W_{\mu s} + Z_{\mu \tau}) + 4F_{\kappa}Z_{\mu} sh \beta_2 + 4F_{\kappa}Z_{\mu ab} \beta_2 ch \beta_2}{\Delta_3}$.

Ишлаб чиқылған ССҮ ҲК ӘМҮ математик моделини ҳосил қилишда суюқлик оқими тезлигининг ҲК күндаланған кесими бүйіча тақсимланиши қуидаги иккита аналитик ифода күренишида берилған, деб ҳисобланди: 1) суюқлик оқимининг тезлиги қувур күндаланған кесими бүйлаб чизиқли қонуният билан ўзгарадыған ҳолат; 2) суюқлик оқимининг тезлиги қувур

күндаланг кесими бўйлаб максимуми қувур марказидан силжиган квадратик қонуният билан ўзгарадиган ҳолат.

Яратилган ССЎ ҲК ЭМЎ актив зонасида ҳаракатланаётган суюқликда магнит майдони таъсирида индукцияланадиган электр майдонининг математик моделини ишлаб чиқишида ҲК күндаланг кесими бўйлаб чизиқли ва максимуми қувур марказидан силжиган квадратик қонуният билан ўзгарадиган ҳолатлар ҳамда электр ва магнит майдонлари учун қуидаги чегаравий шартлардан фойдаланилди:

$$\begin{aligned} J_d &= 0, \frac{\partial \varphi_d}{\partial n} = 0; B_n^c = B_n^d; \nabla^2 \varphi_{\text{ю.э.}} = 0; J_{\text{ю.э.}} = -\sigma_{\text{ю.э.}} \nabla \varphi_{\text{ю.э.}}; \sigma_c \left(-\frac{\partial \varphi_c}{\partial n} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right) = \\ &= \sigma_{\text{ю.э.}} \frac{\partial \varphi_{\text{ю.э.}}}{\partial n}; \frac{\partial \varphi_c}{\partial \tau} = \frac{\partial \varphi_{\text{ю.э.}}}{\partial \tau}; J_c = -\sigma_c \nabla \varphi_c; \sigma_c \frac{\partial \varphi_c}{\partial n} = \sigma_{\text{ю.э.}} \frac{\partial \varphi_{\text{ю.э.}}}{\partial n}; \frac{\partial \varphi_{\text{ю.э.}}}{\partial n} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

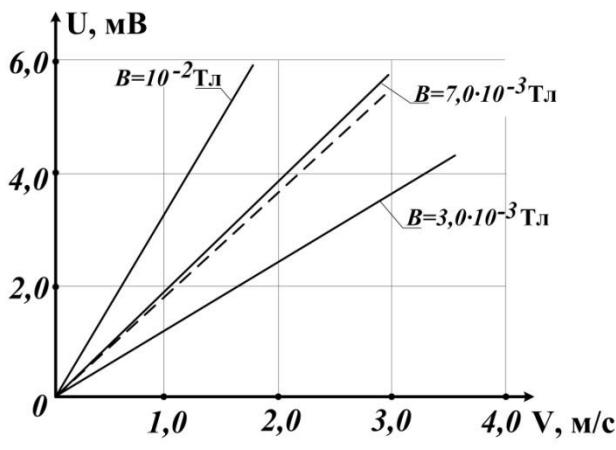
бу ерда J_c , J_d , $J_{\text{ю.э.}}$, φ_c , φ_d , σ_c , $\sigma_{\text{ю.э.}}$ – суюқлик, қувур деворлари ва юпқа электродлардаги мос равища ток зичлиги вектори, электр потенциал ва ўтказувчанликлари; n , τ – мос равища ташқи ва ички қувур деворларига перпендикуляр ва “Юпқа электрод-суюқлик” чегараси юзасидаги уринма текисликдаги бирлик векторлар; B_n^c , B_n^d – магнит майдонининг мос равища суюқлик, ташқи ва ички қувурлар деворларидаги нормал ташкил этувчилари; \mathbf{v} – ҲК даги суюқлик оқими тезлиги вектори.

“Суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичлар асосий характеристикаларини тадқиқ этиш” номли тўртинчи бобда ишлаб чиқилган ССЎ ҲК ЭМЎларнинг статик, динамик характеристикалари, хатоликлари ва уларни камайтириш усуллари, шунингдек уларнинг амалиётда қўлланилиш масалалари ўрганилган.

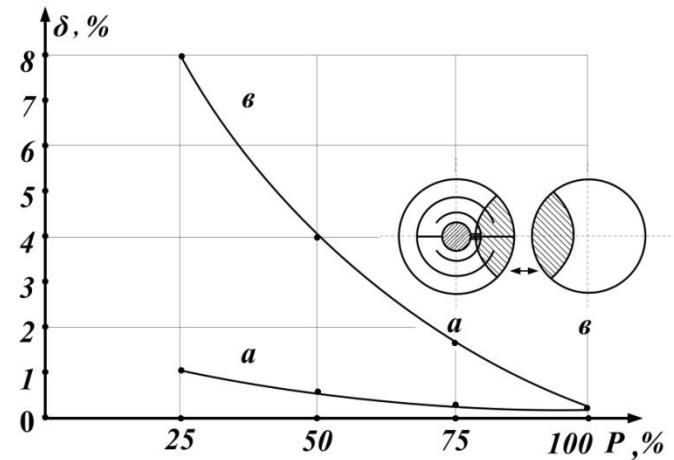
Яратилган ССЎ ҲК ЭМЎ статик характеристикаси ўзгартиргич актив зонасидаги магнит майдони индукцияси ва суюқлик оқими тезлиги тақсимланишини ифодаловчи ҳосил қилинган математик моделларини ССЎ ЭМЎ асосий тенгламаси $\nabla^2 \varphi_c = \operatorname{div}(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ га қўйиб ва уни ҲК даги электр ва магнит майдонлари учун аниқланган чегаравий шартларни инобатга олган ҳолда Femlab дастури ёрдамида ечиш асосида қурилди (3- расм).

Яратилган ССЎ ҲК ЭМЎ нинг ишлаб чиқилган математик моделлари (назарий) ва ўтказилган тажриба натижалари асосида қурилган статик характеристикалар ўзаро қиёсий таҳлили шуни кўрсатдики, уларнинг фарқи $8 \div 11\%$ дан ошмайди ҳамда улар бутун ўлчаш диапазонида чизиқли кўринишга эга. ССЎ ҲК ЭМЎ чиқиш сигнали катталигига қувурдаги суюқлик оқими эпюрасини бузувчи манба - маҳаллий гидравлик қаршилик(дискли затвор-вентиль) таъсирини ўрганиш мақсадида ўтказилган экспериментал тадқиқотлар мавжуд ва яратилган ССЎ ЭМЎ ларда келтирилган ўлчаш хатолиги мос равища $\pm 8\%$ ва $\pm 1\%$ гача эканлигини кўрсатди (4- расм).

Ишлаб чиқилган ССЎ ҲК ЭМЎ ларнинг динамик характеристикалари қуидаги тўртта намунавий режимлар (таъсиrlар)да ўрганилди: 1) доимий магнит оқимли ЭМЎ киришига доимий гидравлик босим таъсир этади; 2) доимий магнит оқимли ЭМЎ киришига синусоидал гидравлик босим таъсир этади; 3) синусоидал магнит оқимли ЭМЎ киришига доимий гидравлик



3- расм. Яратилган ССҮ ХК
ЭМҮ статик характеристикалари:
узлуксиз чизиқлар – назарий; узлукли
чизиқ – экспериментал

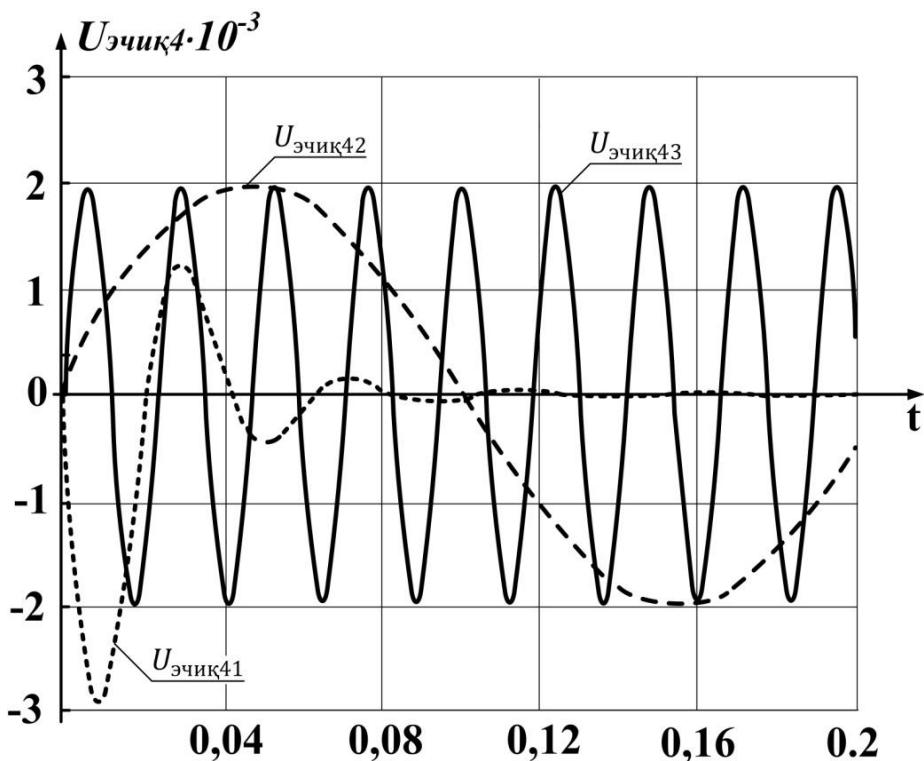


4- расм. ССҮ ЭМҮ дан олдинда
үрнатилган вентилни сув оқими
тезлиги эпюрасини бузиши
натижасида юзага келадиган ўлчаш
хатоликлари эгри чизиқлари: а ва б –
мос равишида яратилган ва мавжуд ССҮ
ЭМҮ лар учун; Р – вентилнинг очилиш
даражаси, %

босим таъсир этади; 4) синусоидал магнит оқимли ЭМҮ киришига синусоидал гидравлик босим таъсир этади. Ушбу режимлар учун ўткинчи (ўтиш) кучланишлари ифодалари ҳосил қилинди. Хусусан, тўртинчи режим учун ифода қўйидаги қўринишга эга (5-расм):

$$U_{\text{э.чик.4}}(t) = \frac{R_{\text{э2}}R_{\text{э3}}k_1U_{\text{hm}}}{2R_{\text{э}}^2\sqrt{(1+\omega_h^2T_{\text{э}}^2)(1+\omega_h^2T_h^2)}} \left\{ \cos[(\omega_h - \omega_{\text{э}})t - \varphi] - \right. \\ \left. - \cos[(\omega_h + \omega_{\text{э}})t - \varphi] + \frac{2\omega_h \left[T_{\text{э}}^2(1+\omega_h^2T_h^2)e^{-\frac{t}{T_{\text{э}}}} - T_h^2(1+\omega_h^2T_{\text{э}}^2)e^{-\frac{t}{T_h}} \right]}{(T_h - T_{\text{э}})\sqrt{(1+\omega_h^2T_{\text{э}}^2)(1+\omega_h^2T_h^2)}} \sin\omega_{\text{э}}t \right\}, \quad (12)$$

бу ерда $R_{\text{э}}^2 = R_{\text{э1}}R_{\text{э2}} + R_{\text{э2}}R_{\text{э3}} + R_{\text{э3}}R_{\text{э1}}$; $R_{\text{э1}} = R_{\text{эс1}}$ – ЭМҮ актив зонасидаги суюқликнинг актив қаршилиги; $R_{\text{э2}} = R_{\text{эс2}}$ – актив зонадан ташқарида суюқлик индукцион ток бирлашадиган қисмининг актив қаршилиги; $R_{\text{э3}} = R_{\text{э.кир.}}$ – иккиласмчи ўлчаш занжирининг кириш қаршилиги; k_1 – пропорционаллик коэффициенти; U_{hm} – ЭМҮ киришига бериладиган синусоидал гидравлик босим амплитуда қиймати; ω_h , $\omega_{\text{э}}$ – мос равишида қувурдаги гидравлик босим ва магнит майдонини ҳосил қилувчи манба частоталари; $T_h = G_h L_h$, $T_{\text{э}} = (R_{\text{э1}}R_{\text{э2}}R_{\text{э3}}C_{\text{э}})/R_{\text{э}}^2$; – мос равишида гидравлик ва электр занжирларининг вақт доимийлари; G_h, L_h – гидравлик занжирнинг актив ўтказувчанлиги ва индуктивлиги; $\varphi = \text{Arctg} \left[\frac{\omega_h(T_{\text{э}} + T_h)}{1 - \omega_h^2 T_{\text{э}} T_h} \right]$.



**5- расм. $B = B_m \sin \omega_3 t$ ва $U_h(t) = U_{hm} \sin \omega_h t$ ҳолатда чиқиши
кучланишининг турли ташкил этувчилиари учун вақт бўйича ўзгариш
қонуниятлари**

Янги ССҮ ҲК ЭМЎ ларнинг динамик режимлар учун олинган ифодалари ва улар эгри чизикларининг таҳлили шуни кўрсатди, ЭМЎ актив зонасида синусоидал магнит майдони ҳосил қилинган ва ўзгартиргич киришига катталиги синусоидал қонуният билан ўзгарувчи гидравлик кучланиш берилган ҳолатда унинг чиқишидаги ўтқинчи кучланиш частоталари мос равища ($\omega_h - \omega_3$), ($\omega_h + \omega_3$) ва (ω_3) иккита турғун ва битта эркин ташкил этувчилардан иборат бўлган учта ташкил этувчидан иборат бўлади. Ўтказилган тадқиқотлар яратилган ССҮ ҲК ЭМЎ лар технологик жараёнларнинг бошқарув тизимларида иккинчи тартибли инерцион звенолар сифатида намоён бўлишини кўрсатди.

Яратилган ССҮ ҲК ЭМЎ ларда ўлчаш хатоликлари магнит майдони иштироқида ва ташқи омил(манба)лардан пайдо бўладиган халақитлар хисобига юзага келиши аниқланди. Ушбу халақитларнинг физик табиати ва ўзгартиргич ўлчаш хатолиги катталигига қўшадиган улушлари аниқланди ва ноль сигналининг номутадиллиги ССҮ ЭМЎ лар ўлчаш хатолигининг асосий ташкил этувчиларидан бири эканлиги кўрсатилди ҳамда уни камайтириш усууллари ишлаб чиқилди.

Яратилган ва мавжуд ССҮ ЭМЎ лар асосий техник характеристикаларининг қиёсий таҳлили яратилган ССҮ ҲК ЭМЎ сезгирилигининг юқорилиги ва асимметрик суюқлик оқимлари сарфини ўлчашдаги хатолигининг кичиклигини кўрсатди (1-жадвал).

Мавжуд ва яратилган ССҮ ЭМҮ лар асосий характеристикалари

Характеристикалар номи	Кўндаланг магнит оқимли			Концент. магнит оқимли (РФ)	Яратилган ССҮ ҲК ЭМҮ
	«Magnetoflow» Чехия	«YOKOGAWA» Япония	«Взлет ЭР» РФ		
Қувур диаметри, мм	100	100	100	100	100
Келтирилган хатолик (δU), $\pm\%$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Асимметрик оқим учун (δU), $\pm\%$	$\geq 5,0$	$\geq 3,0$	$\geq 5,0$	$\geq 3,0$	$1,0 \leq$
Қувват, $B \cdot A$	25,0	20,0	50,0	500,0	25,0
Сезгирилик, $\frac{mB \cdot c}{m^3}$	0,5	0,5	0,5	0,02	3,0
Масса, кг	21	18,0	20,0	41	28,0
Габарит ўлчамлари, мм	210×220× ×345	225×226× ×270	230×244× ×320	230×2600× ×290	230×250× ×300
Ўлчаш диапазони, $x 10^{-4} m^3/c$	0 – 125	0 – 125	0 – 125	0 – 60	0 – 100

ССҮ ҲК ЭМҮ “Навоий кон-металлургия комбинати” Давлат корхонасида қарашли “Бирлашган энергия хизмат” ида шаҳар сув таъминоти тизимидағи насос станцияси иш режимларини бошқарув тизимида қувурдаги сув сарфи ҳақида маълумот берувчи қурилма сифатида қўлланилди. Янги ўзгартиргич ўлчаш сезгирилиги ва асимметрик сув оқими сарфини ўлчашдаги аниқлигининг юқорилиги ҳисобига йиллик иқтисодий самарадорлик 153,7 млн. (бир юз эллик уч миллион етти юз минг) сўмни ташкил этди.

Диссертация иловасида турли физик табиатга эга занжирларнинг энергия-информациян модели ва ПСС аппаратининг асосий элементлари, ишлаб чиқилган ССҮ ҲК ЭМҮларни тадқиқ этишда қўлланиладиган занжирлараро ФТЭ ва занжир параметрларининг техник тавсифлари, шунингдек илмий тадқиқот натижаларининг ишлаб чиқариш жараёнига тадбиқ этилиши тўғрисидаги далолатномалар ва маълумотнома келтирилган.

ХУЛОСА

“Технологик жараёнлар бошқарув тизимлари учун суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичлар” мавзусидаги диссертация бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хуласалар тақдим этилди:

1. Технологик жараёнлар назорат ва бошқарув тизимлари схемаларининг таҳлили асосида уларда қўлланиладиган суюқлик сарфини ўлчовчи ўзгартиргичлар юқори сезгириликка, аниқликка, кенг ўлчаш диапазонига, чизиқли ўзгартириш характеристикасига, турли хил суюқликлар сарфини ўлчай олиш имкониятига, тезкорликка ва юқори ишончлиликка ҳамда кичик масса ва габарит ўлчамларига эга бўлиши лозимлиги аниқланди. Натижада технологик

жараёнлар назорат ва бошқарув тизимлари схемаларини түғри танлашга еришилди;

2. Суюқлик сарфини ўлчовчи ўзгартиргичлар мавжуд турлари асосий характеристикаларини қиёсий таққослаш асосида технологик жараёнлар назорат ва бошқарув тизимлари талабларига кўп жиҳатдан радиал магнит оқимили кондукцион электромагнит ўзгартиргичлар мос келиши аниқланди. Натижада суюқлик сарфини ўлчовчи ўзгартиргичларни түғри танлашга еришилди;

3. Суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргич қувури актив зонасида ўзаро коаксиал жойлашган бир неча очиқ ҳалқасимон қутб наконечникларини жойлаштириш ва ҳар бир ёндош қутб наконечниклари ҳар хил номланган учларини қўзғатиш чулғами ўралган ферромагнит туташтиргичлар билан ўзаро улаш орқали ҳосил қилинган ҳалқасимон каналларда магнит майдони индукцияси ва актив зона узунликларини ошириш ҳисобига ўзгартиргич сезгирилигини бир неча маротаба ошириш мумкинлиги аниқланди. Натижада юқори сезгирилик ва аниқликка эга бўлган ўзгартиргичларни яратиш имконини берди;

4. Яратилган суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргич магнит занжири ҳалқасимон ферромагнит ўзагидаги магнит оқими магнит занжирининг ўртасида ўз йўналишини ўзгартиради, магнит оқимини занжир бўйлаб тарқалиш коэффициентининг ортиши билан унинг тақсимланиш ночизиқлиги ортиб боради, магнит кучланиши (магнит индукцияси) эса магнит занжири ҳалқасимон ҳаво оралигининг боши ва охирида максимум, занжир ўртасида эса минимум қийматларга эга бўлиб, магнит оқимини занжир бўйлаб тарқалиш коэффициентининг ортиши билан магнит кучланиши(магнит индукцияси)нинг минимум қийматгача камайиб бориши аниқланди. Натижада яратилган қурилмалар магнит занжирлари параметрларини таҳлил қилиш имкони яратилди;

5. Яратилган Суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргич магнит занжиридаги ишчи бўлмаган ҳаво оралиғи магнит қаршилиги ($W_{\mu s}$) чекли қийматга эга бўлганда ҳалқасимон ферромагнит ўзакдаги магнит оқими занжир узунлиги бўйлаб ўз йўналишини ўзгартириши ва ўзгариш $W_{\mu s} = 0$ бўлганда магнит занжирининг ўртасида содир бўлиши, $W_{\mu s} = \infty$ бўлганда эса магнит оқими занжир узунлиги бўйлаб ўз йўналишини ўзгартираслиги ҳамда максимал қийматидан нолгача ёки аксинча ўзгариши аниқланди. Натижада яратилган ўзгартиргич магнит занжиридаги ишчи бўлмаган ҳаво оралиғи магнит қаршилигининг турли қийматларида юқори аниқликдаги натижаларни олишга еришилди;

6. Яратилган суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргич магнит тизимлари кўп контурли ва параметрлари тарқоқ жойлашган магнит занжирларидан ташкил топиши ҳамда уларнинг математик моделлари иккинчи тартибли дифференциал тенгламалар системаси кўринишида ифодаланиши аниқланди. Натижада кўп контурли ва параметрлари тарқоқ жойлашган магнит занжирларини ҳисоблаш кетма-кетлигини ишлаб

чиқишига эришилди;

7. Ўтказилган назарий ва эксперименталь тадқиқотлар асосида яратилган Суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргич статик характеристикаси турли гидравлик режимларда ҳам чизиқли кўринишга эга эканлиги ва қувурдаги суюқлик оқими эпюрасини бузувчи маҳаллий гидравлик қаршиликларнинг ЭМЎ чиқиши сигнали катталигига таъсири жуда кичик эканлиги (ўлчаш хатолиги $\pm 1,0\%$ дан ошмаслигини) аниқланди. Натижада яратилга қурилманинг турли гидравлик режимлардаги статик характеристикаларини қуриш имконияти яратилди;

8. Янги суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичларнинг турли намунавий кириш таъсиrlарида динамик характеристикаларини ўрганиш натижаларига кўра ушбу ўзгартиргичлар бошқарув тизимларида иккинчи тартибли инерцион звенолар сифатида намоён бўлиши аниқланди. Натижада яратилган ўзгартиргич динамик тавсифларини ва бошқарув тизими сифат кўрсаткичларини ҳисоблаш аниқлигини оширишга эришилди;

9. Яратилган Суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичларда ҳалақит сигналларининг пайдо бўлиш сабаблари ва уларни бартараф этиш усуллари таҳлили асосида “трансформатор” ва “кутбланиш” ҳалақит сигналларини энг сезиларли эканлиги ҳамда ўлчашларни паст ($0,5 \div 5$ Гц) частотали биполяр магнит майдонида амалга ошириш лозимлиги аниқланди. Натижада ўзгартиргич ўлчаш аниқлигига таъсир эътиувчи омилларни бартараф этишга эришилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ
DS.c.27.06.2017 Т.03.02 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**
**ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА**

АТАУЛЛАЕВ АМИНЖОН ОДИЛОВИЧ

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ РАСХОДА ЖИДКОСТИ
С КОЛЬЦЕВЫМИ КАНАЛАМИ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

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

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

Ташкент – 2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2019.1.PhD/T998.

Диссертация выполнена в Ташкентском институте инженеров железнодорожного транспорта.

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

Научный руководитель:

Амиров Султон Файзуллаевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Сиддиков Илхомжон Хакимович
доктор технических наук, профессор

Назаров Хайриддин Нуридинович
кандидат технических наук, доцент

Ведущая организация:

НИИ ирригации и водных проблем

Защита диссертации состоится «___» ____ 2019 г. в ____ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.T.03.02 при Ташкентском государственном техническом университете. (Адрес: 100095, г Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

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

Автореферат диссертации разослан «___» ____ 2019 г.
(протокол рассылки № «___» от «___» ____ 2019 г.).

Н.Р. Юсупбеков

Председатель научного совета по
присуждению учёных степеней,
т.ф.д., профессор, академик

У.Ф. Мамиров

Ученый секретарь научного совета по
присуждению учёных степеней,
доктор философии (PhD) по техническим наукам

Х.З. Игамбердиев

Председатель научного семинара при
научном совете по присуждению учёных степеней,
т.ф.д., профессор, академик

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. Во всем мире всё больше занимают ведущие позиции вопросы автоматического контроля существующих технологических процессов в различных сферах народного хозяйства, усовершенствования методов и технических средств управления, в том числе методов и алгоритмов управления, а также улучшения их технических характеристик элементов и устройств, расширения их функциональных возможностей и усовершенствования конструкций. В развитых странах мира, в частности в США, Англии, Германии, Франции, Чехии, Японии, России, Китае и других странах уделяется особое внимание совершенствованию технических средств контроля и управления технологическими и производственными параметрами, повышающими эффективность производства на базе комплексной автоматизации производственных процессов и технологий. Вместе с тем, приобретает важное значение повышение чувствительности, точности и быстродействия преобразователей систем управления в технологических процессах, связанных с управлением потоков жидкости, уменьшением погрешности измерения расхода ассиметричных потоков жидкости, повышением надежности при экстремальных условиях эксплуатации и уменьшением массогабаритных показателей.

По всему миру ведутся научно-исследовательские работы, направленные на повышение чувствительности, точности и скорости измерения преобразователей расхода жидкости в системах контроля и управления технологическими процессами, а также в информационно-измерительной системе. В связи с этим, в частности, уделяется особое внимание разработке математических моделей магнитных цепей и электрического поля, создаваемого в потоке электропроводной жидкости, движущейся в активной зоне, под воздействием магнитного поля электромагнитных преобразователей расхода жидкости. Вместе с тем, считается необходимым разработка новых электромагнитных преобразователей расхода жидкости, обладающих высокой чувствительностью, точностью и линейными статическими характеристиками по всему диапазону измерения.

В республике осуществляются мероприятия по усовершенствованию энергосберегающих технологий и технических средств, уменьшающих расход энергии и ресурсов, а также систем контроля и управления технологическими процессами производства. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 гг. отмечены задачи, а именно, «...повышение конкурентоспособности национальной экономики, ...техническое и технологическое обновление производства, ...широкое внедрение в производство энергосберегающих технологий»¹. Реализация данных задач, в том числе разработка электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами для систем управления

¹ Указ Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 г. № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

технологическими процессами является важнейшей задачей.

Данное диссертационное исследование в определенной мере служит осуществлению поставленных нормативно-правовых задач, а именно: Указ Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 г. № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Указ Президента Республики Узбекистан от 26 мая 2017 г. № УП-3012 «О программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере».

Соответствие исследования с приоритетным направлением развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики – II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы. Научные исследования, направленные на решение актуальных задач по разработке электромагнитных преобразователей расхода жидкости, 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), АО «НИИтеплоприбор», (Россия), в Таллинском государственном техническом университете (Эстония), а также в Ташкентском государственном техническом университете, Научно-исследовательском институте “Иrrигации и водных проблем” и Ташкентском институте инженеров железнодорожного транспорта (Узбекистан).

Определенный вклад в решение научных проблем, связанных с разработкой теоретических основ электромагнитных преобразователей расхода жидкости, усовершенствованием их конструкций и схем, а также широкомасштабным промышленным производством данных преобразователей внесли J.A. Shercliff, J.S. Arnold, B. Thurlimann, A. Kolin, L.A. Salami, M.K. Bevir, T. Shimizu, И.Д. Вельт, Ю.В. Михайлова, М.Я. Гаммерман, Э.Г. Звенигородский, Б.И. Никитин, А.К. Кавиев, Л.М. Корсунский, Н.И. Логинов, В.И. Межбурд, М.П. Росманн, Г.Х. Кирштейн, Ф.П. Неймарк, Ю.П. Мальцев, М.Ф. Зарипов, Р.К. Азимов, А.А. Азимов, С.П. Колмыков, С.Ф. Амиров и др.

Вместе с тем, не достаточно изучались вопросы повышения точности и чувствительности измерения расхода ассиметричных потоков жидкости, а также обеспечения линейности функции преобразования.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта №3 «Совершенствование электромагнитных измерительных средств» (2012-2016).

Целью исследования является разработка электромагнитных преобразователей расхода жидкости с повышенной чувствительностью, точностью измерения асимметричных потоков жидкости и линейностью

статических характеристик для систем управления технологическими процессами.

Задачи исследования:

формулировка основных требований, предъявляемых к преобразователям расхода жидкости со стороны систем управления технологическими процессами на современном этапе;

сравнительный анализ основных технических характеристик существующих преобразователей расхода жидкости;

выбор и обоснование типа преобразователей расхода жидкости для систем управления технологическими процессами;

разработка новых конструкций электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами с повышенной чувствительностью, точностью измерения асимметричных потоков жидкости и линейностью статических характеристик;

разработка математических моделей новых электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами;

исследование основных характеристик разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами.

Объектом исследования являются электромагнитные преобразователи расхода жидкости с кольцевыми каналами с повышенной чувствительностью, точностью измерения асимметричных потоков жидкости и линейностью статических характеристик.

Предметом исследования являются электромагнитные преобразователи расхода жидкости с кольцевыми каналами с повышенной чувствительностью, точностью и линейностью статических характеристик, а также их основные характеристики.

Методы исследований. В процессе исследований использованы теория электрических и магнитных цепей с распределенными параметрами, теория электромагнитного поля и теория погрешностей, энергоинформационные модели цепей различной физической природы и аппарат параметрических структурных схем, а также использовались экспериментальные методы исследований.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработаны электромагнитные преобразователи расхода жидкости с кольцевыми каналами с повышенной чувствительностью, точностью измерения асимметричных потоков жидкости и линейностью статических характеристик;

разработана методика расчета многоконтурных электромагнитных цепей с распределенными параметрами для электромагнитных измерительных преобразователей;

разработаны математические модели новых электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами с учетом распределенности параметров электрических и магнитных цепей;

обоснована возможность повышения чувствительности преобразователя за счет введения между замкнутыми полюсными наконечниками коаксиально и взаимно зеркально расположенных незамкнутых кольцевых магнитопроводов, каждый из которых соединен с ферромагнитной перемычкой с

соответствующими разноименными полюсными наконечниками.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработаны новые конструктивные схемы электромагнитного преобразователя расхода жидкости с кольцевыми каналами;

разработаны параметрические структурные схемы для исследования динамических характеристик электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами.

Достоверность полученных результатов исследования обосновывается корректным применением методов расчета распределенности параметров цепей и систем, основных законов теории и методов расчета электромагнитного поля, а также подтверждается совпадением теоретических и экспериментальных результатов.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования характеризуется разработанным методом расчета магнитных цепей с многоконтурными и распределенными параметрами посредством создания математических моделей электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке методики расчета магнитных цепей электромагнитных преобразователей с распределенными параметрами методом составления дифференциальных уравнений для электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами и их магнитных цепей, а также улучшении их основных технических характеристик, что обеспечивает сокращение времени на стадии их поискового конструирования и составлении морфологических таблиц.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов на основе исследования электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами для систем управления технологическими процессами:

получен патент на устройство электромагнитного преобразователя расхода жидкости с кольцевыми каналами с высокой чувствительностью, точностью и линейностью статической характеристики Агентства интеллектуальной собственности Республики Узбекистан (№IAP 04960-2014 г.). В результате достигнута высокая чувствительность и точность электромагнитных преобразователя расхода жидкости с кольцевыми каналами для систем управления технологическими процессами, линейность преобразования расхода жидкости в электрический сигнал по всему диапазону измерения, а также высокая надежность и устойчивость характеристик в экстремальных условиях эксплуатации данных преобразователей;

разработан электромагнитный преобразователь расхода жидкости с кольцевыми каналами с повышенной чувствительностью, точностью и линейностью статических характеристик при измерении ассиметричных потоков жидкости, который внедрен в производственный процесс подведомственного предприятия “Объединенная энергослужба” (справка № 01-01-10/13380 от 21 октября 2019 года Навоийского горно-металлургического

комбината). В результате научных исследований было достигнуто повышение чувствительности и линейности статических характеристик по всему диапазону измерения электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами, а также уменьшение погрешности при измерении расхода ассиметричных потоков жидкости;

внедрен метод расчета многоконтурных электромагнитных цепей электромагнитных измерительных преобразователей с распределенными параметрами в систему городского водоснабжения “Объединенная энергослужба” (справка № 01-01-10/13380 от 21 октября 2019 года Навоийского горно-металлургического комбината). В результате создана возможность разработки последовательного расчета электромагнитных цепей с многоконтурными и распределенными параметрами;

внедрены математические модели новых электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами с учетом распределения параметров электрических и магнитных цепей в систему городского водоснабжения “Объединенная энергослужба” (справка № 01-01-10/13380 от 21 октября 2019 года Навоийского горно-металлургического комбината). В результате создана возможность повышения точности расчета качественных показателей системы, где применяются разработанные преобразователи.

Апробация результатов исследования. Теоретические и практические результаты данного исследования прошли апробацию на 9 международных и на 7 республиканских конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 25 научных работ, в том числе 7 статей в периодических научных журналах, рекомендованных ВАК РУз, из них 2 статьи в зарубежных и 5 статей в республиканских журналах, а также в Агентстве интеллектуальной собственности РУз получены 1 патент на изобретение и 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложения. Объем диссертации составляет 125 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, освещено состояние вопроса, сформулированы цель и задачи исследования, характеризуется объект и предмет исследования, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологии республики, а также соответствие планам научно-исследовательских работ высшего учебного заведения, где была выполнена данная диссертация, излагаются научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов научных исследований в производство.

В первой главе – «Анализ измерительных преобразователей расхода жидкости» – изучены характерные особенности схем системы управления

технологическими процессами, связанными с расходом жидкости в различных сферах народного хозяйства. Выявлены основные требования к первичным измерительным преобразователям расхода жидкости в системах управления. Установлено, что измерительные преобразователи расхода жидкости, применяемые в системах управления технологическими процессами должны иметь повышенную чувствительность и точность при различных режимах потока жидкости (ламинарный, турбулентный, асимметричный и т.д.), надежность, линейную характеристику преобразования и стабильные технические показатели в экстремальных условиях эксплуатации.

Результаты сравнительной оценки основных технических характеристик измерительных преобразователей расхода жидкости показали, что кондукционные электромагнитные измерительные преобразователи по сравнению с другими типами преобразователей расхода, наиболее полно отвечают требованиям систем контроля и управления технологическими процессами из-за возможности измерения расхода жидкости большого и малого объема, а также обратного направления, возможности измерения независимо от изменения физико-химических свойств жидкости, точности измерения агрессивных, вязких жидкостей, густых и пульсирующих потоков, а также достоверности измерения с помощью имитационных методов.

Была составлена полная характеристика измерительных преобразователей расхода жидкости, функционирующих на основе электромагнитного принципа. Анализ свойств и особенностей конструктивных схем электромагнитных преобразователей расхода жидкости, имеющей поперечное, концентрированное и радиальное магнитное поле показал, что электромагнитный преобразователь расхода жидкости с кольцевыми каналами с радиальным магнитным потоком, имеет повышенную чувствительность измерения расхода в сравнительно малых трубах (диаметр трубы приблизительно 100 мм) и высокую точность для ассиметричных потоков.

Вместе с тем, анализ свойств и особенностей конструктивных схем электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами и с радиальным магнитным потоком показал, что необходимо проводить последующие исследования по разработке новых конструкций электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами, измеряющие расход симметричных и ассиметричных потоков жидкости в трубах разного диаметра (больших и малых), созданию их математических моделей, исследованию основных технических характеристик.

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

Вторая глава – «Усовершенствование конструкций электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами» – посвящена конструктивным усовершенствованиям существующих электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами с помощью аппарата параметрических структурных схем (ПСС), позволяющих интерпретировать процессы и явления различной физической природы с использованием методов энерго-информационных и морфологических матриц

технического творчества, а также единого математического аппарата.

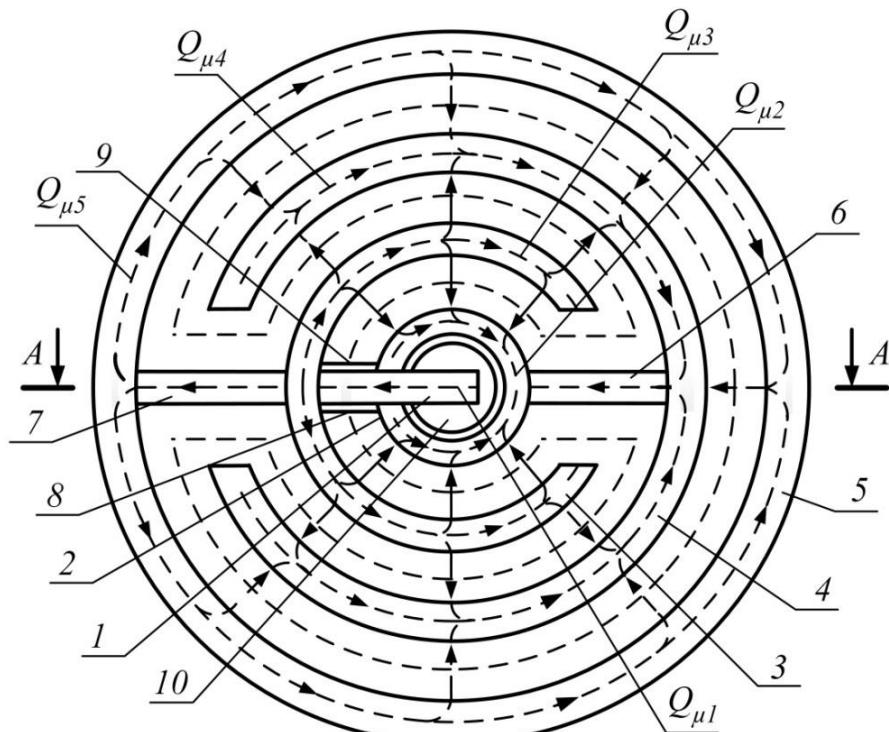
На основе анализа патентной пары «Изобретение-прототип», входящей в состав подгрупп G 01 F 1/58 и G 01 P 5/00 Международной классификации изобретений, выявлены конструктивные, технологические и параметрические обобщенные приемы и методы совершенствования конструкций электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами. На основе анализа полученных методов выявлено, что наибольшее число обобщенных приемов используется для усовершенствования конструкции магнитной системы преобразователя, а наименьшее – для усовершенствования формы трубы, а также часто улучшаемая характеристика преобразователя – это его точность, наименьшая – быстродействие.

Для усовершенствования с помощью морфологических матриц конструкций электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами в качестве элементов морфологической матрицы, были приняты труба преобразователя, полюсные наконечники, источник магнитодвижущей силы, электроды и внутренняя изоляция трубы. Также выявлено, что элемент, имеющий наибольшее число вариантов морфологической матрицы – это полюсные наконечники преобразователя, а наименьшее – внутренняя изоляция трубы.

Для разработанного преобразователя достигнуто повышение чувствительности преобразователя за счет повышения индукции магнитного поля в кольцевых каналах и длин активной зоны, созданных посредством соединения ферромагнитных соединителей и обмоткой возбуждения для разных концов каждого из смежных полюсных наконечников и размещения нескольких коаксиально расположенных незамкнутых кольцевых наконечников в активной зоне трубы электромагнитного преобразователя расхода жидкости с кольцевыми каналами (рис.1).

В третьей главе – «Математические модели электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами» – исследованы одно- и многоконтурные магнитные цепи электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами и электрические цепи активной зоны в качестве цепей с распределенными параметрами, а также получены соответствующие аналитические выражения.

В целях упрощения анализа магнитных и электрических цепей исследуемых преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами были введены следующие допущения: 1) кольцевые ферромагнитные сердечники и соединяющий их ферромагнитный стержень изготовлены из одинакового материала в монолитном виде; 2) магнитные потоки рассеяния по двум краям кольцевых ферромагнитных сердечников вдоль оси трубы очень малы, поэтому их можно не учитывать; 3) магнитное сопротивление ферромагнитных сердечников не зависит от значения индукции их магнитного поля, то есть магнитная цепь функционирует в линейной части основной кривой намагничивания; 4) из-за меньшей частоты изменения по времени магнитного поля, вихревые токи в ферромагнитных сердечниках имеют наименьшие значения, поэтому их можно не учитывать.



1 - Z образный сердечник; 2,5 - замкнутые кольцевые магнитопроводы; 3,4 - замкнутые кольцевые магнитопроводы; 6,7 - ферромагнитные соединители; 8,9 - тонкие электроды; 10 - обмотка возбуждения

Рис.1. Конструктивная схема электромагнитного преобразователя расхода жидкости с кольцевыми каналами

С учетом распределенности параметров цепей и рассеяния магнитных потоков были созданы математические модели одноконтурных магнитных цепей преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами:

$$Q_{\mu 1}(\alpha) = F_{\text{в}} \frac{\beta}{\Delta_1} \{ (W_{\mu s} + Z_{\mu \text{п}} \alpha_{\text{м}}) \{ \text{sh}(\beta \alpha^*) - \text{sh}[\beta(1 - \alpha^*)] \} - (W_{\mu s} \text{sh} \beta \} . \quad (1)$$

$$Q_{\mu 2}(\alpha) = -F_{\text{в}} \frac{\beta}{\Delta_1} \{ (W_{\mu s} + Z_{\mu \text{п}} \alpha_{\text{м}}) \{ \text{sh}(\beta \alpha^*) - \text{sh}[\beta(1 - \alpha^*)] \} + (W_{\mu s} \text{sh} \beta \} , \quad (2)$$

$$B(\alpha) = \mu_0 \frac{U_{\mu}(\alpha)}{\delta_p} = F_{\text{в}} \mu_0 \frac{2(W_{\mu s} + Z_{\mu \text{п}} \alpha_{\text{м}})}{\delta_p \Delta_1} \{ \text{ch}(\beta \alpha^*) + \text{ch}[\beta(1 - \alpha^*)] \} . \quad (3)$$

$$B(\rho) = \left| \frac{Q_{\mu 2}(\alpha_{\text{м}})}{b[2\pi\rho - (\delta_{s1} + \delta_{s2} + h_3)]} \right| = \left| F_{\text{в}} \frac{2\beta \text{sh} \beta (W_{\mu s} + 0,5Z_{\mu \text{п}} \alpha_{\text{м}})}{b[2\pi\rho - (\delta_{s1} + \delta_{s2} + h_3)] \Delta_1} \right| , \quad (4)$$

где $Q_{\mu 1}(\alpha)$, $Q_{\mu 2}(\alpha)$, $B(\alpha)$, $B(\rho)$ - магнитные потоки и магнитная индукция в кольцевых магнитопроводах; $F_{\text{в}}$ - магнитодвижущая сила обмотки возбуждения; $W_{\mu s}$ - магнитное сопротивление нерабочих воздушных зазоров δ_{s1} и δ_{s2} , по которым замыкаются магнитные потоки рассеяния; $\beta = \sqrt{(Z_{\mu \text{п}1} + Z_{\mu \text{п}2})C_{\mu \text{п}}} \alpha_{\text{м}}$ - коэффициент затухания магнитного поля вдоль цепи; $Z_{\mu \text{п}1} = \frac{2\pi r_{1\text{cp}} - h_3 - \delta_{s1}}{\mu \mu_0 b h_1 \alpha_{\text{м}}} = Z_{\mu \text{п}2} = \frac{2\pi r_{2\text{cp}} - h_3 - \delta_{s2}}{\mu \mu_0 b h_2 \alpha_{\text{м}}} = Z_{\mu \text{п}}$; $C_{\mu \text{п}} = \mu_0 \frac{0,5b\pi(r_{1\text{cp}} + r_{2\text{cp}})}{\delta_p \alpha_{\text{м}}}$ -

погонное значение магнитных сопротивлений кольцевых магнитопроводов и магнитной ёмкости кольцевых воздушных зазоров между ними, приходящиеся на единицу угла α ; h_1 h_2 , b и δ_p - толщина ферромагнитных сердечников и

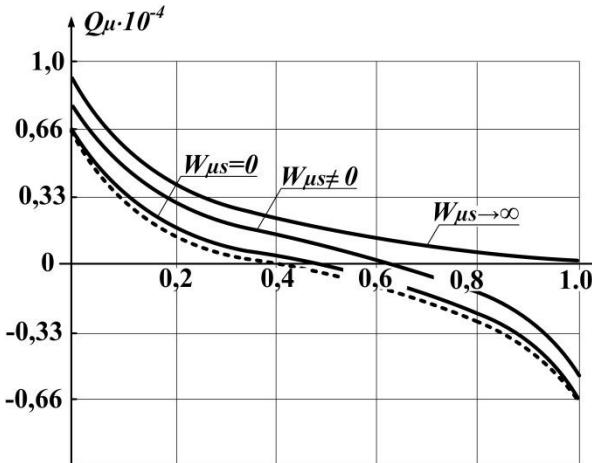
соединяющих их стержней, их длина вдоль канала и рабочий воздушный зазор между сердечниками соответственно; $\mu, \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – соответственно относительная магнитная проницаемость материала ферромагнитного сердечника и абсолютная магнитная проницаемость воздуха (магнитная постоянная); α, α_m - угловая координата и ее максимальное значение; $\alpha^* = \frac{\alpha}{\alpha_m}$; ρ - радиальная координата; $\Delta_1 = 2Z_{\mu\pi}\alpha_m[(Z_{\mu\pi}\alpha_m + W_{\mu s})(1 + ch\beta) - \beta sh\beta(2Z_{\mu 0}W_{\mu s} + 2Z_{\mu 0}Z_{\mu\pi}\alpha_m + W_{\mu s}Z_{\mu\pi}\alpha_m)]$.

Было выявлено, что магнитный поток в кольцевом ферромагнитном сердечнике магнитной цепи разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами меняет свое направление в середине магнитной цепи. С повышением коэффициента затухания магнитного потока вдоль цепи повышается нелинейность его распределения, магнитное напряжение (магнитная индукция) в начале и конце кольцевого воздушного зазора магнитной цепи достигает своего максимального, а в середине цепи – минимального значений. С увеличением коэффициента затухания магнитного потока вдоль цепи уменьшается минимальное значение магнитного напряжения (магнитной индукции).

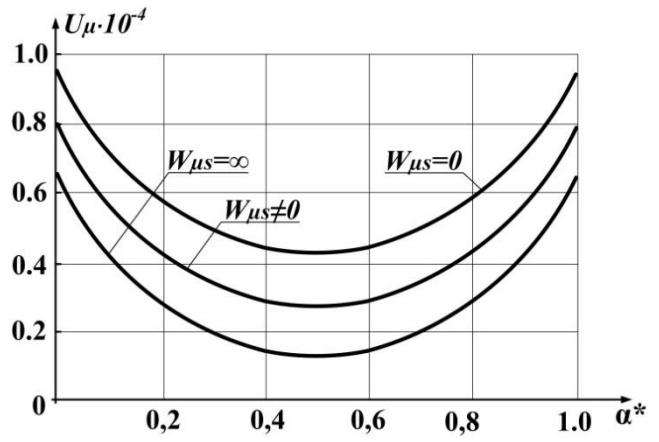
Анализ аналитических выражений и построенные на их основе кривые магнитного потока и магнитного напряжения (магнитной индукции) для магнитной цепи разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами (рис. 2) показал, что при ограниченном значении магнитного сопротивления ($W_{\mu s}$) нерабочего воздушного зазора, магнитный поток в кольцевом ферромагнитном сердечнике меняет свое направление вдоль длины цепи и это изменение направления происходит в середине магнитной цепи при $W_{\mu s} = 0$ (погрешность вычисления цепи составляет $7 \div 11\%$), при $W_{\mu s} = \infty$ магнитный поток не меняет своего направления вдоль цепи, а меняется от максимального значения до нуля и наоборот (погрешность вычисления цепи составляет $18 \div 22\%$).

Установлено, что магнитные системы разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами образуют многоконтурные магнитные цепи с распределенными параметрами, а их математические модели можно представить в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} \frac{d^2U_{\mu 12}}{dx^2} = (Z_{\mu\pi 1} + Z_{\mu\pi 2})C_{\mu\pi 12}U_{\mu 12} + Z_{\mu\pi 3}C_{\mu\pi 23}U_{\mu 23}, \\ \frac{d^2U_{\mu 23}}{dx^2} = Z_{\mu\pi 2}C_{\mu\pi 12}U_{\mu 12} + (Z_{\mu\pi 2} + Z_{\mu\pi 3})C_{\mu\pi 23}U_{\mu 23} + Z_{\mu\pi 3}C_{\mu\pi 34}U_{\mu 34}, \\ \frac{d^2U_{\mu 34}}{dx^2} = Z_{\mu\pi 3}C_{\mu\pi 23}U_{\mu 23} + (Z_{\mu\pi 3} + Z_{\mu\pi 4})C_{\mu\pi 34}U_{\mu 34} + Z_{\mu\pi 4}C_{\mu\pi 45}U_{\mu 45}, \\ \frac{d^2U_{\mu 45}}{dx^2} = Z_{\mu\pi 4}C_{\mu\pi 34}U_{\mu 34} + (Z_{\mu\pi 4} + Z_{\mu\pi 5})C_{\mu\pi 45}U_{\mu 45}. \end{cases} \quad (5)$$



а)



б)

Рис.2. Кривые зависимостей различных значений магнитного сопротивления нерабочего воздушного зазора магнитного потока (а) и магнитного напряжения (магнитной индукции) (б)

Математические модели магнитной цепи разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами определены на примере решения системы дифференциальных уравнений для двухконтурной магнитной цепи с распределенными параметрами:

$$U_{\mu 12} = C_1 ch[\beta_1(1 - x^*)] + C_2 sh[\beta_1(1 - x^*)] + C_3 sh(\beta_1 x^*) + \\ + C_4 sh[\beta_2(1 - x^*)] + C_5 ch[\beta_2(1 - x^*)] - C_6 sh(\beta_2 x^*), \quad (6)$$

$$U_{\mu 23} = C_1 ch[\beta_1(1 - x^*)] + C_2 sh[\beta_1(1 - x^*)] + C_3 sh(\beta_1 x^*) - \\ - C_4 sh[\beta_2(1 - x^*)] - C_5 ch[\beta_2(1 - x^*)] + C_6 sh(\beta_2 x^*), \quad (7)$$

$$Q_{\mu 1} = -\frac{1}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_1 sh[\beta_1(1 - x^*)] - \frac{1}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_2 ch[\beta_1(1 - x^*)] + \\ + \frac{1}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_3 ch(\beta_1 x^*) - \frac{1}{Z_{\mu}} \beta_2 C_4 ch[\beta_2(1 - x^*)] - \frac{1}{Z_{\mu}} \beta_2 C_5 sh[\beta_2(1 - x^*)] - \\ - \frac{1}{Z_{\mu}} \beta_2 C_6 ch(\beta_2 x^*) + \frac{2F_B}{Z_{\mu}}, \quad (8)$$

$$Q_{\mu 2} = -\frac{2}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_1 sh[\beta_1(1 - x^*)] - \frac{2}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_2 ch[\beta_1(1 - x^*)] + \\ + \frac{2}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_3 ch(\beta_1 x^*) + \frac{F_B}{3Z_{\mu}}, \quad (9)$$

$$Q_{\mu 3} = \frac{1}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_1 sh[\beta_1(1 - x^*)] + \frac{1}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_2 ch[\beta_1(1 - x^*)] - \\ - \frac{1}{3Z_{\mu}} \beta_1 C_3 ch(\beta_1 x^*) - \frac{1}{Z_{\mu}} \beta_2 C_4 ch[\beta_2(1 - x^*)] - \frac{1}{Z_{\mu}} \beta_2 C_5 sh[\beta_2(1 - x^*)] - \\ - \frac{1}{Z_{\mu}} \beta_2 C_6 ch(\beta_2 x^*) + \frac{2F_B}{Z_{\mu}}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
\text{здесь } C_1 &= \frac{Q_{\mu s}(2W_{\mu s}+Z_{\mu t})(2Z_{\mu} \beta_1 s h \beta_2 + 4Z_{\mu a b} \beta_1 \beta_2 c h \beta_2)}{\Delta_3}; & C_2 &= \frac{(2W_{\mu s}+Z_{\mu t})6Q_{\mu s}Z_{\mu} \beta_2 c h \beta_2}{\Delta_3}; \\
C_3 &= \frac{6(Q_{\mu 1 t}+Q_{\mu 3 t})Z_{\mu t}Z_{\mu} \beta_2 - 4F_{\nu} Z_{\mu} s h \beta_2 + 4F_{\nu} Z_{\mu a b} \beta_2 c h \beta_2}{\Delta_3}; & C_4 &= \frac{2(Q_{\mu 1 t}+Q_{\mu 3 t})Z_{\mu t}Z_{\mu} \beta_1 c h \beta_1}{\Delta_3}; \\
C_5 &= \frac{2(Q_{\mu 1 t}+Q_{\mu 3 t})Z_{\mu t} \beta_2 (2Z_{\mu a b} \beta_1 c h \beta_1 + 3Z_{\mu} s h \beta_1)}{\Delta_3}; & C_6 &= \frac{2Q_{\mu s}Z_{\mu} \beta_1 (2W_{\mu s}+Z_{\mu t}) + 4F_{\nu} Z_{\mu} s h \beta_2 + 4F_{\nu} Z_{\mu a b} \beta_2 c h \beta_2}{\Delta_3}.
\end{aligned}$$

Установлено, что при создании математической модели разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами, распределение скорости потока жидкости по поперечному сечению кольцевого канала представляется в виде следующих аналитических выражений: 1) скорость потока жидкости, меняющееся на основе линейной закономерности по поперечному сечению трубы; 2) скорость потока жидкости, меняющееся на основе квадратичной закономерности по поперечному сечению трубы.

При разработке математической модели электрического поля, которое индуцируется под воздействием магнитного поля жидкости, движущейся в активной зоне разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами, использовались следующие критические условия для явлений, меняющихся на основе линейной закономерности и центробежной квадратичной закономерности по поперечному сечению трубы, а также для электрических и магнитных полей:

$$\begin{aligned}
J_c = 0, \frac{\partial \varphi_c}{\partial n} = 0; B_n^* = B_n^c; \nabla^2 \varphi_{\text{п.э.}} = 0; J_{\text{п.э.}} = -\sigma_{\text{п.э.}} \nabla \varphi_{\text{п.э.}}; \sigma_{\text{ж}} \left(-\frac{\partial \varphi_{\text{ж}}}{\partial n} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right) = \\
= \sigma_{\text{п.э.}} \frac{\partial \varphi_{\text{п.э.}}}{\partial n}; \frac{\partial \varphi_{\text{ж}}}{\partial \tau} = \frac{\partial \varphi_{\text{п.э.}}}{\partial \tau}; J_c = -\sigma_{\text{ж}} \nabla \varphi_{\text{ж}}; \sigma_{\text{ж}} \frac{\partial \varphi_{\text{ж}}}{\partial n} = \sigma_{\text{п.э.}} \frac{\partial \varphi_{\text{п.э.}}}{\partial n}; \frac{\partial \varphi_{\text{п.э.}}}{\partial n} = 0. \quad (11)
\end{aligned}$$

где $J_{\text{ж}}$, J_c , $J_{\text{п.э.}}$, $\varphi_{\text{ж}}$, φ_c , $\varphi_{\text{п.э.}}$, $\sigma_{\text{ж}}$, $\sigma_{\text{п.э.}}$ – вектор плотности тока, электрический потенциал и проводимость жидкости, в стенках трубы и в плоских электродах соответственно; \mathbf{n} , τ – единичные векторы соответственно, перпендикулярные к внешним и внутренним стенкам соответствующих труб, а также касательной плоскости на поверхности границы “Плоский электрод – жидкость”; B_n^* , B_n^c – нормальные составляющие индукции магнитного поля соответственно жидкости, внешних и внутренних стенок труб; \mathbf{v} – вектор скорости потока жидкости в кольцевых каналах.

В четвертой главе – “Исследование основных характеристик электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами” – изучены статические и динамические характеристики разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами, погрешности и способы их уменьшения, а также вопросы применения данных преобразователей на практике.

Подставляя математические выражения индукции магнитного поля активной зоны преобразователя разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами и распределение скорости потока жидкости в основное уравнение расходомера жидкости $\nabla^2 \varphi_c = \operatorname{div}(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ и с учетом граничных условий для электрических и

магнитных полей в кольцевых каналах были получены статические характеристики на основе использования программы Femlab (рис.3).

Сравнительный анализ статических характеристик, построенных на основе математических моделей разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами и результатов проведенных экспериментов показал, что разница между ними не превышает $8 \div 11\%$ и они имеют линейный вид по всему диапазону измерения. Экспериментальные исследования, проведенные в целях изучения влияния местного гидравлического сопротивления (дисковый затвор-вентиль) – источника возмущения потока жидкости в трубах на величину выходного сигнала преобразователей расхода жидкости показали, что погрешности измерения в существующих и разработанных электромагнитных преобразователях составляют $\pm 8\%$ и $\pm 1\%$ соответственно (рис.4).

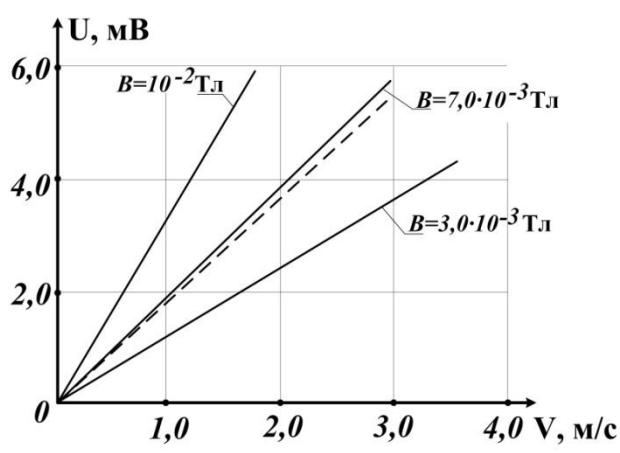


Рис.3. Статические характеристики разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами: прямые линии – теоретические; пунктирные линии – экспериментальные

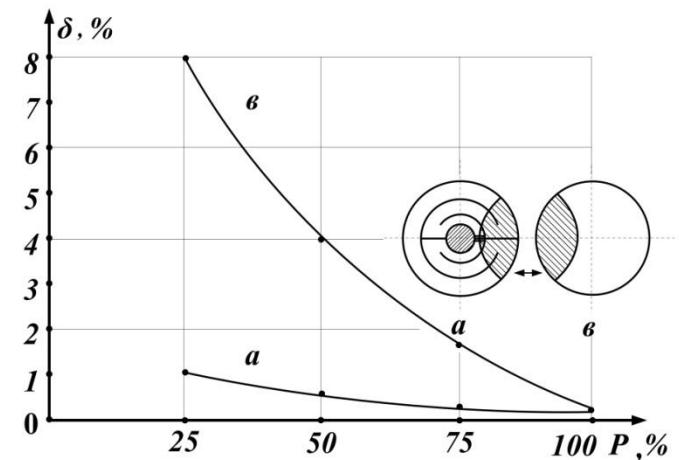


Рис.4. Кривые погрешностей измерения, появляющиеся в результате искажения потока воды вентилем, установленного перед преобразователем расхода жидкости: а и б – соответственно для разработанных и существующих преобразователей; Р – степень открытия вентиля, %

Динамические характеристики разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами были исследованы на примере влияния следующих четырех образцовых режимов: 1) на вход электромагнитного преобразователя расхода подается постоянное гидравлическое давление при постоянном магнитном поле; 2) на вход электромагнитного преобразователя расхода подается синусоидальное гидравлическое давление при постоянном магнитном поле; 3) на вход электромагнитного преобразователя расхода подается постоянное гидравлическое давление при синусоидальном магнитном поле; 4) на вход электромагнитного преобразователя расхода подается синусоидальное

гидравлическое давление при синусоидальном магнитном поле. Для этих режимов были получены выражения переходных напряжений. В частности, для четвертого режима выражение имеет следующий вид (рис.5):

$$U_{\text{э.вых.4}}(t) = \frac{R_{\text{э2}}R_{\text{э3}}k_1U_{\text{hm}}}{2R_{\text{э}}^2\sqrt{(1+\omega_h^2T_{\text{э}}^2)(1+\omega_h^2T_h^2)}} \left\{ \cos[(\omega_h - \omega_{\text{э}})t - \varphi] - \right. \\ \left. - \cos[(\omega_h + \omega_{\text{э}})t - \varphi] + \frac{2\omega_h \left[T_{\text{э}}^2(1+\omega_h^2T_h^2)e^{-\frac{t}{T_{\text{э}}}} - T_h^2(1+\omega_h^2T_{\text{э}}^2)e^{-\frac{t}{T_h}} \right]}{(T_h - T_{\text{э}})\sqrt{(1+\omega_h^2T_{\text{э}}^2)(1+\omega_h^2T_h^2)}} \sin\omega_{\text{э}}t \right\}, \quad (12)$$

где $R_{\text{э}}^2 = R_{\text{э1}}R_{\text{э2}} + R_{\text{э2}}R_{\text{э3}} + R_{\text{э3}}R_{\text{э1}}$; $R_{\text{э1}} = R_{\text{эс1}}$ – активное сопротивление жидкости в активной зоне электромагнитного преобразователя; $R_{\text{э2}} = R_{\text{эс2}}$ – активное сопротивление жидкости вне активной зоны, по которой замыкаются индукционные токи; $R_{\text{э3}} = R_{\text{э.вход.}}$ – входное сопротивление вторичной измерительной цепи; k_1 – коэффициент пропорциональности; U_{hm} – амплитудное значение синусоидального гидравлического давления, действующего на вход электромагнитного преобразователя; ω_h , $\omega_{\text{э}}$ – частоты источника, образующего гидравлическое давление в трубе и магнитного поля соответственно; $T_h = G_h L_h$, $T_{\text{э}} = (R_{\text{э1}}R_{\text{э2}}R_{\text{э3}}C_{\text{э}})/R_{\text{э}}^2$; – постоянные времени гидравлических и электрических цепей соответственно; G_h , L_h – активная проводимость и индуктивность гидравлической цепи; $\varphi = \text{Arctg} \left[\frac{\omega_h(T_{\text{э}} + T_h)}{1 - \omega_h^2 T_{\text{э}} T_h} \right]$.

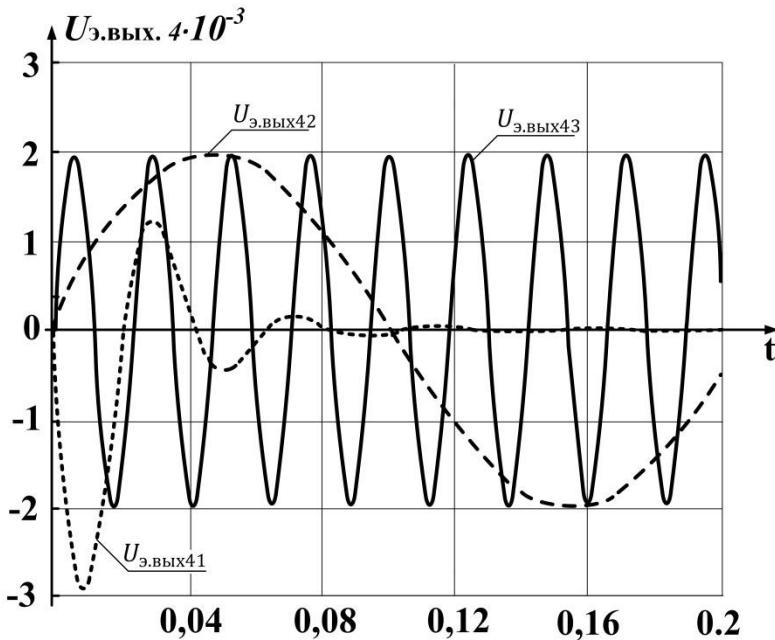


Рис. 5. Законы преобразования по времени для различных составных выходного напряжения при $B = B_m \sin\omega_{\text{э}}t$ и $U_h(t) = U_{\text{hm}} \sin\omega_h t$

Анализ выражений и их кривых, полученных для динамических режимов новых электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами показал, что при создании синусоидального магнитного поля в активной зоне электромагнитного преобразователя и оказании гидравлического

напряжения, величина которого меняется под воздействием синусоидального закона, частоты переходного напряжения на его выходе будут образованы из трех составляющих: два постоянных ($\omega_h - \omega_3$), ($\omega_h + \omega_3$) и одно свободное (ω_3). Также проведенные исследования показали, что разработанные электромагнитные преобразователи расхода жидкости с кольцевыми каналами проявляются в виде инерционных звеньев второго порядка в системах управления технологическими процессами.

Установлено, что погрешности измерения разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами могут появляться за счет влияния магнитного поля и помех внешних факторов (источников). Выявлены физическая природа данных помех и их доля воздействия на величину погрешности измерения преобразователя. Также показано, что неустойчивость сигнала нуля является одной из основных составляющих погрешностей измерения электромагнитных преобразователей расхода жидкости. Разработаны методы их уменьшения.

Сравнительный анализ основных технических характеристик существующих и разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости показал, что новые электромагнитные преобразователи с кольцевыми каналами, измеряющие расход жидкости имеют повышенную чувствительность и наименьшую долю погрешностей при измерении расхода ассиметричных потоков жидкости (табл.1).

Таблица 1
Основные характеристики существующих и разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости

Наименование характеристик	С поперечным магнитным потоком			С концентрическим магнитным потоком (РФ)	Разработанный ЭПР с КК
	«Magnetoflow» (Чехия)	«YOKOGAWA» (Япония)	«Взлет ЭР» (РФ)		
Диаметр трубы, мм	100	100	100	100	100
Приведенная погрешность (δU), $\pm\%$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Для асимметричного потока (δU), $\pm\%$	$\geq 5,0$	$\geq 3,0$	$\geq 5,0$	$\geq 3,0$	$1,0 \leq$
Мощность, В · А	25,0	20,0	50,0	500,0	25,0
Чувствительность, $\frac{мВ·с}{м^3}$	0,5	0,5	0,5	0,02	3,0
Масса, кг	21	18,0	20,0	41	28,0
Габариты, мм	$210 \times 220 \times 345$	$225 \times 226 \times 270$	$230 \times 244 \times 320$	$230 \times 2600 \times 290$	$230 \times 250 \times 300$
Диапазон измерения, $\times 10^{-4} \frac{м^3/с}{м^3}$	0 – 125	0 – 125	0 – 125	0 – 60	0 – 100

Электромагнитный преобразователь расхода жидкости с кольцевыми каналами внедрен в производственный процесс подведомственного предприятия “Объединенная энергослужба” при Государственном предприятии

“Новоийский горно-металлургический комбинат” в качестве устройства, показывающего сведения о расходе жидкости в трубопроводах системы управления режимами работы насосной станции в системе городского водоснабжения. Годовой экономический эффект от внедрения нового преобразователя за счет высокой чувствительности и точности измерения расхода ассиметричных потоков жидкости составил 153,7 млн. (сто пятьдесят три миллиона семьсот тысяч) сум.

В приложении диссертации приведены основные элементы энергоинформационной модели цепей различной физической природы и аппарата ПСС, технические характеристики межцепных физико-технических эффектов, используемых при исследовании разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами и параметров цепи, а также акты внедрения и справки об использовании результатов научных исследований в производство.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предоставлено следующее заключение на основе проведенных исследований по диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам на тему «Электромагнитные преобразователи расхода жидкости с кольцевыми каналами для систем управления технологическими процессами»:

1. Установлено, что преобразователи расхода жидкости, применяемые в системах контроля и управления технологическими процессами, должны обладать повышенной чувствительностью, точностью, линейностью преобразования по всему диапазону, возможностью измерения расхода различных жидкостей, надежностью и быстродействием, а также наименьшими массогабаритными показателями. В результате достигнут правильный выбор схем систем контроля и управления технологическими процессами.

2. Сравнительным анализом основных технических характеристик существующих преобразователей расхода жидкости установлено, что поставленным требованиям систем контроля и управления технологическими процессами наиболее полно отвечают кондукционные электромагнитные преобразователи с радиальным магнитным потоком. В результате достигнут приемлемый выбор типа преобразователей расхода жидкости.

3. Достигнуто повышение чувствительности преобразователя за счет повышения индукции магнитного поля в кольцевых каналах и увеличения общей длины активной зоны за счет введения между замкнутыми полюсными наконечниками коаксиально и взаимно зеркально расположенных незамкнутых кольцевых магнитопроводов, каждый из которых соединен с ферромагнитными перемычками с соответствующими разноименными полюсными наконечниками. В результате разработаны преобразователи с повышенной чувствительностью и точностью.

4. Выявлено, что магнитный поток в кольцевом ферромагнитном сердечнике магнитной цепи разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами меняет свое направление в середине магнитной цепи. С увеличением коэффициента распространения магнитного потока вдоль цепи повышается нелинейность его

распределения, магнитное напряжение (магнитная индукция) в начале и конце кольцевого воздушного зазора магнитной цепи достигает максимального, а в середине цепи – минимального значения, вследствие увеличения коэффициента распространения магнитного потока вдоль цепи уменьшается минимальное значение магнитного напряжения (магнитной индукции). В результате появилась возможность анализа параметров магнитных цепей разработанных устройств.

5. Установлено, что при конечном значении магнитного сопротивления ($W_{\mu s}$) нерабочего воздушного зазора, магнитный поток в кольцевом ферромагнитном сердечнике меняет свое направление вдоль длины цепи и это изменение происходит в середине магнитной цепи при $W_{\mu s} = 0$, а при $W_{\mu s} = \infty$ магнитный поток не меняет своего направления вдоль цепи, а меняет своё значение от максимального до нуля и наоборот. В результате достигнуты более точные результаты при различных значениях магнитного сопротивления нерабочего зазора магнитной цепи разработанного преобразователя.

6. Установлено, что магнитные системы разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами образуют многоконтурные магнитные цепи с распределенными параметрами и их математические модели описываются системой дифференциальных уравнений второго порядка. В результате разработана методика расчета многоконтурных магнитных цепей с распределенными параметрами.

7. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что статические характеристики разработанных электромагнитных преобразователей расхода жидкости с кольцевыми каналами имеют линейный вид даже при измерении расхода возмущенных местными гидравлическими сопротивлениями потоков, а погрешность измерения при этом не превышает $\pm 1,0\%$. В результате появилась возможность построения статических характеристик разработанного устройства при различных гидравлических режимах.

8. Проведенными исследованиями динамических характеристик преобразователей при различных типовых воздействиях выявлено, что разработанные электромагнитные преобразователи расхода жидкости с кольцевыми каналами проявляются в системах управления технологическими процессами в виде инерционных звеньев второго порядка. В результате повышается точность расчета динамических характеристик разработанного преобразователя и качественные показатели системы управления.

9. В результате анализа причин возникновения сигналов помех в разработанных электромагнитных преобразователях расхода жидкости с кольцевыми каналами и методов их устранения выявлено, что наиболее существенными помехами являются помехи от проявления эффектов «трансформаторный» и «поляризация», а самым эффективным способом их уменьшения является проведение измерений при биполярном магнитном поле низких частот ($0,5 \div 5$ Гц). В результате достигнуто исключение факторов, влияющие на точность измерения преобразователя.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON ADMISSION OF ACADEMIC DEGREES
DSc.27.06.2017 T.03.02 AT TASHKENT STATE
TECHNICAL UNIVERSITY NAMED AFTER ISLAM KARIMOV**
TASHKENT INSTITUTE OF RAILWAY ENGINEERS

ATAULLAEV AMINJON ODILOVICH

**ELECTROMAGNETIC LIQUID FLOW TRANSDUCERS WITH ANNULAR
CHANNELS FOR PROCESS CONTROL SYSTEMS**

**05.01.06 – Components and devices of computer facilities
and control systems**

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

Tashkent-2019

The theme of the Ph.D. was registered in the Higher Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under № B2019.1.PhD/T998

The thesis was made at the Tashkent Institute of Railway Transport Engineers.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) is available on the web page of the Scientific Council (www.tdtu.uz) and the Information and Educational Portal "ZiyoNet" (www.ziyonet.uz).

Scientific consultant:

Amirov Sulton Fayzullaevich
Doctor of technical sciences, professor

Official opponents:

Siddikov Ilhomjon Hakimovich
Doctor of technical sciences, professor
Nazarov Khayriddin Nuritdinovich
Candidate of technical sciences, docent

Leading organization:

Research Institute of Irrigation and Water Problems

Defense of the thesis will be held "____" ____ 2019 in ____ hours at the meeting of the Scientific Council DSc.27.06.2017.T.03.02 at the Tashkent State Technical University. (Address: 100095, Tashkent, Universitetskaya St., 2. Tel: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

The thesis is available in the Information and Resource Center of the Tashkent State Technical University (registration number - ____). (Address: 100095, Tashkent, Universitetskaya St., 2. Tel.: (99871) 246-03-41.

The thesis abstract was sent out "____" ____ 2019.
(mailing list No. "____" from "____" ____ 2019).

N.R. Yusupbekov

Chairman of the scientific council
awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor, academian

U.F. Mamirov

Scientific secretary of scientific council
awarding scientific degrees,
PhD in technical sciences

H.Z. Igamberdiev

Chairman of the scientific seminar of the scientific council
awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor, academian

INTRODUCTION (abstract of the thesis of the Doctor of Philosophy (PhD))

The aim of the research work is to develop electromagnetic converters that measure fluid flow with high accuracy and linear static characteristic for measuring flow sensitivity and asymmetric fluid flow for technological process control systems.

The tasks of research:

formation of the basic requirements for fluid flow meters on the modern stage by process management systems;

comparative analysis of the basic technical characteristics of existing fluid flow meters;

selection and justification of the type of fluid flow meters for process control systems;

development of new designs of electromagnetic ring-channel electromagnetic converters with high precision and linear static characteristic for measuring the sensitivity and asymmetric fluid flow;

development of mathematical models of electromagnetic circuits with new channels for measuring fluid consumption;

development of basic characteristics of circular channel electromagnetic converters for measuring fluid consumption.

The object of the research work are electromagnetic ring-channel electromagnetic converters measuring fluid flow with high sensitivity and precision and linear static character.

Scientific novelty of the research work is as follows:

developed ring-channel electromagnetic modifiers for measuring fluid flow with high sensitivity and precision and linear static characteristics;

developed the method of calculating electromagnetic chains of multi-stranded and scattered parameters of electromagnetic converters;

mathematical models of ring-channel electromagnetic converters measuring new fluid flow taking into account the distribution of parameters of electrical and magnetic circuits;

the electromagnetic circuit-ring electromagnetic converter measuring fluid consumption is based on the possibility of increasing the sensitivity of the converter by placing open circular magnetic conductors, which are connected to the polar circuit by means of ferromagnetic couplings, respectively.

The outline of the thesis. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, list of literature and appendices. The volume of dissertation work is 125 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Патент РУз. №04866. Электромагнитный преобразователь расхода// Амиров С.Ф., Атауллаев А.О., Турдебеков К.Х., Жураева К.К., Атауллаев Н.О.// Расмий ахборотнома. – 2014. – №4.
2. Амиров С.Ф., Атауллаев А.О. Исследование помех электромагнитных датчиков расхода с кольцевыми каналами// Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2012. - № 4. – С. 40-44. (05.00.00 №12).
3. Амиров С.Ф., Атауллаев А.О. Математические модели электрического поля активной зоны электромагнитного датчика расхода с кольцевым каналом// Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2014 - № 3. – С. 47-52. (05.00.00 №12).
4. Амиров С.Ф., Атауллаев А.О., Атауллаев Н.О. Статические характеристики электромагнитных датчиков расхода с кольцевыми каналами и чередующимися магнитными полюсами// Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2014. - № 6. – С. 35-40. (05.00.00 №12).
5. Amirov S. F., Ataullaev N.O., Ataullaev A.O. Approximation of the main magnetization curve of sensor magnetic circuits// International Jornal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. India. ISSN (Online): 2350 – 0328. Vol. 5, Issue 4, April 2018. – P. 5515 – 5518. (05.00.00 №8).
6. Amirov S. F., Ataullaev A.O. Mathematical Models of Linear Magnetic Chains of Electromagnetic Converters of Flow with a Ring Channel// International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Tehnology. India. ISSN (Online): 2350 – 0328. Vol. 6, Issue 6, June 2019. P. – 9677 - 9682 (05.00.00 №8).
7. Амиров С.Ф., Атауллаев А.О. Исследование линейных магнитных цепей электромагнитных преобразователей расхода с кольцевыми каналами // Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2019. - № 2. – С. 34-44. (05.00.00 №12).
8. Амиров С.Ф., Атауллаев А.О., Жумабаев С.Х. Суюқлик сарфини ўлчовчи ҳалқасимон каналли электромагнит ўзгартиргичлар магнит занжирларининг математик моделлари// ТошТЙМИ Хабарномаси – Тошкент, 2019. – №2. – С. 143-147. (05.00.00 №11).

II бўлим (II часть; II part)

9. Амиров С.Ф., Атауллаев А.О. Электромагнитные датчики расхода жидких металлов для систем управления// Материалы республиканской научно-технической конференции. Перспективы развития техники и технологии и достижения горно-металлургической отрасли за годы независимости республики Узбекистан - Навои, 2011. - С. 330-331.
10. Амиров С.Ф., Атауллаев А.О. Проектирование электромагнитных датчиков расхода жидкости энергоинформационным методом// Международная

научная конференция INNOVATION-2011 Сборник научных статей - Ташкент, 2011. – С. 216-217.

11. Атауллаев А.О. Исследование помех электромагнитных датчиков расхода с кольцевыми каналами// Современные технологии горно-металлургической отрасли. Международная научно-техническая конференция - Навои, 14 - 16 мая 2013. - С. 206-208.

12. Атауллаев А.О. Исследование электромагнитных датчиков расхода жидких металлов энергоинформационным методом// Перспективы науки и производства химической технологии в Узбекистане. Материалы научно-технической конференции - Навои, 23-24 мая 2014. - С. 225-226.

13. Атауллаев А.О., Мавлонов Ж.А. Статические характеристики электромагнитных датчиков расхода с кольцевыми каналами// Материалы республиканской научно-технической конференции Горно-металлургический комплекс: проблемы и их решения - Алмалық, 8 апреля 2015. - С. 215.

14. Amirov S. F., Ataullaev N.O., Ataullaev A.O. Dynamics of magnetic-modulation current converter// Conference MITA 2015. The 11th international Conference on Multimedia Information Technology and Application. June 30 - Jule 2. 2015. Tashkent, Uzbekistan. - p.167-170.

15. Атауллаев А.О. Математические модели электрического поля активной зоны электромагнитного датчика// Материалы научно-технической конференции. «Горно-металлургический комплекс: достижения, проблемы и современные тенденции развития». – Навои, 2015. – С. 252-253.

16. Атауллаев А.О. Исследование электромагнитных датчиков расхода рудной пульпы энергоинформационным методом// Материалы республиканской научно-технической конференции Горно-металлургический комплекс: Достижения, проблемы и перспективы инновационного развития - Навои, 15-16 ноября, 2016. - С. 196.

17. Атауллаев А.О. Электромагнитные датчики расхода жидкостей для горного производства// Материалы республиканской научно-технической конференции Горно-металлургический комплекс: Достижения, проблемы и перспективы инновационного развития - Навои, 15-16 ноября, 2016. - С. 224.

18. Атауллаев А.О. Исследование помех электромагнитных датчиков// Материалы IX международной научно-технической конференции: “Достижения, проблемы и ссовременные тенденции развития горно-металлургического комплекса” - Навои, 12-14 июня, 2017. - С. 160.

19. Атауллаев А.О. Электромагнитные датчики расхода воды для систем управления// Материалы IX международной научно-технической конференции: “Достижения, проблемы и ссовременные тенденции развития горно-металлургического комплекса” - Навои, 12-14 июня, 2017. - С. 206.

20. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ: Гуваҳнома № DGU 05488 от 03.07.2018. «Программа для синтеза оптимальной коррекции по входному сигналу следящей системы». Авторы: Атауллаев Азизжон О., Эргашев Ф.А., Атауллаев Аминжон О., Уринов Ш.Р. // Официальный бюллетень. Агентство по интеллектуальной собственности РУз. 2018.

21. Атауллаев А.О., Усмонов О.Б., Эгамов Д.Ё. Исследование электромагнитных датчиков расхода с кольцевыми каналами для систем контроля и управления// Международный центр научного сотрудничества «Наука и просвещение» Приоритетные направления развития науки и образования. Сборник статей международный научно-практической конференции, состоявшейся 10 февраля 2018 г. Пенза. - С. 80.
22. Amirov S. F., Ataullaev A.O. “IMPROVEMENT OF ELECTROMAGNETIC WATER FLOWMETERS”// INTERNATIONAL CONFERENCE ON EURASIAN STUDIES” Proceedings of the 2018 International Conference on Eurasian Studies (ICES) 10 October 2018., Mount Katahdin Trail Alpharetta, Georgia, 30022, USA. – p. 144-152.
23. Атауллаев А.О., Атауллаев Н.О., Рахматова Н.М., Назарова С.А. Исследование электромагнитных преобразователей с кольцевым каналом// Международный центр научного сотрудничества «Наука и просвещение» Высокие технологии, и образование. Сборник статей международный научно-практической конференции, состоявшейся 10 ноября 2018 г. Пенза. - С. 76.
24. Атауллаев А.О., Атауллаев Н.О., Преобразователи постоянного тока для эффективного использования энергетических ресурсов// Международной научно-технической конференции. "Перспективы инновационного развития горно-металлургического комплекса" - Навои, 2018. - С. 441 – 442.
25. Амиров С.Ф., Атауллаев А.О., Болтаев О.Т. Исследование двухконтурных магнитных цепей датчиков с распределенными параметрами. Материалы II Международной научно-технической конференции «Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации», посвященной 90-летию со дня рождения профессора Зарипова М.Ф./Уфимск. Гос. Техн. Ун-т: РИК УГАТУ, 2019. – С.128-132.

Автореферат «ТошТЙМИ ахборотномаси» илмий-амалий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди ва матнларни мослиги текширилди

Қоғоз бичими 84×60-1/16. Ризограф босма усули. Times гарнитураси.
Шартли босма табоғи: 2,6 б.т. Адади: 100 нусха.
Буюртма № 19-11/2019. Нашрга рухсат этилди: 28.11.2019 й.

Тошкент темир йул мұхандислари институти босмахонасида чоп этилган.
Босмахона манзили: 100167, Тошкент шаҳар, Одилхўжаев кўчаси, 1-уй.