

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА
УНИВЕРСИТЕТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.03/10.12.2019 Т.03.03 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ

БЕДРИЦКИЙ ИВАН МИХАЙЛОВИЧ

**ФЕРРОРЕЗОНАНС ТАБИАТЛИ ПАРАМЕТРИК ИККИЛАМЧИ
ЭЛЕКТР ТАЪМИНОТИ МАНБАЛАРИ: ТАҲЛИЛ ВА МОДЕЛЛАШ**

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

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

Тошкент – 2021

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

Оглавление автореферата диссертации доктора технических наук (DSc)

Contents of the Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Бедрицкий Иван Михайлович

Феррорезонанс табиатли параметрик иккиламчи электр таъминоти
манбалари: таҳлил ва, моделлаш 3

Бедрицкий Иван Михайлович

Параметрические источники вторичного электропитания
феррорезонансной природы: анализ и моделирование 29

Bedritskiy Ivan Mixaylovich

Parametric sources of secondary power supply of ferro-resonant nature:
analysis and modeling 55

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works..... 59

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА
УНИВЕРСИТЕТИ ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.03/10.12.2019 Т.03.03 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ

БЕДРИЦКИЙ ИВАН МИХАЙЛОВИЧ

**ФЕРРОРЕЗОНАНС ТАБИАТЛИ ПАРАМЕТРИК ИККИЛАМЧИ
ЭЛЕКТР ТАЪМИНОТИ МАНБАЛАРИ: ТАҲЛИЛ ВА МОДЕЛЛАШ**

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

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

Тошкент – 2021

Фан доктори (DSc) диссертациясининг мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси хузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2021.1. DSc /T419 рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент давлат транспорт университетида бажарилган.

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

Илмий маслаҳатчи

Амиров Султон Файзуллаевич
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Ибодуллаев Мухтар Ибодуллаевич
техника фанлари доктори, профессор

Колесников Игорь Константинович
техника фанлари доктори, профессор

Плахтиев Анатолий Михайлович
техника фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот:

Тошкент ахборот технологиялари университети

Диссертация химояси Тошкент давлат техника университети хузуридаги DSc.03/10.12.2019.T.03.03 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил «15» 12 соат 14⁰⁰ 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.

Фан доктори (DSc) диссертацияси билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (330 рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўч., 2. Тел.: (+99871) 246-03-41.

Диссертация автореферати 2019 йил «12» _____ да тарқатилди.
(2019 йил «12» 12 даги № 7 рақамли реестр баённомаси).



К.Р. Аллаев

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси,
техника фанлари доктори, профессор, академик

О.Х. Ишназаров

Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби,
техника фанлари доктори, профессор

Т.Ш. Ғойибов

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

КИРИШ (докторлик (DSc) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда алоқа воситаларида, гальваник ванналарнинг таъминот қурилмалари, зарядлаш-тўғрилаш мосламаларида, ўлчаш, ҳисоблаш ва импульсли техник воситаларда қўлланадиган электрон қурилмаларни стабилизаторлардан фойдаланган ҳолда электр энергияси билан таъминлаш ишончилигига алоҳида эътибор қаратилмоқда. Ҳозирги кунда ривожланган мамлакатларда “...ўзгармас мутадил кучланиш ва тоқлар тизимини, яъни юклама кучланиши ва тоқини унинг катталигига боғлиқсизлигини таъминловчи электр энергиясининг тақсимлаш ва таъминлаш тизимларини кенг қўллаш ҳамда электротехника ва муҳандислик электрофизикасининг турли соҳаларига жорий этиш имкониятлари мавжуд”¹. Бу борада, жумладан, иккиламчи манбаларни яратиш, уларнинг мутадиллаш сифатини ва ишлаш ишончилигини ошириш ҳамда стабилизаторлар схемаларини такомиллаштиришга алоҳида аҳамият берилмоқда.

Жаҳонда параметрик тизимларнинг хусусиятлари, параметрик қурилмаларни экстремал ва оғир шароитларда, индуктив-сиғим энергия тўпловчиларни қайта тикланувчи энергия манбалари билан биргаликда қўллаш масалаларига қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу соҳада, жумладан, параметрик таъминот манбаларида янги материаллардан фойдаланиш, индуктив-сиғим ўзгартиргичлардаги янги схема-техник ечимларни қўллаш, параметрик турдаги манбаларнинг ривожланиш, улар ночизик электр занжирларининг тузилишларини такомиллаштириш бўйича тадқиқотлар устувор ҳисобланади. Шу билан бирга, параметрик тизимларда мутадиллаш сифатини ошириш, кўп контурли стабилизаторларнинг оғирлик-габарит кўрсаткичларини камайтириш долзарб масалалар ҳисобланади.

Мамлакатимизда иқтисодиётнинг муҳим тармоғи бўлган энергетика соҳасини ривожлантириш, соҳанинг технологик даражасини янгилаш, жумладан, истеъмолчиларни узлуксиз ва сифатли электр энергияси билан таъминлаш, магнит боғланишларсиз ва ферромагнит контурлар орасида магнит боғланишларга эга бўлган кўп контурли стабилизаторлар схемаларини такомиллаштириш ишлари амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида: «... иқтисодиётнинг энергия ва ресурс ҳажмини қисқартириш, энергия тежамкор технологияларни ишлаб чиқаришга кенг татбиқ этиш, қайта тикланадиган энергия манбаларидан фойдаланишни кенгайтириш.»² каби вазифалари белгиланган. Мазкур вазифани амалга оширишда ферромагнит, феррорезонанс ва автопараметрик занжирлар асосида ишлайдиган қурилмалар, электр занжирларининг тузилишларини такомиллаштириш муҳим масалалардан ҳисобланади.

¹ <https://lemzspb.ru/> Индуктивно-емкостные источники тока. //Саенко И.В., Опре В.М., Новик А.А Дозоров С.А. и др.– 2021 г.– с. 1-4.

²Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида» ги Фармони

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2015 йил 5 майдаги ПҚ-2343-сон «2015-2019 йилларда иқтисодий тармоқлари ва ижтимоий соҳада энергия сарфи ҳажмини қисқартириш, энергияни тежайдиган технологияларни жорий этиш чора-тадбирлари дастури тўғрисида»ги, 2017 йил 23 августдаги ПҚ-3238-сонли «Замонавий энергия самарадор ва энергия тежамкор технологияларни жорий этиш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий – ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи. Ночизиқ электр занжирларнинг янги тузилишларини фундаментал тадқиқ этиш ва улар асосида кенг функционал имкониятларга ҳамда яхшиланган техник-иқтисодий тавсифларга эга бўлган иккиламчи электротабминот манбаларни яратиш бўйича тадқиқот ишлари дунёнинг илғор илмий марказларида ва таълим муассасаларида олиб борилмоқда. Мазкур вазифаларни амалга оширишда Institute of Electrical and Electronics Engineers (АҚШ), Iowa State University (АҚШ), Boulevard de l'Universite (Франция), Universite de Biskra (Жазоир), Energy Research Institute (Китай), Токио технологик институти (Япония), В.И. Ульянов номидаги Санкт-Петербург давлат электротехника университети (Россия), Илм-фан миллий академияси Электродинамика институти ва Миллий техника университети (Украина), Уфа давлат авиация техника университети ва Уфа давлат нефть техника университети (Россия) ҳамда бошқа илмий муассасалар салмоқли ҳисса қўшдилар³.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Параметрик тизимларнинг долзарб фундаментал масаларини, параметрик таъминлаш манбаларида янги материалларни қўллаш, параметрик қурилмалардан амалда фойдаланиш масалалари, магнитланиш назарияси, шунингдек уларга турдош бўлган муаммоларни ҳал этишда D.C. Jiles, D.L. Atherton, M. Stosur, J. H. Chan, A.Vladimirescu, X.C. Gao, P. Liebmman, J. Valainis, Калантаров П.Л., Губанов В.В., Богданов А.И., В.М.Опре, С.А. Дозоров, Л.Э.Рогинская, В.А. Кулинич, И.В.Волков, А.Н.Милях, Ю.И.Тугай, Б.Н.Кубышин, И.В. Пентегов, С.И. Закревский ва бошқалар муносиб ҳисса қўшган.

Ўзбекистонда параметрик стабилизаторлар, шу жумладан феррорезонанс қурилмалар назариясига Г.Р. Рахимов, А.С. Каримов, Т.М. Кадыров, М.И. Ибадуллаев, А.М. Бурханходжаев, В.К. Львов, М.М. Файзиев,

³ <https://etu.ru>, <https://ied.org.ua>, <https://uiowa.edu>, <https://kpi.ua/ru>, <https://rusoil.net>, <https://ugatu.su/>, <https://www.engineering.uga.edu/current/student-organizations/IEEE>, <https://www.lequotidien.com/actualites/boulevard->, <https://univ-biskra.dz/index.php/fr/>

Б.А. Абдуллаев, А.Х. Алимов, Ш.Э. Бегматов, А.Н. Расулов ва бошқа олимлар ўз ҳиссаларини кўшган.

Ушбу тадқиқотлар асосида параметрик таъминот манбалари назарияси ва уларни ҳисоблаш асослари ишлаб чиқилди. Сезиларли муваффақиятларга қарамай ушбу ишларда кўп контурли кучланиш стабилизаторларини ҳамда контурлар ўртасидаги магнит алоқаларга эга кўп контурли кучланиш стабилизаторларини қуриш назарияси кўриб чиқилмаган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат транспорт университети тадқиқот режасининг 3-сон «Темир йўл транспорти учун электромагнит ва электр ўлчаш қурилмаларини такомиллаштириш» фундаментал лойиҳаси доирасида бажарилган (2016-2020).

Тадқиқот мақсади параметрик стабилизаторларни қўллаган ҳолда кучланишни мутадиллаш сифатини ошириш каби илмий муаммони ҳал этишдан иборат.

Тадқиқот вазифалари:

базавий бўғинлар конфигурациялари асосида магнит боғланишларсиз ва ферромагнит элементлар ўртасида магнит боғланишларга эга параметрик таъминот манбаларининг умумлаштирилган таснифини яратиш;

турли хил аппроксимация функцияларидан фойдаланган ҳолда пўлат ўзакнинг магнитланиш эгри чизиқлари аппроксимацияси, ўзакдаги ночизиқ исрофлар, сочилган индуктивлик, чулғамлар сиғими ва барча гармоник ташкил этувчиларни ҳисобга олмасликдан вужудга келадиган хатоликларни баҳолаш;

контурлар орасида магнит боғланишларга эга бўлмаган ва магнит боғланишларга эга бўлган кўп контурли параметрик иккиламчи электр таъминоти манбаларининг умумлашган математик моделларини яратиш;

магнит боғланишларсиз ва ферромагнит контурлар орасида магнит боғланишларга эга бўлган кўп контурли схемалардан фойдаланиш асосида стабилизаторларнинг янги схемаларини ишлаб чиқиш;

стабилизатор чиқиш кучланишини ўзгартириш учун компенсацияловчи қурилмани ишлаб чиқиш;

кўп контурли стабилизаторларнинг оғирлик-габарит кўрсаткичларини камайтириш йўллари ва кўп контурли стабилизаторларнинг муҳандислик ҳисоблаш услубини ишлаб чиқиш.

Тадқиқот объекти сифатида магнит боғланишларсиз ва ферромагнит контурлар орасида магнит боғланишларга эга бўлган кўп контурли кучланиш стабилизаторлари олинган.

Тадқиқот предметини кўп контурли кучланиш стабилизаторларининг контурлари орасидаги амплитуда ва фаза муносабатлари ташкил этади.

Тадқиқот усуллари. Тадқиқот жараёнида гармоник анализ, дифференциал тенгламаларни ечишнинг сонли усуллари (Рунге-Куттанинг 4-тартибли усули), турғунликни тадқиқ этишда кичик параметрлар усули ва минималлаш масалаларини ечишда аналитик усуллардан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

базавий бўғинлар конфигурациялари ва контурлар орасида магнит боғланишларни ташкил этиш усуллари асосида параметрик таъминот манбаларининг умумлашган таснифи яратилган;

турли аппроксимация функцияларидан фойдаланишда, ўзакдаги исрофлар, сочилган индуктивлик, чулғамлар сифими ва барча гармоник ташкил этувчиларни тўлиқ ҳисобга олинмаган ҳолатларда стабилизаторлар ҳисоблари аниқлигини объектив баҳолаш услуби ишлаб чиқилган;

магнит боғланишларсиз ва ферромагнит контурлар орасида магнит боғланишларга эга бўлган кўп контурли параметрик стабилизаторларнинг умумлашган математик моделлари ишлаб чиқилган;

магнит боғланишларсиз ва ферромагнит контурлар орасида магнит боғланишларга эга бўлган кўп контурли схемалардан фойдаланиш асосида стабилизаторларнинг схемалари синтез қилинган;

стабилизаторнинг чиқиш кучланишини ўзгартириш учун сезгирлиги, аниқлиги ва чиқиш характеристикасининг чизиқлилиги юқори бўлган компенсацияловчи қурилманинг конструкцияси такомиллаштирилган;

кўп контурли стабилизаторнинг конструкциясини оғирлик ва габарит кўрсаткичларини камайтириш асосида ҳисоблаш усули ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

магнит боғланишларсиз ва контурлар орасида магнит боғланишларга эга бўлган кўп контурли стабилизаторларда феррорезонанс контурлар параметрлари орасида уларнинг ишчи тавсифларини ҳисоблаб чиқишга имкон берадиган янги ва барқарор қонуниятлар ва боғланишлар аниқланган;

параметрик стабилизаторлардаги ишчи жараёнларни оптималлаш имконини берадиган қурилмаларнинг режимлари ва оғирлик-габарит кўрсаткичларини ҳисоблаш усуллари тақдим этилган;

параметрик стабилизаторлар схема ва режим параметрлари ўзгаришининг кенг диапазонида хусусиятларини ўрганиш имконини берадиган уларнинг компьютер моделлари ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Олинган илмий натижалар ва хулосалар ишончлилиги назарий жиҳатдан асосланган математик моделларнинг қўлланилиши, натижаларни моделлаш ҳамда уларни замонавий компьютер дастурлари ёрдамида текширилганлиги, натижаларнинг экспериментал қурилмада синовдан ўтказилганлиги, моделлаш натижаларини экспериментал маълумотлар билан ўзаро сифат ва миқдорий таққосланганлиги билан тасдиқланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти кўп контурли магнит боғланишларсиз ва контурлар орасида магнит боғланишларга эга бўлган мутадилловчи қурилмаларнинг математик моделларини ҳамда параметрик русумдаги стабилизаторлар учун оғирлик-габарит кўрсаткичларини минималлаш усуллари ишлаб чиқиш билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларини амалий аҳамияти кучланиш параметрик стабилизатор қурилмаси ишлаб чиқаришга жорий қилинган. Олинган

натижаларнинг амалий аҳамияти юқори сифатдаги мутадиллаш хусусияти, юқори ишончилига эга стабилизатор қурилмасини қўллаш орқали энергия истеъмолини қисқариши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Феррорезонанс табиатли параметрик иккиламчи электр таъминоти манбаларини тадқиқ этиш бўйича олинган натижалар асосида:

кучланиш параметрик стабилизатор “Чуқурсой” тортувчи нимстанциясида релели ҳимоя ва автоматика қурилмаларини таъминловчи манба сифатида қўлланилган (“Ўзбекистон темир йўллари” АЖнинг 2021 йил 13 сентябрдаги НГ/01/3120-21-сон маълумотномаси). Натижада тортувчи нимстанция релели ҳимоя ва автоматика қурилмаларини мутадил ва сифатли электр энергияси билан таъминлашга эришилган ҳамда 149 млн. сўм иқтисодий самарадорликка эришилган;

кўп контурли стабилизаторларни муҳандислик ҳисоблаш усули “Чуқурсой” тортувчи нимстанциясида жорий этилган (“Ўзбекистон темир йўллари” АЖнинг 2021 йил 13 сентябрдаги НГ/01/3120-21-сон маълумотномаси). Натижада ўзақдаги исрофлар, сочилган индуктивлик ва чулғамлар сиғимини аниқлашда 5-7% аниқлигини ошириш имконияти яратилган;

компенсацияловчи қурилмага Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг ихтирога патенти (№IAP 06464.) олинган. Натижада мутадиλλанган кучланишни юқори сезгирлик ва аниқлик даражасини ошириш имконияти яратилган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқотнинг назарий ва амалий натижалари 15 та халқаро ва 13 та республика илмий-техник анжуманларда маъруза ва муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 48 та илмий иш 1 та монография, 25 та мақола даврий илмий журналларда, шулардан 13 та мақола Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижалари чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда ҳамда 5 та мақола Scopus маълумотлар базасига киритилган журналларда чоп этилган, ихтиро учун 2 та авторлик гувоҳномаси ва 1та Ўзбекистон Республикасининг патенти ҳамда 2 та ихтирога ижобий қарор олинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертация ҳажми 200 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати, тадқиқот мақсади ва вазифалари асосланган; тадқиқот объекти ва предмети ифодаланган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялар ривожланиши устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг ишончилиги асосланган; назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган; диссертация

тадқиқоти натижаларининг ишлаб чиқаришга жорий қилиниши ҳамда синов натижалари кўрсатилган; чоп этилган илмий ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

«Ферромагнит, феррорезонанс ва автопараметрик занжирлар базасида иккиламчи электр таъминоти манбалари» номли биринчи бобда параметрик стабилизаторлар ишлашининг умумий тамойиллари ва параметрик стабилизация табиати кўриб чиқилган. Параметрик стабилизатор камида иккита кетма-кет уланган элементдан, яъни динамик қаршилиги қиймати нолга яқинлашаётган ночизик бўғин (НБ) ва катта қаршиликка эга балласт элементи (БЭ)дан ташкил топиши кераклиги аниқланган. Бу каби стабилизаторнинг алмашлаш схемаси 1- расмда кўрсатилган, у ўзгарувчан синусоидал электр юритувчи куч (ЭЮК) E манбаидан таъминланади, фаол юклармаси R_H қаршиликка эга бўлиб, ДН дифференциал магнит ўтказувчанлик тўйиниш режимида нолга тенг бўлади. Юклармадаги ўртача кучланиш учун қуйидаги ифода олинди:

$$U_H = U_{ДН} + (E - U_{ДН} \frac{R_H + Z_{БЭ}}{R_H}) (\frac{R_{H3} R_H}{R_{H3} R_H + Z_{БЭ} R_H + Z_{БЭ} R_{H3}}), \quad (1)$$

бу ерда $U_{ДН} = 2\pi f \omega s B_s$ – тўйиниш дросселидаги кучланиш; f , ω , s , B_s – мос ҳолда частота, ўрамлар сони, магнит ўтказгич кесими ва ундаги тўйиниш индукцияси.

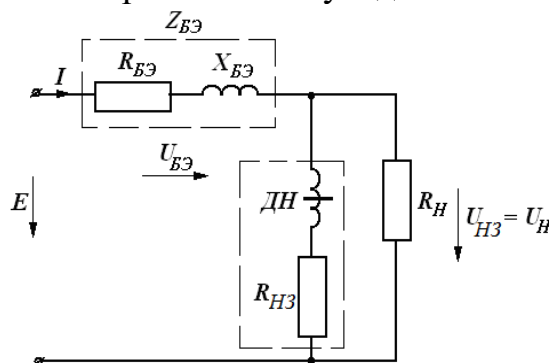
Олинган ифодадан кўриниб турганидек, ДН чулғамининг актив қаршилиги $R_{H3} = 0$ га тенг бўлганда дросселдаги кучланиш унинг тўйиниш кучланишига тенг ва манба кучланишининг тебранишларига боғлиқ эмас.

Кириш ЭЮКнинг ўзгариши ΔE ни юклармадаги кучланиш ўзгариши ΔU_H га бўлган нисбатига тенг бўлган кучланишни мутадиллаш (стабилизация)

коэффициенти $K = \frac{\Delta E}{\Delta U_H}$ нисбат билан аниқланиб, $K \approx \frac{U_{ДН}}{E} \frac{Z_{БЭ}}{Z_{H3}} + 1$

кўринишида ўзгартирилиши мумкин. Сўнгги ифодадан кўриниб турганидек, мутадиллаш коэффициенти $\frac{Z_{БЭ}}{Z_{H3}}$ нисбатга боғлиқ, уни ошириш учун эса $Z_{БЭ}$

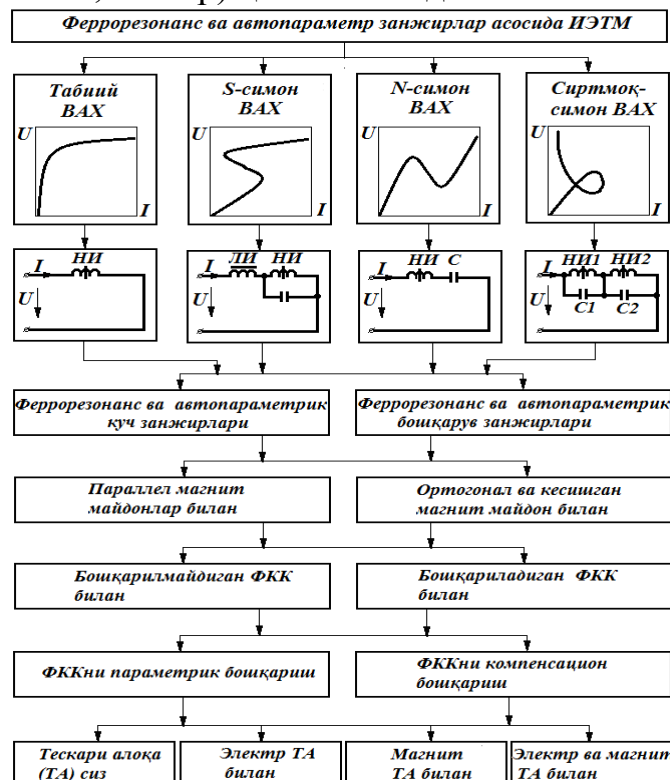
ни ошириш ва Z_{H3} ни камайтириш лозим бўлади.



1- расм. Энг содда параметрик стабилизаторнинг алмашлаш схемаси

Феррорезонанс тебраниш контури(ФКК)нинг хоссалари унинг топологик тузилишига боғлиқ ва унинг вольт-ампер характеристикаси(ВАХ) тури билан аниқланади. Параметрик стабилизаторларнинг таснифи таклиф

этилган бўлиб (2- расм), унинг асоси сифатида муайян ВАХ тури олинган, улар ВАХ кўриб чиқиладиган қурилмалар кўринишига қараб тўртта бўлиши мумкин: 1) бошқарилмайдиган ва бошқариладиган ферромагнит элементининг табиий ВАХ; 2) кетма-кет ФККнинг N-симон ВАХ; 3) параллель ФККнинг S-симон ВАХ; 4) биринчи учта турга оид занжирларнинг ВАХлари уйғунлигидан олинган сиртмоқсимон ВАХ. Мазкур тасниф қўлланадиган магнит ўтказгичлар ва магнит майдонлар турини (параллель, кесишган ва ортогонал магнит майдонлар), бошқарувчанлик ва ББ (базавий бўғинлар) тавсифини бошқариш усулларини (параметрик ёки компенсацион), шунингдек бошқарувчи тескари алоқаларни ташкил этиш усулларини (электрромагнит, магнит, электр) ҳисобга олади.

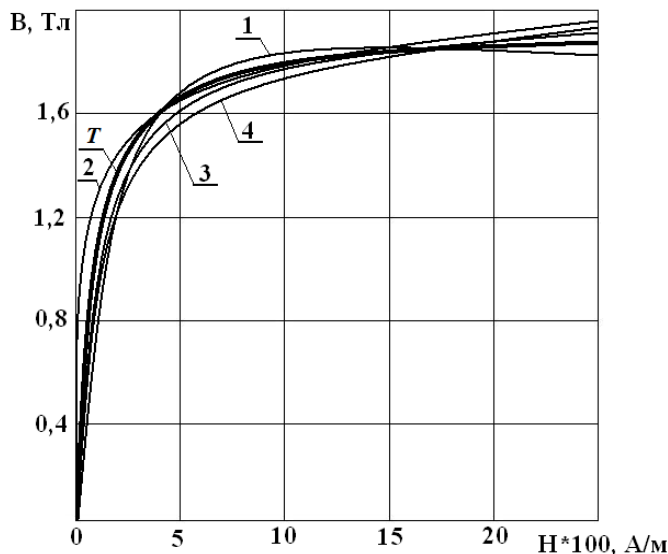


2- расм. Параметрик барқарорлаштиришга эга ИЭТМ таснифи

Амалга оширилган тадқиқотлар параметрик стабилизаторларни такомиллаштириш усулларини ҳамда схема-техник, режимли ва оғирлик-габарит оптималлаш йўллари белгилаш имконини берди.

«Параметрик ва феррорезонанс занжирларни таҳлил қилишда хатоликларни баҳолаш» номли иккинчи бобда параметрик занжирларни таҳлил қилишда аппроксимация функциясини танлаш, ферромагнит компонентлар сочилиш индуктивлигининг ҳисобга олинмаганлиги, чулғамлар хусусий сифимининг ҳисобга олинмаганлиги, ферромагнит компонентлар ғалтаклари фаол ўтказувчанлигининг нозичлиги ва барча гармоник таркибий ташкил этувчиларнинг тўлиқ ҳисобга олинмаганлиги билан вужудга келадиган хатоликларни баҳолаш услуби ишлаб чиқилган. Э360 (3424) пўлат учун аппроксимация функциялари ва экспериментал йўл билан олинган асосий магнитланиш эгри чизиғи асосида қурилган $B=f(H)$ боғлиқликлар графиклари таҳлили шуни кўрсатдики (3- расм), барча функциялар аниқлик мезони бўйича совуқ ҳолатда ишлов берилган

электротехник пўлатнинг танланган русумини аппроксимациялаш учун мос келади. Бироқ тангенс ва гиперболик синус функциялари билан ишлаш кейинги ўзгартиришлар учун ноқулай, боиси ўзгарувчан ток занжирларида ишлаётган ферромагнит курилмалар учун мавҳум аргументли Бессель функциялари амплитудаларини ҳисоблаб чиқиш зарурати юзага келади.



Т-тажриба; а- $B=1,84*\tanh(0,37*H)$; б- $H=4,538*10^{-3} \operatorname{sh}(4,76*B)$; в- $H=0,64*B-0,365*B^3+1,247*B^5-0,894*B^7+0,219*B^9$; г $H=0,1146*B^9$

3- расм. Аппроксимация функциялари

Аппроксимация натижалари 4- расмда келтирилган, аппроксимация эгри чизиклари таҳлили 9 ва 11 даражадаги тўлиқсиз полиномлар кўзланган мақсад учун энг мақбул эканини кўрсатди.

Э360 (3424) совуқ ҳолда ишлов берилган пўлат учун 3 дан 11 гача бўлган даражадаги тўлиқсиз полиномларга оид аппроксимациялаш хатоликларининг кучланганлик қийматларига боғлиқлик эгри чизиклари $\delta(\%)=f(H)$ 5- расмда келтирилган. Э360 (3424) совуқ ҳолда ишлов берилган пўлат учун $\delta=f(H),\%$ боғлиқлик эгри чизиклари таҳлиliga кўра, 9 ва 11 даражали полиномлар билан аппроксимациялашда хатоликлар 12% дан ошмаслиги аниқланди, бу эса ферромагнит элементларга эга ғалтакларни ҳисоблашда рухсат берилган қиймат сифатида қабул қилиниши мумкин.

Ферромагнит элемент индуктивлиги индукция амплитудасининг тегишли қийматида ва $H=\kappa B^9$ кўринишдаги магнитланиш эгри чизиғи аппроксимациясидан фойдаланилганда тўлиқ ток қонуни асосида ҳосил қилинган

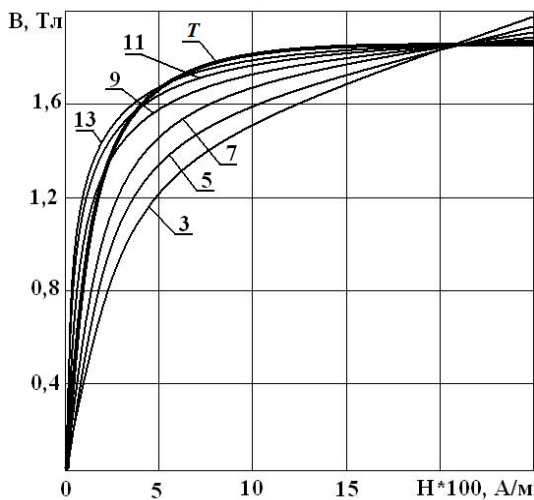
$L = \frac{B_m S w^2}{\kappa B_m^9 l}$ формула бўйича ҳисобланади, сочилган индуктивлик

эса $L_s = \frac{\mu_0 w^2}{h} F_L$ ифода бўйича топилади, бу ерда F_L – чулғамнинг геометрик

параметрларини ҳисобга оладиган коэффициент.

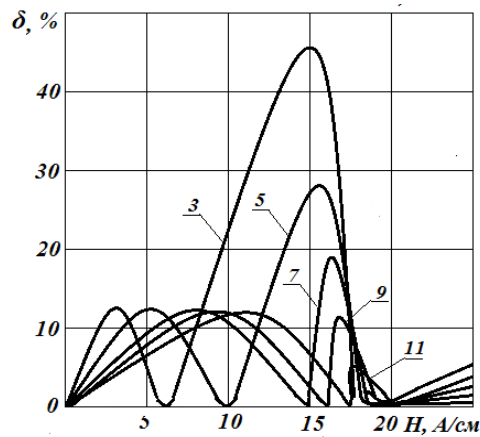
Бундан ташқари, занжирларни таҳлил қилишда зарур бўлган гиперболик функцияларга эга ифодаларни тескари боғлиқликлар (B дан H ёки H дан B) ни олишда ҳам ноқулайлар юзага келади. Таҳлил натижалари соддалик ва аниқлик мезони бўйича тўлиқсиз полином билан аппроксимациялаш энг мақбул ечим эканини кўрсатди.

Турдаги ток кўрсаткичли даражага эга умумлашган полином билан аппроксимациялаш батафсил ўрганиб чиқилди.



T-тажриба;
 3- $H=2,68*B^3$; 5- $H=0,995*B^5$;
 7- $H=0,345*B^7$; 9- $H=0,1146*B^9$;
 11- $H=0,037*B^{11}$; 13- $H=0,0123*B^{13}$

**4-расм. Полином билан
 аппроксимациялаш**



3- $H=2,68B^3$
 5- $H=0,995B^5$
 7- $H=0,345B^7$
 9- $H=0,1146B^9$
 11- $H=0,0371B^{11}$

**5-расм. Аппроксимация
 хатоликлари**

Тўйиниш индукцияси 1,8 Тл га тенг бўлган ферромагнит элементнинг физик модели учун қуйидаги ҳисобий қийматлар олинди: индуктивликнинг ўртача қиймати $L=0,246$ Гн, сочилган индуктивлик $L_S=4,6*10^{-3}$ Гн. L_S ни ҳисобга олмасликдан юзага келадиган хатолик катталиги

$$\delta = \frac{L_S}{L} 100\% = \frac{4,6 * 10^{-3}}{0,246} 100 = 1,88\%$$

ни ташкил этади. Ушбу хатолик ҳисоблашларни

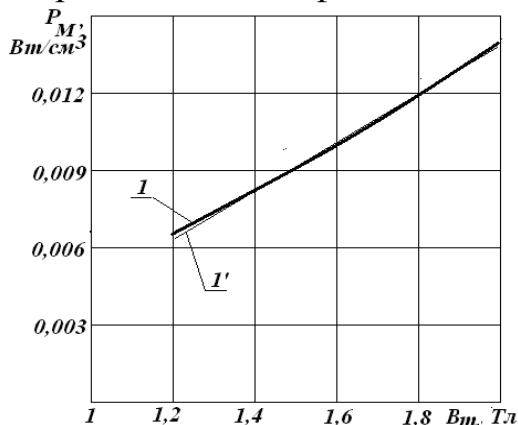
соддалаштириш учун қабул қилинадиган бошқа чекловлар асосида ҳисобланган хатоликлардан анча кичик қийматга эга.

Тажрибалар натижасида ғалтакнинг максимал сиғими 150 пкФ ни ташкил этиши аниқланди. Агар кетма-кет тебраниш контурига эга стабилизатор конденсаторининг сиғими 7-10 мкФ ни, параллел тебраниш контурига эга стабилизатор конденсаторининг сиғими эса 15-25 мкФ ни ташкил этишини ҳисобга олсак, ғалтакнинг хусусий сиғими жуда кичик эканлиги ҳамда уни ҳисобга олиш феррорезонанс қурилмалар ҳисоблари натижаларига ҳеч қандай таъсир кўрсатмаслиги яққол намоён бўлади.

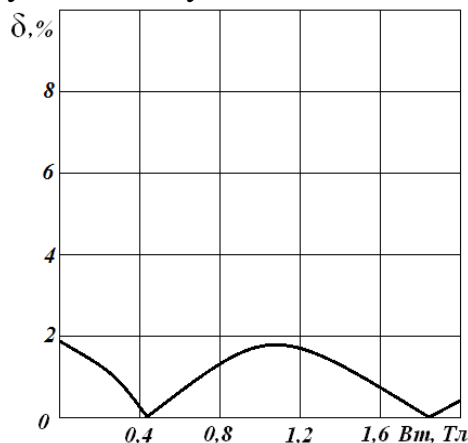
Магнит ўтказгичдаги исрофларнинг асосий улушини ташкил этадиган гистерезис, уярма тоқлар ва қайта магнитланишдаги исрофларнинг солиштирма катталиги $P_m = p_o \left(\frac{f}{f^*}\right)^\alpha \left(\frac{B_m}{B_m^*}\right)^\beta$ ифодадан аниқланиши мумкин, бу

ерда p_o – магнит майдони индукцияси $B_m^* = 1$ Тл базавий амплитудасида ва базавий $f^* = 1000$ Гц частотасида магнит ўтказгичдаги ўзак материали исрофларининг солиштирма катталиги; f , B_m – НЭ иши таъминладиган магнит индукциясининг частотаси ва амплитудаси; α , β – магнит материалнинг турига боғлиқ бўлган коэффицентлар. Феррорезонанс кучланиш стабилизаторлари кўрилатганда исрофлар оддий чизиқли қаршилик кўринишида моделлаштирилиши мумкинлиги кўрсатилган. 6-расмда Э360 электротехник пўлат (1- эгри чизиқ) ва аппроксимация тўғри чизиғи (1'- тўғри чизиғи) учун боғлиқликлар графиги $P_m=f(B_m)$ келтирилган.

График $P_M = KB_m + P$ турдаги чизикли боғлиқлик билан аппроксимацияланган бўлиб, бу ерда $P - B_m = 0$ бўлгандаги солиштирма исрофлар қиймати. Аппроксимациянинг нисбий хатолик боғлиқлик $\delta = f(B_m)$ графика шуни кўрсатдики (7- расм), аппроксимация хатолиги 2% дан камроқни ташкил этади, шундан келиб чиқиб, $P_M = k B_m + P$ кўринишдаги чизикли аппроксимациядан фойдаланишга йўл қўйилиши мумкин.



6-расм. Чизикли қаршилик билан йўқотишларни моделлаштириш



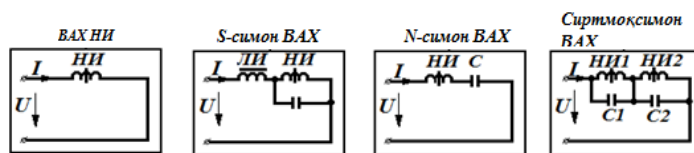
7-расм. Чизикли қаршилик билан аппроксимация хатолиги

Менли-Роу теоремасига мувофиқ энг сезиларни бўлган 3- гармоникани ҳисобга олмасликдан вужудга келадиган хатоликларни баҳолаш натижаларига кўра, энг номақбул ҳолат учун 3- гармониканинг улуши 33% дан ошмаслиги аниқланди. Масалан, агар мутадиллаштирилган кучланиш U нинг таъсир этувчи қиймати биринчи U_1 ва учинчи U_3 гармоникалардан ташкил топган бўлса, амалдаги мутадиллаштирилган кучланиш қуйидагига тенг бўлади:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_3^2} = \sqrt{U_1^2 + (0,33U_1)^2} = 1,053U_1. \quad (2)$$

Шундай қилиб, ҳисоблаш хатолиги 5,3% ни ташкил этди, бу эса аксарият математик моделлар хатоликларига яқин қиймат ҳисобланади.

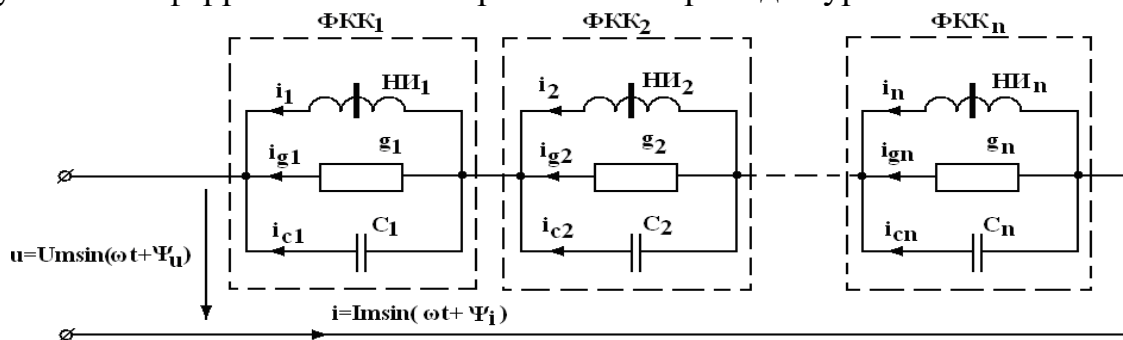
Юқорида келтирилган чекловларни ҳисобга олган ҳолда ферромагнит ва феррорезонанс табиатли мутадиллаш занжирларининг ББ ВАХлари ҳисоблаб чиқилди (8- расм), улар тажриба натижалари билан таққослаганда, 10% дан ортиқ бўлмаган ҳисоб хатоликларини намоён этди, бу эса уларнинг тўғрилигини тасдиқлайди.



8-расм. Базавий бўғинлар схемалари

«Магнит боғланишларга эга бўлмаган параметрик таъминот манбаларининг кўп контурли умумлашган ферромагнит занжирлари» номли учинчи бобда магнит боғланишларга эга бўлмаган бир фазали умумлашган ферромагнит занжирнинг таҳлили келтирилган; занжирлар

конфигурацияси ўзгарганда, олинган ифодаларни ўзгартириш усуллари кўриб чиқилган, магнит боғланишларга эга бўлмаган ферромагнит компонентлардан фойдаланиш асосида параметрик стабилизаторларни қўллаш мисоллари келтирилган, шунингдек MATLAB дастурининг SIMULINK пакетини қўллаш орқали стабилизаторларни моделлаш намуналари кўриб чиқилган. Ушбу занжир учун мос келадиган математик моделни яратиш муҳим илмий ва техник аҳамиятга эга, боиси унинг асосида индуктив элементлар орасида магнит боғланишларга эга бўлмаган ферромагнит табиатли исталган параметрик стабилизаторларнинг математик моделини ҳосил қилиш мумкин. Магнит боғланишларга эга бўлмаган умумлашган ферромагнит занжир схемаси 9- расмда кўрсатилган.



9 -расм. Магнит боғланишларга эга бўлмаган умумлашган ферромагнит занжир

Занжирнинг электр ҳолати электр катталикларнинг оний қийматлари учун Кирхгофнинг биринчи ва иккинчи қонунлари бўйича тузилган қуйидаги тенгламалар тизими билан ифодаланиши мумкин:

$$u = u_1 + u_2 + \dots + u_n \quad (3)$$

$$i = i_{C1} + i_{g1} + i_1 \quad (4)$$

$$i = i_{C2} + i_{g2} + i_2 \quad (5)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$i = i_{Cn} + i_{gn} + i_n \quad (6)$$

НИ₁-НИ_n ўзақларини $H = kB^9$ ифодаси орқали магнитланиш эгри чизиғи аппроксимациясидан фойдаланилганда, шунингдек электромагнит индукцияси қонунига асосланган маълум нисбатларни ҳисобга олган ҳолда занжир элементларидаги тоқларнинг оний қийматлари қуйидаги ифодалардан топилади:

$$i_1 = \frac{k_1 l_1 b_1^9}{w_1}; i_2 = \frac{k_2 l_2 b_2^9}{w_2} \dots \dots \dots i_n = \frac{k_n l_n b_n^9}{w_n}; i_{C1} = w_1 C_1 s_1 \frac{d^2 b_1}{dt^2}; i_{C2} = w_2 C_2 s_2 \frac{d^2 b_2}{dt^2}$$

$$i_{Cn} = w_n C_n s_n \frac{d^2 b_n}{dt^2}; i_{g1} = w_1 g_1 s_1 \frac{db_1}{dt}; i_{g2} = w_2 g_2 s_2 \frac{db_2}{dt} \dots \dots i_{gn} = w_n g_n s_n \frac{db_n}{dt} \quad (7)$$

Ушбу ифодалар ўзгартирилгандан сўнг қуйидаги тенгламалар олинди:

$$w_1 C_1 s_1 \frac{d^2 b_1}{dt^2} + w_1 g_1 s_1 \frac{db_1}{dt} + \frac{k_1 l_1 b_1^9}{w_1} = w_2 C_2 s_2 \frac{d^2 b_2}{dt^2} + w_2 g_2 s_2 \frac{db_2}{dt} + \frac{k_2 l_2 b_2^9}{w_2}, \quad (8)$$

$$w_2 C_2 s_2 \frac{d^2 b_2}{dt^2} + w_2 g_2 s_2 \frac{db_2}{dt} + \frac{k_2 l_2 b_2^9}{w_2} = w_3 C_3 s_3 \frac{d^2 b_3}{dt^2} + w_3 g_3 s_3 \frac{db_3}{dt} + \frac{k_3 l_3 b_3^9}{w_3}, \quad (9)$$

$$w_{n-1} C_{n-1} s_{n-1} \frac{d^2 b_{n-1}}{dt^2} + w_{n-1} g_{n-1} s_{n-1} \frac{db_{n-1}}{dt} + \frac{k_{n-1} l_{n-1} b_{n-1}^9}{w_{n-1}} = w_n C_n s_n \frac{d^2 b_n}{dt^2} + w_n g_n s_n \frac{db_n}{dt} + \frac{k_n l_n b_n^9}{w_n} \quad (10)$$

Сўнг $\alpha_1 = w_1 C_1 s_1 \omega^2$; $\beta_1 = w_1 g_1 s_1 \omega$; $\gamma_1 = \frac{0,5k_1 l_1}{w_1}$; $\alpha_2 = w_2 C_2 s_2 \omega^2$; $\beta_2 = w_2 g_2 s_2 \omega$;
 $\gamma_2 = \frac{0,5k_2 l_2}{w_2}$; $\alpha_n = w_n C_n s_n \omega^2$; $\beta_n = w_n g_n s_n \omega$; $\gamma_n = \frac{0,5k_n l_n}{w_n}$; $\tau = \omega t$ белгилашларни

киритган ҳолда индукциянинг оний қийматлари учун ечимларини $b_1 = B_{1m} \sin \omega t$; $b_2 = B_{2m} \sin(\omega t - \varphi_1)$; $b_n = B_{nm} \sin(\omega t - \varphi_n)$ кўринишга эга деб ҳисоблаб ҳамда олинган ифодаларни гармоник баланс усули бўйича ўзгартириб, биринчи гармоникадан юқори бўлган гармоникаларни ҳисобга олмаган ҳолда магнит индукциялар орасидаги боғланишлар учун қуйидаги ифодалар ҳосил қилинди:

$$\begin{cases} (\gamma_2 B_{2m}^9 - \alpha_2 B_{2m})^2 + (\beta_2 B_{2m})^2 = (\gamma_1 B_{1m}^9 - \alpha_1 B_{1m})^2 + (\beta_1 B_{1m})^2, \\ (\gamma_2 B_{2m}^9 - \alpha_2 B_{2m})^2 + (\beta_2 B_{2m})^2 = (\gamma_3 B_{3m}^9 - \alpha_3 B_{3m})^2 + (\beta_3 B_{3m})^2, \\ \dots\dots\dots \\ (\gamma_{n-1} B_{(n-1)m}^9 - \alpha_{n-1} B_{(n-1)m})^2 + (\beta_{n-1} B_{(n-1)m})^2 = (\gamma_n B_{nm}^9 - \alpha_n B_{nm})^2 + (\beta_n B_{nm})^2. \end{cases} \quad (11)$$

(11) тенгламалар системасини ечиш орқали ферромагнит элементлар орасида магнит боғланишларга эга бўлмаган умумлашган ферромагнит занжирнинг НИ₁-НИ_n индуктивликларидаги магнит индукциялари биринчи гармоникалари амплитудаларининг мумкин бўлган барча вариантларини ҳисоблаш мумкин бўлади.

Ночизиқ элементлардаги магнит индукциялари амплитудалари ўртасида фазалар силжиши бурчагини, масалан, НИ_{n-1} ва НИ_n ни аниқлаш учун қуйидаги ифода олинди:

$$\varphi_n = \arctg\left(\frac{a_{n-1} d_n - d_{n-1} a_n}{d_{n-1} d_n + a_{n-1} a_n}\right) \quad (12)$$

$$\gamma_1 B_{1m}^9 - \alpha_1 B_{1m} = a_1; \gamma_2 B_{2m}^9 - \alpha_2 B_{2m} = a_2; \gamma_n B_{nm}^9 - \alpha_n B_{nm} = a_n, \beta_1 B_{1m} = d_1; \beta_2 B_{2m} = d_2; \beta_n B_{nm} = d_n.$$

Манба токи биринчи гармоникасининг амплитудаси ушбу занжирнинг исталган ФКК параметрлари орқали топилиши мумкинлиги аниқланди. Масалан, биринчи контур учун биринчи гармоника токининг қуйидаги ифодаси ҳосил қилинди:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = i_{c1} + i_{g1} + i_1 = \frac{k_1 l_1 b_1^9}{w_1} + w_1 g_1 s_1 \frac{db_1}{dt} + w_1 C_1 s_1 \frac{d^2 b_1}{dt^2}. \quad (13)$$

Дифференциаллаш ва гармоник функциялар даражасини биринчи даражали гармоникалар йиғиндиси билан алмаштириш операциялари бажарилгандан ҳамда асосий гармоника частотасига эга ҳадларни ҳисобга олиб, гармоник баланс усули бўйича ўзгартиришдан сўнг НИ1 даги магнит индукциянинг биринчи гармоникаси амплитудаси ва занжирнинг шохобчаланмаган қисмидаги ток амплитудаси

$I_m = \sqrt{(\gamma_1 B_{1m}^9 - \alpha_1 B_{1m})^2 + (\beta_1 B_{1m})^2}$ ўртасида боғлиқликни изоҳловчи ифода, шунингдек токнинг бошланғич фазаси $\psi_i = \arctg\left(\frac{\beta_1 B_{1m}}{-\alpha_1 B_{1m} + \gamma_1 B_{1m}^9}\right)$ ни ёки

ФКК_n (C_3, g_3, NI_n элементлари) параметрлари орқали умумий кўринишдаги $I_m = \sqrt{(\gamma_n B_{nm}^9 - \alpha_n B_{nm})^2 + (\beta_n B_{nm})^2}$ ва

$\psi_i = \arctg\left(\frac{\beta_n B_{nm} \cos \varphi_{n-1} - (\gamma_n B_{nm}^9 - \alpha_n B_{nm}) \sin \varphi_{n-1}}{(\gamma_n B_{nm}^9 - \alpha_n B_{nm}) \cos \varphi_{n-1} + \beta_n B_{3m} \sin \varphi_{n-1}}\right)$ ифодалар келтириб чиқарилди.

Электромагнит индукция қонунидан келиб чиқадиган маълум нисбатларни ҳисобга олиб, манба кучланишининг оний қиймати учун қуйидаги ифода аниқланди:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = u_1 + u_2 + \dots + u_{n_3} = w_1 s_1 \frac{db_1}{dt} + w_2 s_2 \frac{db_2}{dt} + \dots + w_n s_n \frac{db_n}{dt}. \quad (14)$$

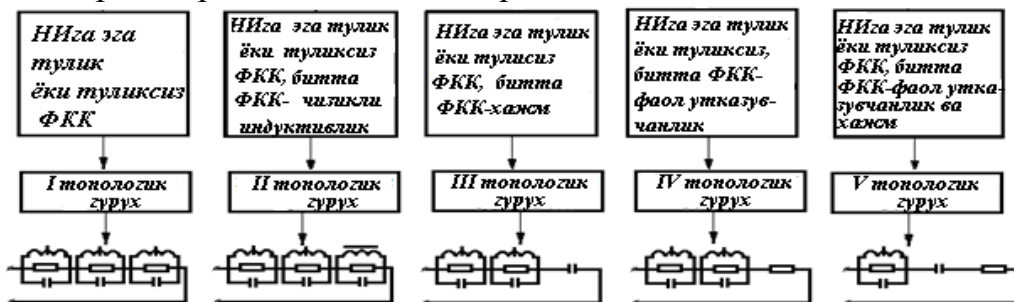
НИ₁-НИ_n ночизик индуктивликлардаги магнит индукциялар амплитудаларидан олинган функция сифатида занжирга берилган кучланишнинг амплитудаси ва бошланғич фазаси учун мос равишда қуйидаги ифодалар олинди:

$$U_m = \sqrt{(\nu_2 B_{2m} \sin \varphi_1 + \nu_3 B_{3m} \sin \varphi_2 + \dots + \nu_n B_{nm} \sin \varphi_{n-1})^2 + (\nu_1 B_{1m} + \nu_2 B_{2m} \cos \varphi_1 + \nu_3 B_{3m} \cos \varphi_2 + \dots + \nu_n B_{nm} \cos \varphi_{n-1})^2}, \quad (15)$$

$$\psi_u = \arctg\left(\frac{\nu_1 B_{1m} + \nu_2 B_{2m} \cos \varphi_1 + \nu_3 B_{3m} \cos \varphi_2 + \dots + \nu_n B_{nm} \cos \varphi_{n-1}}{\nu_2 B_{2m} \sin \varphi_1 + \nu_3 B_{3m} \sin \varphi_2 + \dots + \nu_n B_{nm} \sin \varphi_{n-1}}\right), \quad (16)$$

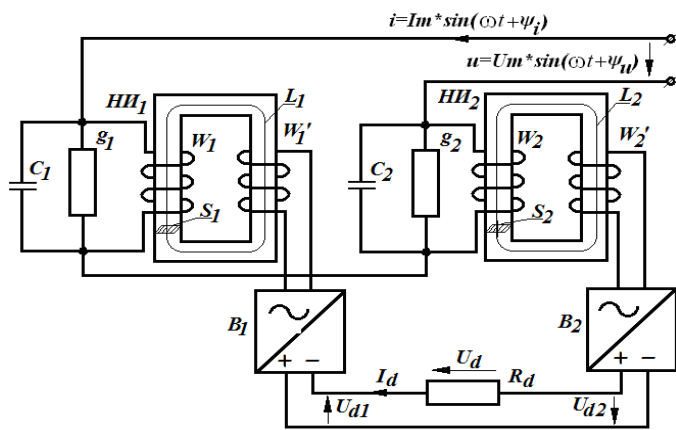
бу ерда $\nu_1 = w_1 s_1 \omega$; $\nu_2 = w_2 s_2 \omega$; $\nu_n = w_n s_n \omega$; $\varphi = \psi_u - \psi_i$.

Мазкур бобда 10- расмда кўрсатилган 5 та топологик гуруҳларнинг ҳар бири учун ҳосил қилинган математик моделнинг тенгламаларини ўзгартириш йўллари кўриб чиқилган. Ҳисобий характеристикалар ва тажриба натижалари ўртасида етарли даражада яқинлик борлиги аниқланди.

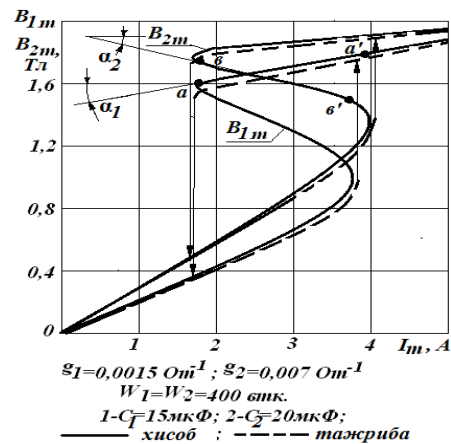


10- расм. Элементлар ўртасида магнит боғланишларга эга бўлмаган параметрик стабилизаторларнинг топологик гуруҳлари

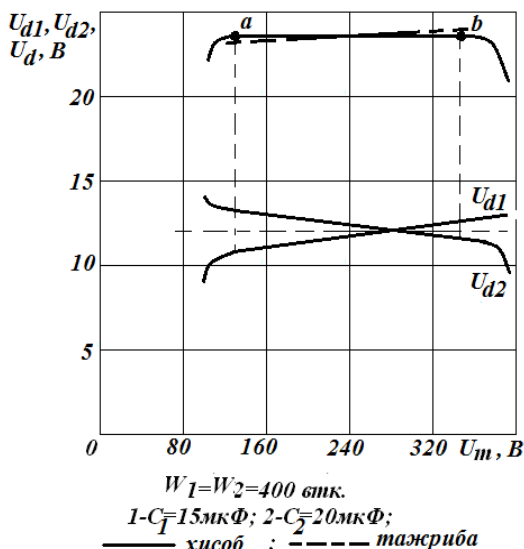
Магнит боғланишларга эга бўлмаган кўп контурли феррорезонанс занжирлар асосидаги параметрик таъминот манбаини қўллаш намунаси сифатида 11- расмдаги занжир хизмат қилади. Ушбу стабилизатор учун B_{1m} ва $B_{2m} = f(I_m)$ боғлиқликлар 12- расмда келтирилган. Расмдан кўриниб турганидек, феррорезонанс сакрашлар иккала контурда ҳам рўй берганда, уларнинг шундай иш режими ўрнатиладики, бунда биринчи ФКК (ғалтак NI_1 ва конденсатор C_1) $a-a'$ участкада индуктив режимда, иккинчи ФКК (ғалтак NI_2 ва конденсатор C_2) эса $b-b'$ участкада сиғим режимда ишлайди.



11- расм. Ферромагнит элементлар орасида магнит боғланишларга эга бўлмаган стабилизатор схемаси



12- расм. B_{1m} ва $B_{2m} = f(I_m)$ боғлиқликлари



13- расм. Стабилизаторнинг ташқи характеристикаси

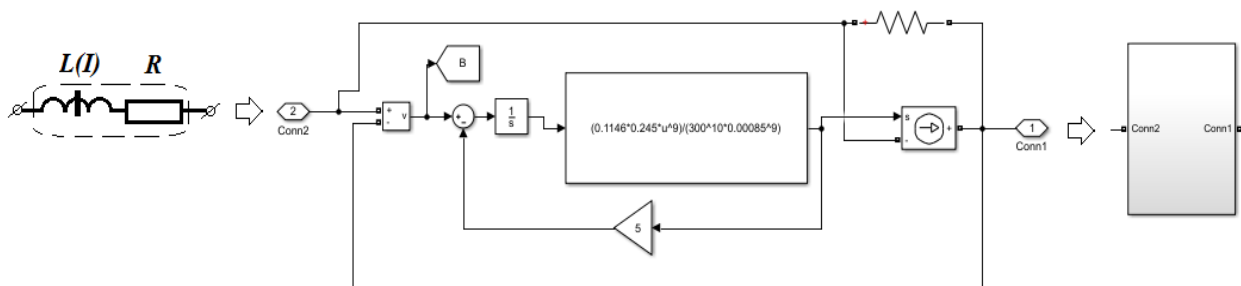
Бунда ушбу тавсифларнинг α_1 ва α_2 қиялик бурчаклари горизонталга нисбатан қиймат жиҳатдан тахминан бир хил, аммо ишораси билан фарқ қилади. 13- расмда стабилизаторнинг ташқи тавсифи, яъни U_{d1} ва U_{d2} контурларида тўғриланган кучланишлар, шунингдек юкламадаги қиймати U_{d1} ва U_{d2} лар йиғиндисига тенг бўлган U_d кучланишнинг манба кучланиши U га боғлиқликлари кўрсатилган. 13- расмдан кўриниб турганидек, 100 дан 340 В гача бўлган кириш кучланишининг (ёки B_{1m} ва B_{2m} индукцияларнинг 1,6–1,85 Тл) ўзгариш диапазонида стабилизатор

киришидаги $U_d = U_{d1} + U_{d2}$ ифода ёрдамида аниқланадиган кучланиш деярли ўзгармайди (максимал оғиш тахминан 1,5% ни ташкил этади). Ферромагнит элементлар орасида магнит боғланишларга эга бўлмаган параметрик стабилизатор хоссаларини батафсил ўрганиш учун MATLAB дастурининг SIMULINK пакетини қўллаган ҳолда унинг компьютер модели яратилди. Тебраниш контурининг бир қисми ҳисобланган нозичиқ ғалтак 14-расмда кўрсатилган схема ёрдамида моделлаштирилади.

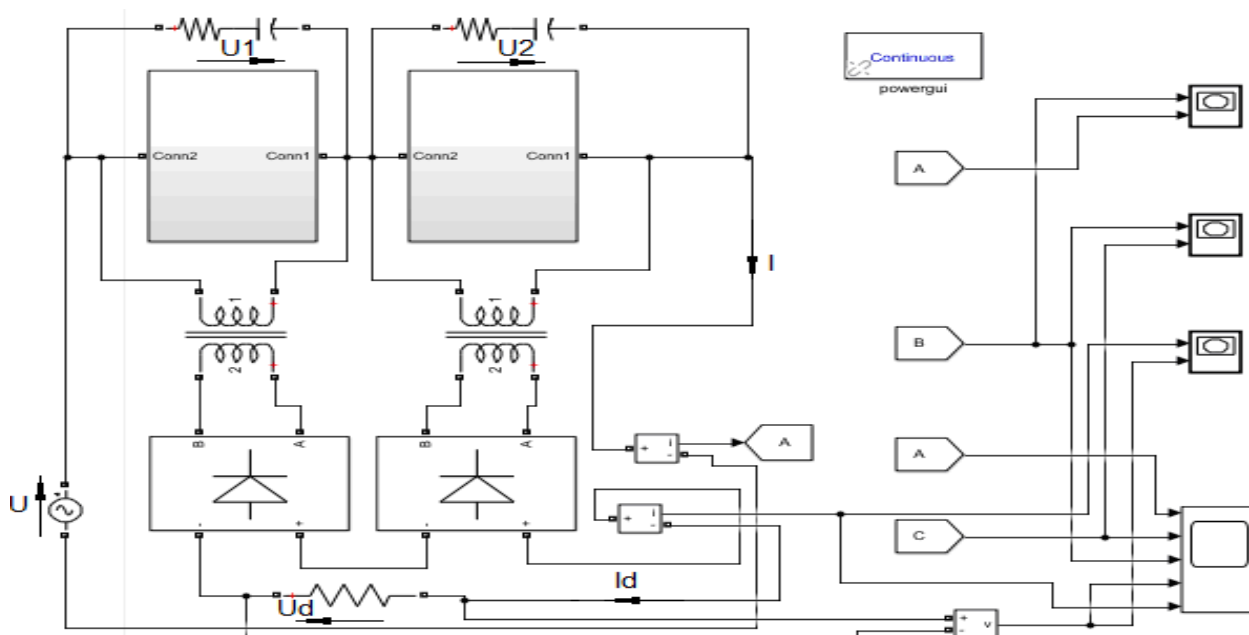
Нимтизим ток $I = \frac{kl\psi^9}{W^{10}s^9} = \alpha\psi^9$ ва $\psi(p) = [u(p) - Ri(p)] / p$ кўринишдаги

узатиш функциясини бажариш имконини берадиган илашиш оқими ўртасидаги боғланишни моделлаштиради. Ушбу нимтизим асосида 11-расмда келтирилган стабилизатор схемаси моделлаштирилди (15-расм). 16 – расм, а,б,в ларда ИЭТМ моделининг ВАХ, ростловчи ва юкланиш характеристикалари келтирилган. Ушбу характеристикалардан кўриниб турганидек, яратилган модель манба кучланиши ва юкланиш токининг ўзгаришида занжирнинг кириш токи ва моделлаштирилган занжирнинг

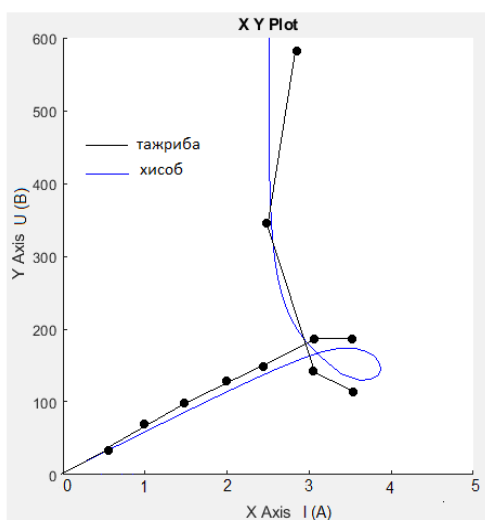
чиқиш кучланишини мутадиллашнинг техник самарасини тасдиқлайди, бу эса унинг мутаносиблигини исботлайди.



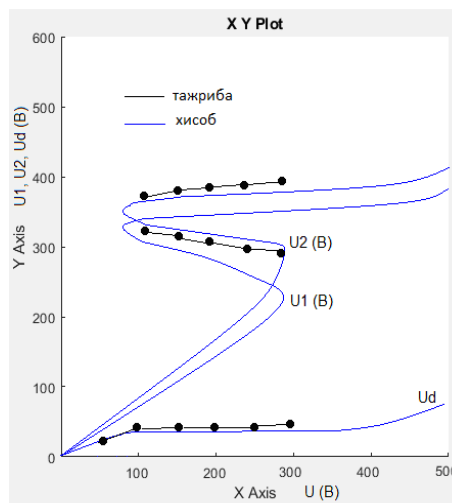
14- расм. Стабилизатор ночизик ғалтагини моделлаш нимтизими



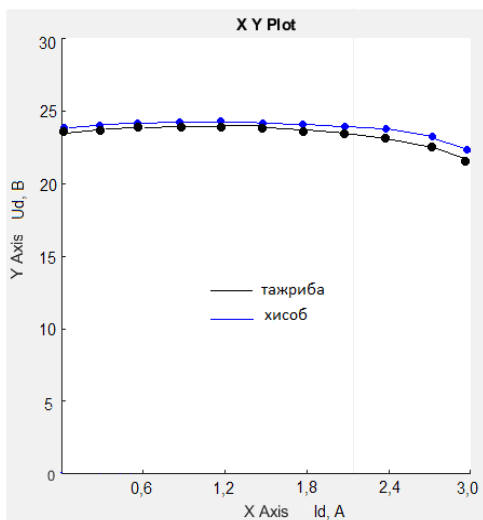
15-расм. Магнит алоқаларга эга бўлмаган стабилизаторнинг компьютер модели



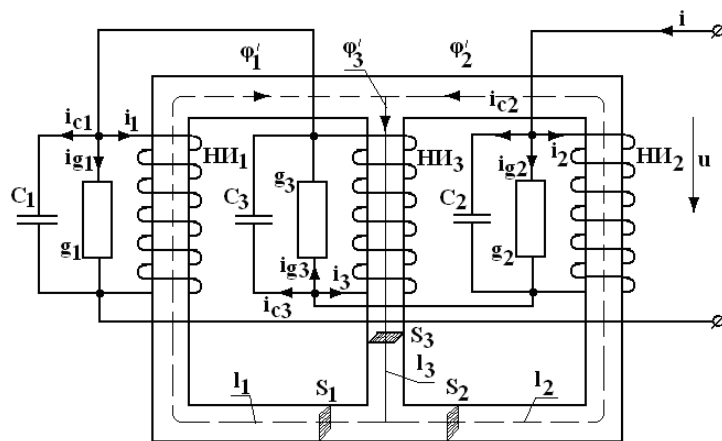
16,а-расм. ИЭТМ ВАТ



16,б-расм. Ростлаш характеристикаси



16,в-расм. Юкланиш характеристикаси



17-расм. Магнит алоқали умумлашган феррорезонанс занжир

«Ферромагнит элементлар ўртасида магнит боғланишларга эга бўлган кўп контурли феррорезонанс занжирлар» номли тўртинчи бобда электромагнит компонентлар ўртасида магнит боғланишларга эга бир фазали умумлашган ферромагнит занжирнинг таҳлили ўтказилган, занжирлар конфигурацияси ўзгарганда олинган ифодаларни ўзгартириш усуллари, шунингдек магнит боғланишларга ва параметрик токли ҳимояга эга бўлган бир фазали ва уч фазали стабилизаторлар схемалари кўриб чиқилган ҳамда стабилизаторларни компьютерда моделлаш намуналари келтирилган.

Ферромагнит элементлар ўртасида магнит боғланишларга эга бўлган ферромагнит ва феррорезонанс табиатли мутадиллаш схемаларининг топологик таҳлили шуни кўрсатдики, улар тўлиқ ҳолатда учтадан ортиқ бўлмаган параллел ФККларни ўз ичига олади, ферромагнит элементлари эса учтадан кўп бўлмаган нозичиқ магнит боғланишлар билан боғланган. Бундай умумлашган занжир схемаси 17- расмда кўрсатилган.

Ушбу схемадан C, g ёки НИ элементларини олиб ташлаш, конфигурация ва нозичиқ магнит боғланишларни амалга ошириш усуллари ўзгартириш ҳамда ушбу боғланишларни чизикли боғланишларга алмаштириш орқали аввал кўриб чиқилган мутадилловчи занжирларнинг исталган турини олиш ёки янги занжирни синтезлаш мумкин. Мазкур занжир Кирхгоф қонунлари ва тўлиқ ток қонуни асосида тузилган электр ва магнит катталикларнинг оний қийматлари учун қуйидаги тенгламалар тизими билан ифодаланган:

а) электр катталиклар учун:

$$\begin{cases} i = i_{C1} + i_{g1} + i_1 = i_{C2} + i_{g2} + i_2 = i_{C3} + i_{g3} + i_3, \\ u = u_1 + u_2 + u_3 = w_1 s_1 \frac{db_1}{dt} + w_2 s_2 \frac{db_2}{dt} + w_3 s_3 \frac{db_3}{dt}. \end{cases} \quad (17)$$

б) магнит катталиклар учун (магнит ўтказгич материалнинг магнитланиш эгри чизигини $H = kb^9$ ифодаси билан аппроксимация қилишни ҳисобга олган ҳолда):

$$\begin{cases} \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_3 = 0, \\ b_1 s_1 + b_2 s_2 - b_3 s_3 = 0, \\ i_1 w_1 + i_3 w_3 = k b_1^9 l_1 + k b_3^9 l_3, \\ i_2 w_2 + i_3 w_3 = k b_2^9 l_2 + k b_3^9 l_3. \end{cases} \quad (18)$$

Магнит ўтказгичнинг чап ва ўнг стерженларидаги индукция учун куйидаги ифода олинди:

$$(\gamma B_{2m}^9 - dF_{2m}^9 + AB_{2m})^2 + (B' B_{2m})^2 = (zB_{1m}^9 + dF_{1m}^9 - DB_{1m})^2 + (MB_{1m})^2. \quad (19)$$

бу ерда $\gamma = 0,5 \left(\frac{w_1 + w_3}{w_2} \right) k l_2$; $d = \frac{k l_3}{s_3}$; $\rho + \alpha = A$; $\beta - m = B'$; $\lambda + \chi = D$; $\xi + n = M$;

$$\alpha = (w_1 + w_3) w_2 C_2 s_2 \omega^2; \quad \beta = (w_1 + w_3) w_2 g_2 s_2 \omega; \quad m = w_3^2 g_3 s_2 \omega; \quad n = w_3^2 g_3 s_1 \omega;$$

$$\lambda = w_1^2 C_1 s_1 \omega^2; \quad \rho = w_3^2 C_3 s_2 \omega^2; \quad z = 0,5 k l_1; \quad d = \frac{k l_3}{s_3}; \quad \chi = w_3^2 C_3 s_1 \omega^2; \quad \rho = w_3^2 C_3 s_2 \omega^2.$$

(19) тенгламанинг тузилиши магнит боғланишларга эга бўлмаган умумлашган магнит занжир учун ўхшаш ифода билан умумийлиги кузатилади. Фарқи эса нозик магнит боғланишларнинг параметрлари ва хоссаларини аниқлайдиган F_{1m}^9 ва F_{2m}^9 нозик функцияларнинг мавжудлигида намоён бўлади.

B_{1m} ва B_{2m} магнит индукциялар амплитудалари ўртасида фазалар силжиши бурчагининг куйидаги ифодаси топилди:

$$\varphi_1 = \arctg \left(\frac{(B' B_{2m})(zB_{1m}^9 + dF_{1m}^9 - DB_{1m}) - (\gamma B_{2m}^9 - dF_{2m}^9 + AB_{2m})(MB_{1m})}{(\gamma B_{2m}^9 - dF_{2m}^9 + AB_{2m})(zB_{1m}^9 + dF_{1m}^9 - DB_{1m}) + (B' B_{2m})(MB_{1m})} \right). \quad (20)$$

Магнит ўтказгич ўрта стерженидаги магнит индукциянинг биринчи гармоникаси амплитудаси магнит ўтказгичнинг чет стерженларидаги магнит индукцияларининг оний қийматларини топишга хизмат қиладиган аввал олинган ечимларни ҳисобга олган ҳолда аниқланди. Магнит ўтказгич ўрта стерженидаги индукциянинг $b_3 = B_{3m} \sin(\omega t + \varphi_3)$ кўринишдаги оний қиймати ечимини белгилаган ҳолда гармоник баланс усули бўйича ўзгартирилгандан сўнг магнит индукцияси ва токнинг бошланғич фазаси учун куйидаги ифодалар олинди:

$$B_{3m} = \sqrt{(\sigma_1 B_{1m} + \sigma_2 B_{2m} \cos \varphi_1)^2 + (\sigma_2 B_{2m} \sin \varphi_1)^2}. \quad (21)$$

$$\varphi_3 = \arctg \left(\frac{\sigma_2 B_{2m} \sin \varphi_1}{\sigma_1 B_{1m} + \sigma_2 B_{2m} \cos \varphi_1} \right). \quad (22)$$

Индукция B_{1m} ва таъминот токи I_{1m} амплитудаларини боғловчи ҳамда таъминот токнинг бошланғич фазаси учун куйидаги ифодалар олинди:

$$I_m = \sqrt{(\gamma_1 B_{1m}^9 - \alpha_1 B_{1m})^2 + (\delta_1 B_{1m})^2}, \quad (23)$$

$$\psi_i = \arctg \left(\frac{\delta_1 B_{1m}}{\gamma_1 B_{1m}^9 - \alpha_1 B_{1m}} \right), \quad (24)$$

бу ерда $\alpha_1 = w_1 C_1 s_1 \omega^2$; $\delta_1 = w_1 g_1 s_1 \omega$; $\gamma_1 = 0,5 \frac{k l_1}{w_1}$.

Таъминот кучланиши U_m ифодаси 17-расм бўйича занжир учун феррорезонанс контурларнинг ҳар биридаги кучланишнинг оний қийматлари учун тузилган Кирхгофнинг иккинчи қонуни бўйича топилди:

$$U_m \sin(\omega t + \psi_u) = u_1 + u_2 + u_3 = w_1 s_1 \frac{db_1}{dt} + w_2 s_2 \frac{db_2}{dt} + w_3 s_3 \frac{db_3}{dt}. \quad (25)$$

Кириш кучланиш амплитудасини магнит ўтказгич стерженларидаги магнит индукцияларнинг биринчи гармоникалари амплитудалари билан боғловчи ва кучланишнинг бошланғич фазаси учун ифодалар олинди:

$$U_m = \sqrt{(v_2 B_{2m} \sin \varphi_1 + v_3 B_{3m} \sin \varphi_3)^2 + (v_1 B_{1m} + v_2 B_{2m} \cos \varphi_1 + v_3 B_{3m} \cos \varphi_3)^2}, \quad (26)$$

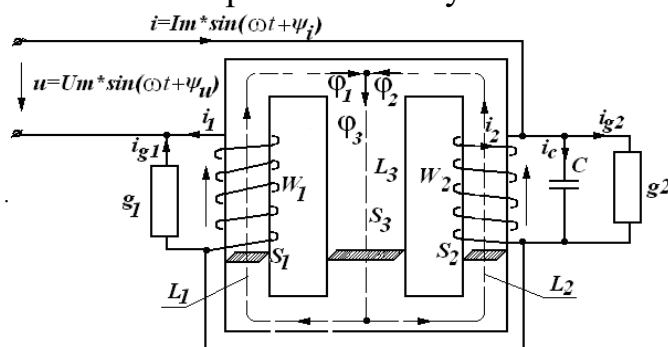
$$\psi_u = \arctg\left(\frac{v_1 B_{1m} + v_2 B_{2m} \cos \varphi_1 + v_3 B_{3m} \cos \varphi_3}{v_2 B_{2m} \sin \varphi_1 + v_3 B_{3m} \sin \varphi_3}\right). \quad (27)$$

Олинган амплитуда-фаза муносабатларидан фойдаланган ҳолда исталган характеристикаларни, яъни исталган ФКК ёки ундаги исталган элемент ёки элементлар бирикмасининг ташқи вольт-ампер, ростловчи, юклама характеристикаларини олиш мумкин бўлади.

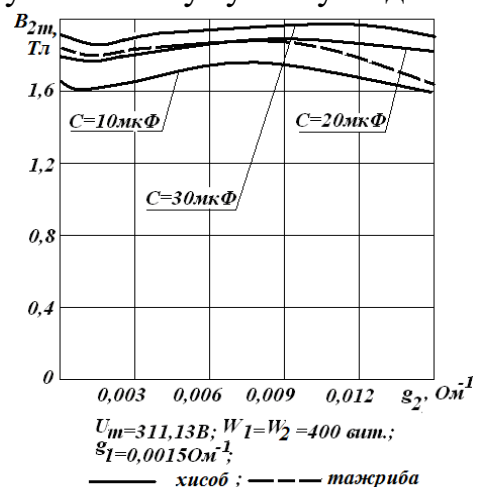
Мазкур бобда магнит боғланишларга эга стабилизаторлар 5 та топологик гуруҳининг ҳар бири учун олинган математик модел тенгламаларини ўзгартириш йўллари кўриб чиқилган, ҳисобий ва тажриба натижалари қониқарли даражада бир-бирига яқинлиги кўрсатилган.

Магнит боғланишларга эга бўлган стабилизаторнинг тақдим этилган схемаси варианты 18- расмда, унинг ташқи характеристикаси эса 19- расмда кўрсатилган. Ташқи характеристикадан кўриниб турганидек, магнит боғланишлар ушбу характеристиканинг ижобий хоссаларидан бирини намоён этишга хизмат қилади, яъни стабилизатор юкланиши ортганда, унинг кўтарилиш участкаси доимий токдаги кучланишни мутадиллаш сифатини яхшилайди.

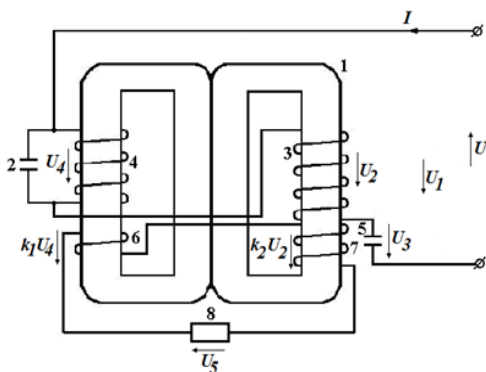
20- расмда қисқа туташув тоқларидан ҳимоялайдиган параметрик тоқли ҳимояга ва магнит боғланишларга эга стабилизаторнинг ишлаб чиқилган схемаси тасвирланган. Ушбу схема кетма-кет уланган ва умумий ўзақда



18-расм. Магнит боғланишларга эга бўлган стабилизатор схемаси



19- расм. Магнит боғланишларга эга бўлган стабилизаторнинг ташқи тавсифи

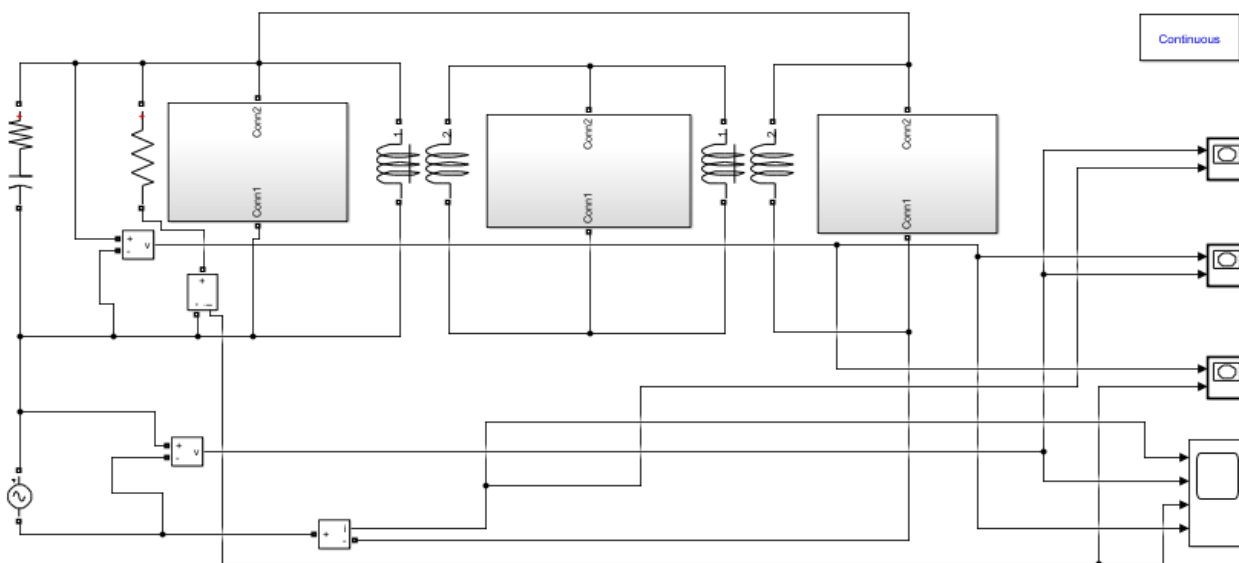


20- расм. Қисқа туташувлардан параметрик ҳимояга эга стабилизатор

мумкин. Шунингдек, магнит боғланишларга ва уч фазали манбага эга икки контурли стабилизаторлар ҳам кўриб чиқилган. Магнит боғланишларга эга параметрик стабилизаторлар хоссаларини ўрганиш учун MATLAB дастурининг SIMULINK пакетини қўллаган ҳолда компьютерда моделлаш бажарилган. 18- расмдаги занжирнинг компьютер модели 21- расмда кўрсатилган, у 14- расмдаги нимтизим асосида бажарилган. Магнит боғланишлар ўзаро индуктив блокларни (Mutual Inductance) қўллаган ҳолда бажарилган. Магнит боғланишларга эга схема учун яратилган компьютер моделидан олинган стабилизаторнинг юклама характеристикаси эгри чизиқлари ўзгариши (22-расм) компьютер моделининг тўғрилиги ва мослигини тасдиқлайди. Ушбу расмдан кўриниб турганидек, ташқи характеристика кўтарилиш участкасига эга бўлиб, у диодлардаги ва доимий токда ишлайдиган чиқишга эга стабилизаторлардаги кучланиш пасайишини компенсациялаш имконини беради. 20- расм бўйича қисқа туташув тоқларидан ҳимоялайдиган параметрик тоқли ҳимояга ва магнит боғланишларга эга стабилизаторнинг компьютер модели 23- расмда, унинг ташқи характеристикаси эса 24- расмда тасвирланган.

жойлаштирилган кетма-кет ва параллел феррорезонанс контурларига эга.

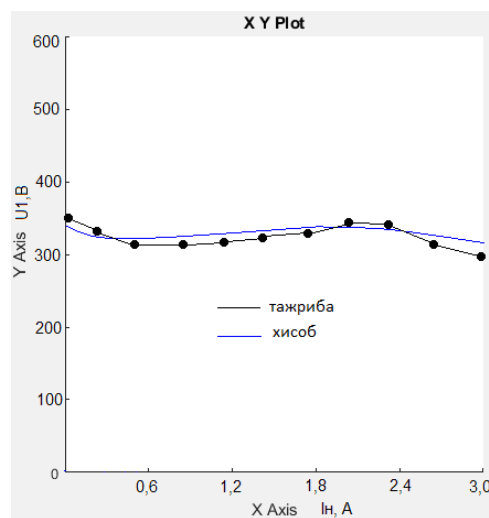
Параллел контур параметрларини ўзгартириб ва ундаги тебранишлар пайдо бўлиш вақтини бошқариб, тоқларни ўта юкланиш ёки қиймати номинал қийматнинг 1,2-1,4 гача бўлган қисқа туташув-тоқларидан чеклаш



21-расм. Магнит алоқаларга эга бўлган стабилизаторнинг компьютер модели

Характеристикадан кўриниб турганидек, мазкур модель ушбу схема ёрдамида параметрик токли ҳимояни амалга ошириш имкониятини тасдиқлайди. Шунингдек, кириш кучланиши ва юклама токининг ўзгаришида чиқиш кучланишини мутадиллаш эффекти ҳамда параметрик ҳимоя эффекти ўз тасдиғини топди.

Шундай қилиб, магнит алоқаларга эга умумлашган схема учун вольт-ампер, юкланишли ва ростловчи тавсифларга келтирилган ифодалар стабилизаторларнинг маълум бўлган схемалари хоссаларини ўрганишга ва янги схемаларни синтезлашга хизмат қилади, компьютер моделлари эса уларда янги ижобий техник самарани олиш имконини беради. Стабилизаторнинг чиқиш кучланишини ростлаш ёки бошқариш тизимига узатиш мақсадида уни стандарт кучланиш сигналига ўзгартириш учун Холл датчикларига эга янги компенсацияловчи қурилма ишлаб чиқилди, унинг схемаси 25- расмда келтирилган.



22-расм. Магнит алоқаларга эга бўлган ИЭТМнинг юкланиш тавсифи

Янги компенсацияловчи қурилманинг фарқли жиҳатлари шундаки, унда асосий магнит стержень ва узайтирилган магнит стерженнинг ён қисмлари ўртасидаги ишсиз ҳаво тирқишларини бартараф этиш ҳамда юқори аниқлик ва сезгирлик ҳамда статик характеристикасининг чизиқлиги каби афзалликлари мавжуд.

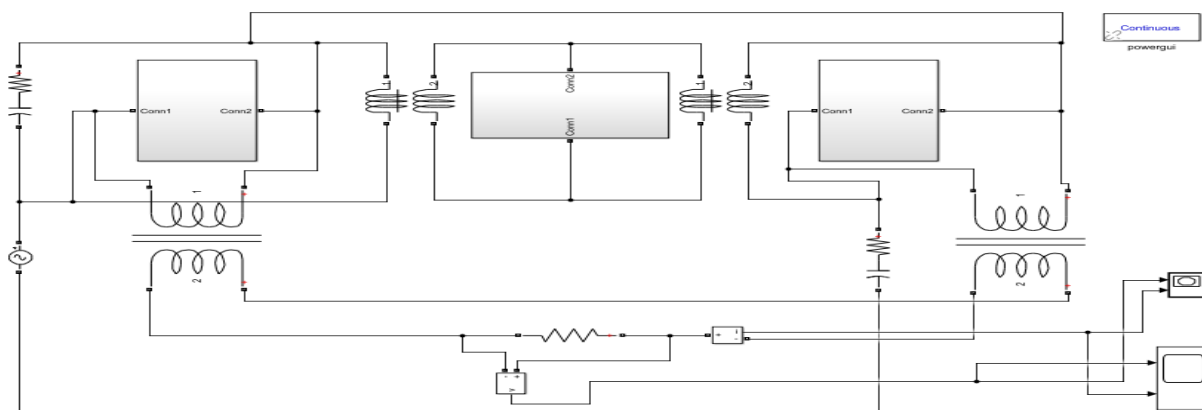
«Иккиламчи электр таъминоти параметрик манбаларининг динамик режимлари, турғунлиги, параметрларини оптималлаш ва муҳандислик ҳисоби» номли бешинчи бобда магнит боғланишларга эга бўлмаган ва магнит боғланишли стабилизаторларнинг кўп контурли феррорезонанс занжирларида ўткинчи жараёнларни компьютерда ҳисоблаш усуллари, шунингдек қурилмаларнинг турғунлиги, уларни оптималлаш ва муҳандислик ҳисоблари масалалари кўриб чиқилган.

Магнит боғланишларга эга бўлмаган занжирда ўткинчи жараёнларини ҳисоблаш 11- расмдаги занжир учун Рунге-Кутта сонли усулининг тўртинчи тартиби асосида, магнит боғланишларга эга бўлган занжир учун эса 18- расм бўйича амалга оширилди. Ушбу занжирлар учун дифференциал тенгламалар системаси қуйидаги кўринишга олиб келинди:

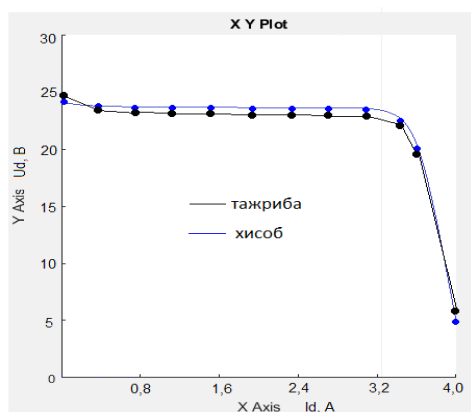
$$\begin{cases} \frac{db_1}{dt} = \frac{u - A_1 F}{B_1} \\ \frac{dF}{dt} = \frac{i - C_1 b_2^9 - D_1 F}{E}, \\ \frac{db_2}{dt} = F \end{cases}, \quad (28)$$

$$\begin{cases} \frac{db_1}{dt} = \frac{U_m \sin(\omega t + \psi_u) - A_1 F}{B_1} \\ \frac{dF}{dt} = \frac{b_1^9 D_2 - b_2^9 K + \frac{U_m \sin(\omega t + \psi_u) - A_1 F}{B_1} L - F M_1}{N_1}, \\ \frac{db_2}{dt} = F \end{cases}, \quad (29)$$

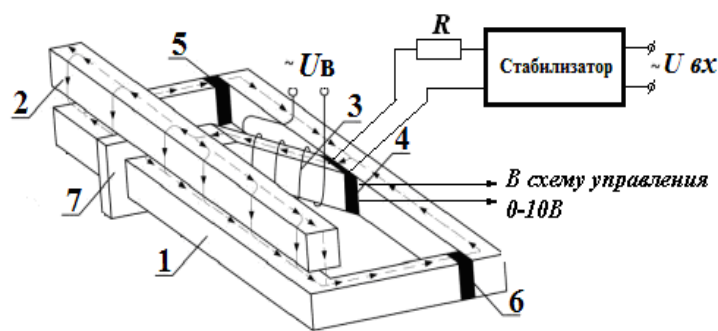
бу ерда $A_1=W_2S_2$; $B_1=W_1S_1$; $C_1=\frac{kL_2}{W_2}$; $D_1=W_2g_2S_2$; $D_2=1+W_1/W_2$; $E=W_2C_2S_2$;



23- расм. Магнит алоқаларга ва параметрик токли ҳимояга эга бўлган стабилизаторнинг компьютер модели



24- расм. Магнит алоқаларга ва параметрик токли ҳимояга эга бўлган стабилизаторнинг ташқи характеристикаси



25- расм. Ишлаб чиқилган компенсацияловчи қурилманинг конструктив схемаси: 1 ва 2 – магнит ўтказгичлар; 3 – қўзғалиш чулғами; 4, 5 ва 6 – Холл элементлари; 7 – ҳаракатланадиган (қўзғалувчи) электромагнит экран, R – ток чекловчи резистор

$$K = \frac{L_2}{L_1} + \frac{W_1 L_2}{W_2 L_1}; \quad L = \frac{W_1 W_2 g_1 S_1 + W_1^2 g_1 s_1}{k L_1};$$

$$M_1 = \frac{W_2^2 g_2 S_2 + W_1 W_2 g_2 S_2}{k * L_1}; \quad N_1 = \frac{W_2^2 C S_2 + W_1 W_2 C S_2}{k L_1} \frac{db_2}{dt} = F; \quad \frac{d_2 b_2}{dt^2} = \frac{dF}{dt}.$$

Ўткинчи жараёнлар учта режим учун ҳисоблаб чиқилди: салт иш режимидаги занжирни манбага улаш, юклама режимидаги занжирни манбага улаш ва юкламанинг кескин ўзгариши. Энг ноқулай шароитларда ўткинчи жараёнлар асосий частотанинг икки даври мобайнида тугади, бу эса занжирнинг яхши динамик хоссаларидан дарак беради.

18- расм бўйича занжирнинг динамик хоссаларини қатъий баҳолаш мақсадида у барқарорлик (турғунлик) назарияси элементларидан фойдаланган ҳолда ўрганиб чиқилди. Бунинг учун (29) ифода қуйидаги кўринишга ўзгартирилди:

$$\begin{cases} \frac{db_1}{dt} = A_2 U_m \sin(\omega t + \psi_u) - A_3 \frac{db_2}{dt} \\ \frac{d^2 b_2}{dt^2} = D_3 b_1^9 - D_4 b_2^9 + D_5 U_m \sin(\omega t + \psi_u) - D_6 \frac{db_2}{dt} \end{cases}, \quad (30)$$

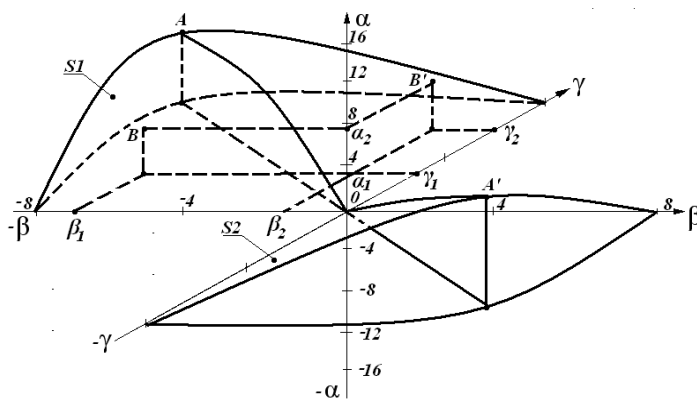
бу ерда $A_2 = \frac{1}{B_1}$; $A_3 = \frac{A}{B_1}$; $D_3 = \frac{D_2}{N_1}$; $D_4 = \frac{K}{N_1}$; $D_5 = \frac{L}{B_1 N_1}$; $D_6 = \frac{A_1 L}{B_1 N_1} - \frac{M_1}{N_1}$.

(30) ифодани секин ўзгарувчан амплитудалар усули бўйича ўзгартириб ва b_1, b_2 номаълумларнинг $b_1 = x \sin \omega t + y \cos \omega t$; $b_2 = m \sin \omega t + n \cos \omega t$ (бу ерда x, y, m, n – дастлабки тебранишларнинг вақт мобайнида секин ўзгарувчи амплитудалари) кўринишида тақдим этилиши мумкинлигини ҳисобга олиб, ўзгаришлардан сўнг қуйидаги характеристик тенглама олинди: $p^2 - p(\alpha + \delta) - \alpha\delta - \gamma\beta = 0$, (31). Гурвиц мезонига мувофиқ секин ўзгарувчи Δm ва Δn амплитудаларнинг ортишини сўндириш учун қуйидаги шартлар бажарилиши талаб этилади: $-(\alpha + \delta) > 0$; $(\alpha\delta - \gamma\beta) > 0$. $\alpha = \sqrt{-\gamma\beta}$ боғлиқлик графиги 26- расмда келтирилган.

Ушбу диссертация ишида ИЭТМни оптималлаш амалга оширилди, бунда бош мезон сифатида электромагнит элементнинг минимал ҳажми танлаб олинди, оптималлаш масаласи эса режимли чекловлар тўплами мавжудлигида ҳажмнинг мақсадли функцияси минимумини топишга қаратилди. Оптималлаш жараёнида қурилмаларнинг табиий равишда совуши ҳақида эътироф этилган, узатиладиган электромагнит қувват, токнинг қизиши ва унинг сифими эса чекловлар сифатида намоён бўлган. Магнит ўтказгич ҳажмининг ток зичлигига боғлиқлиги ифодаси қуйидагига тенг:

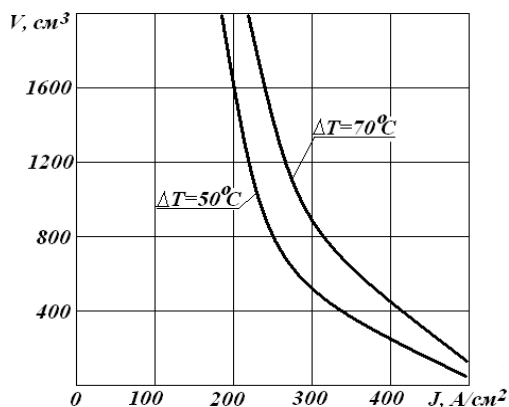
$$V_m = \left(\frac{13 \Delta T A}{P_o \left(\frac{f}{f^*} \right)^\varepsilon \left(\frac{B_{2m}}{B_{m^*}} \right)^\eta + 2J^2 \rho K_m K_t K_d} \right)^3, \quad (32)$$

бу ерда J – чулғамлардаги ток зичлиги; ρ – чулғамлар материалининг солиштира қаршилиги; K_m – магнит ўтказгич бўшлиғини пўлат билан тўлдириш коэффиценти; K_t – чулғам материали ҳароратининг ортиши туфайли ундаги қаршилиқнинг ортиш коэффиценти; K_d – қўшимча коэффицент, унинг қиймати $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ ва $\Delta T = 70^\circ\text{C}$ рухсат берилган қизишда ва Э360 (3424) пўлатдан тайёрланган магнит ўтказгичларни қўллашда 2 га тенг (27- расм).

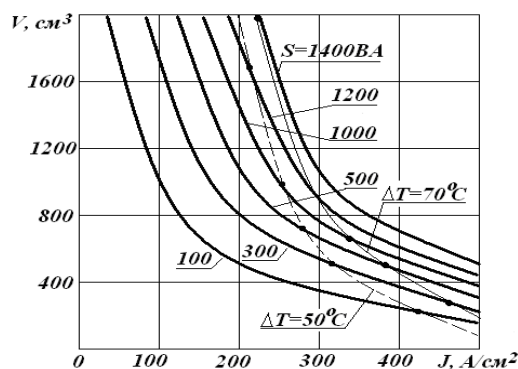


26-расм. Турғун ва нотурғун ишнинг бўлим юзаси

Графиклардан кўрииб турганидек, ИЭТМ магнит ўтказгичи ҳажмининг ортиши билан ток зичлиги камайиши лозим, бунда ушбу боғлиқлик қизишнинг катта қийматларида яққол намоён бўлади.



27- расм. Рухсат этилган қизишларда магнит ўтказгич ҳажмининг ток зичлигига боғлиқлик графиклари



28-расм. Магнит ўтказгич ҳажмининг ток зичлиги ва электромагнит қувватга боғлиқлик графиклари

Магнит ўтказгич ҳажми электромагнит қувват орқали ифодалангандан сўнг ўзгартиришлар ва чекловлар билан биргаликда мақсадли оптималлаш функцияси учун муайян ифода олинади, у электр, магнит ва иссиқлик параметрларини ўзаро боғлайди. Мақсадли функция графиги 28- расмда кўрсатилган.

$$V_M = \left(\frac{S}{\pi f K_{об} k B_{2m}^{10}} \right)^{\frac{2}{3}} \left[\frac{13 \Delta T A}{P_o \left(\frac{f}{f^*} \right)^\alpha \left(\frac{B_{2m}}{B_{m^*}} \right)^\beta + 2 J^2 \rho K_m K_d K_t} \right], \quad (33)$$

бу ерда $K_{об}$ – магнит ўтказгич бўшлиғининг чулғам билан тўлдирилишини ҳисобга олувчи, одатда 1 дан кичик бўлган ўраш (чулғам) коэффициенти.

Кесишув нуқталарида қизишлар (узликли чизиклар) ва электромагнит қувват (яхлит чизиклар) учун (32) ва (33) ифодаларнинг биргаликдаги график ечими электромагнит элементнинг минимал ҳажмида иссиқлик мувозанатини сақлаб турадиган ток зичлиги ва қувватни беради. Динамик режимлар ва турғунликни тадқиқ этиш натижалари кучланишни мутадиллаш учун ўрганилган схемаларнинг яроқлилиги ҳақида хулоса чиқаришга имкон берди, ҳажмнинг топилган мақсадли функцияси эса энг мақбул ИЭТМнинг муҳандислик ҳисоблари асоси сифатида олинди.

ХУЛОСА

Феррорезонанс табиатли параметрик электр таъминоти манбаларини таҳлил қилиш, моделлаштириш ва оптималлаш бўйича амалга оширилган тадқиқотлар натижаларига кўра қуйидаги хулоса чиқарилди:

1. Базавий бўғинлар конфигурациялари ва магнит боғланишларни қўллаш усуллари асосида параметрик таъминот манбалари таснифи ишлаб чиқилди, у мавжуд ва янги ишлаб чиқилаётган схемаларни схема-техник ва режимли оптималлаш йўллари белгилаш имконини берди.

2. Турли аппроксимациялаш функцияларини қўллаш, ғалтаклардаги фаол исрофларнинг ночизиклиги, сочилган индуктивлиги, чулғамларнинг хусусий сифими ва гармоник ташкил этувчиларни тўлиқ ҳисобга олмаслик каби ҳолатларда стабилизаторлар таҳлили аниқлигини баҳолаш услуги

ишлаб чиқилди, ушбу жараён ҳар бир соддалаштирувчи чекловлар учун ҳисоблашлардаги чегаравий хатоликларни аниқлашга ёрдам берди.

3. Магнит боғланишларга эга бўлмаган ва контурлар орасида магнит боғланишли кўп контурли таъминот манбаларининг умумлашган математик моделлари ишлаб чиқилди, улар параметрик табиатли феррорезонанс мутадиллаш занжирларини умумий таҳлил қилиш имконини берди.

4. Кўп контурли стабилизаторларнинг янги схемалари яратилди, шунингдек уларнинг ижобий техник самарага эришиш имконини берадиган компьютер моделлари ишлаб чиқилди.

5. Стабилизатор чиқиш кучланишини стандарт сигналга ўзгартириш учун юқори аниқликка, сезгирликка ва чизиқли статик характеристикага эга янги компенсацияловчи қурилма ишлаб чиқилди.

6. Оптимал иккиламчи электр таъминоти манбаларини лойиҳаш имкониятларини берувчи кўп контурли стабилизаторлар оғирлик-габарит кўрсаткичларини минималлаш услуби таклиф этилди.

7. Параметрик табиатли феррорезонанс мутадиллаш қурилмаларининг муҳандислик ҳисобларини бажариш имконини берадиган кўп контурли стабилизаторлар муҳандислик ҳисоблаш услуби ишлаб чиқилди.

8. Кўп контурли занжирлар асосида ишлаб чиқилган «Фазалар сонини барқарор ўзгартиргич» қурилмаси «Ўзбекистон темир йўллари» АЖ га қарашли «Тошкент» электр таъминоти дистанциясига қарашли «Чукурсой» тортувчи нимстанциясида жорий қилинган бўлиб, релели ҳимоя ва автоматика қурилмаларини мутадил ва сифатли электр энергияси ҳисобига умумий йиллик иқтисодий самараси 149 млн. сўмни ташкил этади.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ
DS.c.03/10.12.2019 Т.03.03 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ИМЕНИ
ИСЛАМА КАРИМОВА**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

БЕДРИЦКИЙ ИВАН МИХАЙЛОВИЧ

**ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ВТОРИЧНОГО
ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСНОЙ ПРИРОДЫ: АНАЛИЗ И
МОДЕЛИРОВАНИЕ**

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

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

Ташкент – 2021

Тема диссертации доктора наук (DSc) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за В2021.1. DSc /Т419.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном транспортном университете.
Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице (www.tdtu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

Научный консультант:

Амиров Султон Файзуллаевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Ибодуллаев Мухтар Ибодуллаевич
доктор технических наук, профессор

Колесников Игорь Константинович
доктор технических наук, профессор

Плахтиев Анатолий Михайлович
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация:

**Ташкентский университет
информационных технологий**

Защита диссертации состоится «15» 12 2021 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019.T.03.03 при Ташкентском государственном техническом университете (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (зарегистрировано № 230) (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 246-03-41).

Автореферат диссертации разослан «02» 12 2021 года.
(реестр протокола рассылки № 7 от «02» 12 2021 года).



К.Р. Аллаев

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

О.Х. Ишназаров

Ученый секретарь Научного совета
по присуждению учёных степеней,
д.т.н., профессор

Т.Ш. Гойилов

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

ВВЕДЕНИЕ (Аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире особое внимание уделяется питанию электронных устройств, используемых в средствах связи, устройствах питания гальванических ванн и зарядно-выпрямительных устройствах, а также в измерительной, вычислительной и импульсной технике с использованием стабилизаторов. На сегодняшний день в развитых странах наблюдается тенденция «...широкого практического применения систем неизменных стабилизированных напряжений и токов, то есть систем распределения и потребления электрической энергии, обеспечивающих независимость напряжения или тока нагрузки от ее величины, а также их внедрения в различных областях электротехники и инженерной электрофизики...»¹. При этом особое внимание уделяется созданию вторичных источников, повышению качества стабилизации и надежности их работы, а также усовершенствованию схем стабилизаторов.

В мире ведутся научные исследования по следующим направлениям: свойства параметрических систем, применение параметрических устройств в экстремальных условиях и тяжелых средах, применение индуктивно-емкостных накопителей энергии в сочетании с возобновляемыми источниками энергии. В этом направлении, приоритетными считаются исследования по применению новых материалов в параметрических источниках питания и новых схемотехнических решений в индуктивно-емкостных преобразователях, развитию источников параметрического типа, усовершенствованию структуры их нелинейных электрических цепей. При этом актуальными задачами являются повышение качества стабилизации в параметрических системах, снижение массогабаритных показателей многоконтурных стабилизаторов.

В нашей стране осуществляются широкомасштабные работы по развитию энергетической сферы, являющейся важной отраслью экономики, обновлению технологического уровня сферы, в том числе обеспечению потребителей качественной и бесперебойной электроэнергией, усовершенствованию многоконтурных схем стабилизаторов с магнитными связями и без магнитных связей между ферромагнитными контурами. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы поставлена задача «... сокращение энергоемкости и ресурсоемкости экономики, широкое внедрение в производство энергосберегающих технологий, расширение использования возобновляемых источников энергии»². При выполнении данных задач важным является усовершенствование устройств, работающих на основе ферромагнитных, феррорезонансных и автопараметрических цепей, а также структуры их электрических цепей.

¹ <https://lemzspb.ru/> Индуктивно-емкостные источники тока. //Саенко И.В., Опре В.М., Новик А.А Дозоров С.А. и др.– 2021 г.– с. 1-4,.

² Указ Президента Республики Узбекистан №УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 года ПФ-4947 «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», в Постановлениях Президента Республики Узбекистан №ПП-2343 от 5 мая 2015 года «О программе мер по сокращению энергоемкости, внедрению энергосберегающих технологий в отраслях экономики и социальной сфере на 2015-2019 годы» и №ПП-3238 от 23 августа 2017 года «О мерах по дальнейшему внедрению современных энергоэффективных и энергосберегающих технологий», а также в других нормативно-правовых документах.

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

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации. Фундаментальным исследованиям новых структур нелинейных электрических цепей с целью создания на их базе источников вторичного электропитания с расширенными функциональными возможностями и улучшенными технико-экономическими характеристиками осуществляются в ведущих научных центрах и высших учебных заведениях мира. Особый вклад в решение данных задач внесли Institute of Electrical and Electronics Engineers (США), Iowa State University (США), Boulevard de l'Universite (Франция), Universite de Biskra (Алжир), Energy Research Institute (Китай), Токийский технологический институт (Япония), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Россия), Институт электродинамики НАН и Национальный технический университет (Украина), Уфимский государственный авиационный технический университет и Уфимский государственный нефтяной технический университет (Россия) и другие научные и исследовательские учреждения³.

Степень изученности проблемы. Существенный вклад в решение актуальных фундаментальных задач параметрических систем, применение новых материалов в параметрических источниках питания, вопросам практического использования параметрических устройств, теории намагничивания, а также по смежным проблемам внесли ученые D.C. Jiles, D.L.Atherton, M. Stosur, J. H. Chan, A.Vladimirescu, X. C. Gao, P.Liebmann, J.Valainis, Калантаров П.Л., Губанов В.В., Богданов А.И., В.М.Опре, Дозоров С.А., Рогинская Л.Э., Кулинич В.А., И.В.Волков, Милях, А.Н., Тугай Ю.И., Б.Н.Кубышин, И.В. Пентегов, С.И. Закревский и другие.

³ <https://etu.ru>, <https://ied.org.ua>, <https://uiowa.edu>, <https://kpi.ua/ru>, <https://rusoil.net>, <https://ugatu.su/>, <https://www.engineering.uga.edu/current/student-organizations/IEEE>, <https://www.lequotidien.com/actualites/boulevard->, <https://univ-biskra.dz/index.php/fr/>

В Узбекистане значительный вклад в теорию параметрических стабилизаторов, в частности феррорезонансных устройств, внесли такие ученые, как Рахимов Г.Р., Каримов А.С., Кадыров Т.М., Ибадуллаев М.И., Бурханходжаев А.М., Львов В.К., Файзиев М.М., Абдуллаев Б.А., Алимов А.Х., Бегматов Ш.Э., Расулов А.Н. и другие.

На основании этих исследований разработаны основы теории и расчета параметрических источников питания. Несмотря на определенные успехи, в их работах не рассматривается теория построения многоконтурных стабилизаторов напряжения и многоконтурных стабилизаторов напряжения с магнитными связями между контурами.

Связь диссертационного исследования с планом научно-исследовательских работ ВУЗа, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ №3 «Совершенствование электромагнитных и электроизмерительных устройств для железнодорожного транспорта» (2016-2020) Ташкентского государственного транспортного университета.

Целью диссертации является решение проблемы повышения качества стабилизации напряжения с применением параметрических стабилизаторов.

Задачи исследования состоят в разработке:

обобщенной классификации параметрических источников питания без магнитных связей и с магнитными связями между ферромагнитными элементами на основе конфигураций базовых звеньев;

оценки погрешностей аппроксимации при использовании различных аппроксимирующих функций, от нелинейных потерь в сердечнике, неучета индуктивности рассеяния, собственной емкости обмоток и всех гармонических составляющих решения;

математических моделей многоконтурных параметрических источников вторичного электропитания без магнитных связей между контурами и с магнитными связями между контурами;

новых схем стабилизаторов на основе использования многоконтурных схем без магнитных связей и с магнитными связями между ферромагнитными контурами;

компенсирующего устройства для преобразования выходного напряжения стабилизатора;

путей снижения весогабаритных показателей многоконтурных стабилизаторов и методики инженерного расчета многоконтурных стабилизаторов.

Объект исследования – системы многоконтурных стабилизаторов напряжения без магнитных связей и с магнитными связями между ферромагнитными контурами.

Предметом исследования являются теория амплитудных и фазовых соотношений между контурами многоконтурных стабилизаторов напряжения.

Методы исследования. В процессе исследования применялись: гармонический анализ, численные методы решения дифференциальных

уравнений (метод Рунге-Кутты 4-го порядка), метод малого параметра при исследовании устойчивости и аналитические методы при решении задач минимизации.

Научная новизна работы заключается в следующем:

разработана обобщенная классификация параметрических источников питания на основе конфигураций базовых звеньев и способов организации магнитных связей между контурами;

разработана методика оценки точности расчетов стабилизаторов при использовании различных аппроксимирующих функций, нелинейности потерь в сердечнике, индуктивности рассеяния, собственной емкости обмоток и неполного учета гармонических составляющих решения;

разработаны математические модели многоконтурных параметрических стабилизаторов без магнитных и с магнитными связями между ферромагнитными контурами;

синтез усовершенствованных схем стабилизаторов на основе использования многоконтурных схем без магнитных и с магнитными связями между ферромагнитными контурами;

разработана новая конструкция компенсирующего устройства для преобразования выходного напряжения стабилизатора, обладающего повышенной чувствительностью, точностью и линейностью выходной характеристики;

разработан метод расчета многоконтурных стабилизаторов на основе снижения их весогабаритных показателей.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

выявлены новые и устойчивые закономерности и связи между параметрами феррорезонансных контуров в многоконтурных стабилизаторах без магнитных связей и с магнитными связями между контурами, позволяющие рассчитывать их рабочие характеристики;

предложены методы расчета режимов и весогабаритных показателей устройств, позволяющие оптимизировать рабочие процессы в параметрических стабилизаторах;

разработаны компьютерные модели параметрических стабилизаторов, позволяющие исследовать их свойства в широком диапазоне изменений схемных и режимных параметров.

Достоверность результатов исследования, полученных научных результатов и выводов достигнута применением теоретически обоснованных математических моделей, моделированием и проверкой результатов с помощью современных компьютерных программ, проверкой результатов на экспериментальной установке, качественным и количественным сопоставлением результатов моделирования с экспериментальными данными.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в разработке математических моделей многоконтурных стабилизирующих устройств без магнитных связей между контурами и с магнитными связями между

контурами и методов минимизации весогабаритных показателей для стабилизаторов параметрического типа.

Практическая значимость работы заключается во внедрении параметрического стабилизатора напряжения в производство. Практическая значимость полученных результатов состоит в экономии потребляемой энергии путем применения стабилизатора с повышенным качеством стабилизации и высокой надежностью.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов, полученных по исследованию параметрических источников вторичного электропитания феррорезонансной природы:

параметрический стабилизатор напряжения внедрен на тяговой подстанции «Чукурсай» в качестве источника питания для настройки устройств релейной защиты и автоматики (справка АО «Ўзбекистон темир йўллари» №НГ/01/3120-21 от 13.09.21). В результате достигнуто обеспечение стабильной и качественной электрической энергией устройств релейной заўитқ и автоматики тяговой подстанции, при этом экономический эффект составил 149 млн. сум;

метод инженерного расчета многоконтурных стабилизаторов внедрен на тяговой подстанции «Чукурсай» (справка АО "Ўзбекистон темир йўллари" № НГ/01/3120-21 от 13.09.21). В результате достигнуто повышение точности расчета на 5-7% при определении потерь в сердечнике, индуктивности рассеяния и емкости обмоток;

получен патент Агентства по интеллектуальной собственности при министерстве юстиции Республики Узбекистан на компенсирующее устройство (№IAP 06464) В результате появилась возможность преобразовывать стабилизированное напряжение с высокой чувствительностью и точностью.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 15 международных и 13 республиканских научно-технических конференциях:

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 48 научных работ, в том числе 1 монография, 25 статей в периодических научных журналах, из них 13 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, и 5 статей, индексируемых в базе Scopus, а также получено два авторских свидетельства, 1 патент Республики Узбекистан на изобретение и 2 положительных решения о выдаче патентов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации состоит из 200 страниц основного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность работы, освещено состояние вопроса, сформулированы цель и задачи исследования, даны характеристики

объекту и предмету исследования, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов научных исследований в производство, сведения об опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе «Источники вторичного электропитания на базе ферромагнитных, феррорезонансных и автопараметрических цепей» рассмотрены общие принципы работы параметрических стабилизаторов и природа параметрической стабилизации. Выявлено, что параметрический стабилизатор должен содержать как минимум два обязательных последовательно соединенных элемента – нелинейное звено (НЗ) с приближающимся к нулю значением динамического сопротивления и балластный элемент (БЭ) с большим сопротивлением. Схема замещения такого стабилизатора показана на рис. 1, она питается переменной синусоидальной ЭДС E , активная нагрузка имеет сопротивление R_H , а дифференциальная магнитная проводимость ДН в режиме насыщения равна нулю. Получено следующее выражение для среднего напряжения на нагрузке:

$$U_H = U_{ДН} + (E - U_{ДН} \frac{R_H + Z_{БЭ}}{R_H}) \left(\frac{R_{НЗ} R_H}{R_{НЗ} R_H + Z_{БЭ} R_H + Z_{БЭ} R_{НЗ}} \right). \quad (1)$$

где $U_{ДН} = 2\pi f w s B_s$ – напряжение на дросселе насыщения, f , w , s , B_s – соответственно частота, число витков, сечение магнитопровода и индукция насыщения в нем.

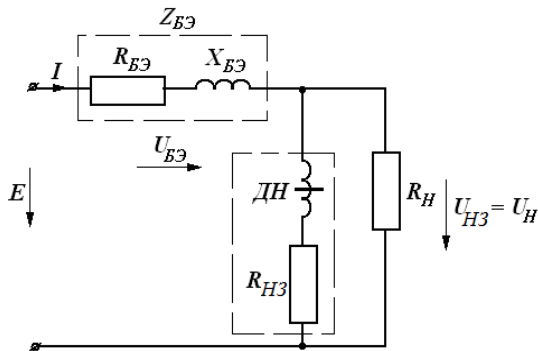


Рис.1.Схема замещения простейшего параметрического стабилизатора

Из полученного выражения видно, что при активном сопротивлении обмотки ДН, равном $R_{НЗ} = 0$ напряжение на дросселе равно напряжению его насыщения и не зависит от колебаний напряжения сети. Коэффициент стабилизации напряжения, равный отношению изменения входной ЭДС ΔE к изменению напряжения на нагрузке ΔU_H , определяется из соотношения $K = \frac{\Delta E}{\Delta U_H}$, которое может

быть преобразовано к виду $K \approx \frac{U_{ДН}}{E} \frac{Z_{БЭ}}{Z_{НЗ}} + 1$. Из последнего выражения видно,

что коэффициент стабилизации зависит главным образом от соотношения $\frac{Z_{БЭ}}{Z_{НЗ}}$, и с целью его повышения необходимо увеличивать $Z_{БЭ}$ и уменьшать $Z_{НЗ}$.

Свойства феррорезонансного колебательного контура (ФКК) зависят от его топологической структуры и определяются видом его вольтамперной характеристики (ВАХ). Предложена классификация параметрических стабилизаторов (рис.2), в основу которой положен вид ВАХ, которых для

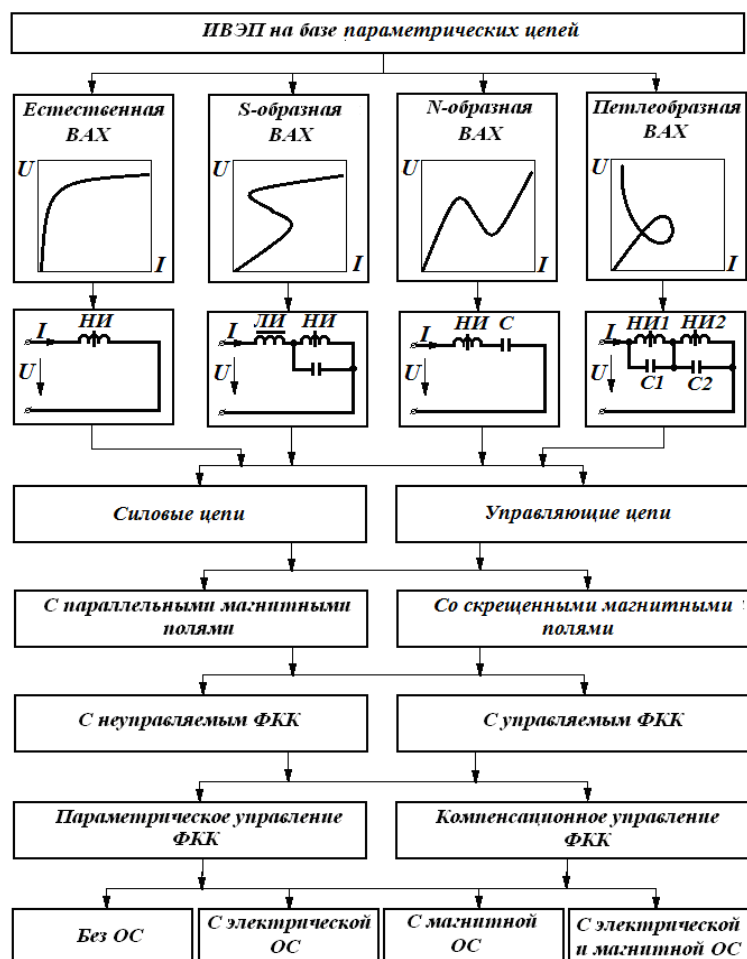


Рис. 2. Классификация ИВЭП с параметрической стабилизацией

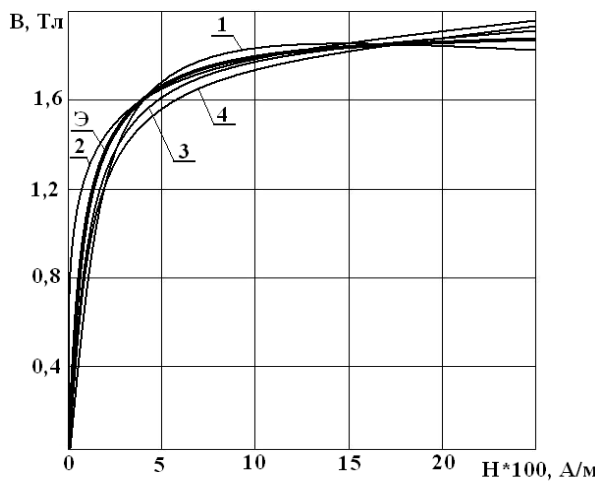
рассматриваемого вида устройств может быть четыре: 1) естественная ВАХ неуправляемого и управляемого ферромагнитного элемента; 2) N-образная ВАХ последовательного ФКК; 3) S-образная ВАХ параллельного ФКК; 4) петлеобразная ВАХ, полученная сочетанием ВАХ цепей первых трех видов. Классификация учитывает вид используемых магнитопроводов и магнитных полей (с параллельными, скрещенными и ортогональными магнитными полями), управляемость и способы управления характеристикой БЗ (параметрический или компенсационный), а также способ организации управляющих обратных связей (электромагнитная, магнитная, электрическая).

Проведенные исследования позволили наметить способы совершенствования параметрических стабилизаторов, а также пути схемотехнической, режимной и весогабаритной оптимизации.

Во второй главе «Оценка погрешностей при анализе параметрических и феррорезонансных цепей» разработана методика оценки погрешностей, возникающих при анализе параметрических цепей, обусловленных выбором аппроксимирующей функции, от неучтенной

индуктивности рассеяния ферромагнитных компонентов, от неучтенной собственной емкости обмоток, от нелинейного характера активных проводимостей катушек ферромагнитных компонентов и неполного учета всех гармонических составляющих.

Анализ графиков зависимости $B=f(H)$ для стали Э360 (3424), построенных на основании аппроксимирующих функций и основной кривой намагничивания, полученных



Э-эксперимент; а- $B=1,84*\tanh(0,37*H)$; б- $H=4,538*10^{-3} \operatorname{sh}(4,76*B)$; в- $H=0,64*B-0,365*B^3+1,247*B^5-0,894*B^7+0,219*B^9$; г- $H=0,1146*B^9$

Рис.3. Аппроксимирующие функции

анализе цепей.

Анализ показал, что наиболее пригодной по критерию простоты и точности является аппроксимация неполным полиномом.

Исследовано более подробно аппроксимацию обобщенным полиномом вида с нечетным показателем степени. Результаты аппроксимации приведены на рис. 4, анализ аппроксимирующих кривых показывает, что наиболее пригодными для этих целей являются неполные полиномы 9 и 11 степени.

Кривые зависимости погрешностей аппроксимации $\delta(\%)=f(H)$ от значений напряженности для неполных полиномов степеней от 3 до 11 для холоднокатаной стали Э360(3424) показаны на рис.5. Анализом кривых зависимости погрешностей $\delta=f(H),\%$ для холоднокатаной стали Э360(3424) установлено, что погрешности при аппроксимации полиномами со степенями 9 и 11 дают наименьшие погрешности, не превышающие 12%, что можно считать допустимым при расчете катушек с ферромагнитными элементами.

Индуктивность ферромагнитного элемента при фиксированном значении амплитуды индукции и использовании аппроксимации кривой

намагничивания в виде $H=\kappa B^9$ вычисляется по соотношению $L = \frac{B_m S w^2}{\kappa B_m^9 l}$,

полученного из закона полного тока, а индуктивность рассеяния – по выражению $L_s = \frac{\mu_0 w^2}{h} F_L$, где F_L – коэффициент, учитывающий

экспериментально, показан (рис.3), из него видно, что все функции подходят для аппроксимации выбранной марки холоднокатаной электротехнической стали по критерию точности. Однако, тангенс гиперболический синус функции неудобны для последующих преобразований, так как приводят к необходимости вычисления амплитуд функций Бесселя мнимого аргумента при работе ферромагнитных устройств в цепях переменного тока. Кроме того, выражения с гиперболическими функциями неудобны для получения обратных зависимостей (H от B или B от H), что бывает необходимо при

геометрические параметры обмотки. Для физической модели ферромагнитного элемента при индукции насыщения, равной 1,8 Тл получены следующие расчетные значения: среднее значение индуктивности $L=0,246$ Гн, индуктивность рассеяния $L_S=4,6 \cdot 10^{-3}$ Гн. Величина погрешности от неучета L_S составляет $\delta = \frac{L_S}{L} 100\% = \frac{4,6 \cdot 10^{-3}}{0,246} 100 = 1,88\%$. Эта погрешность существенно меньше погрешностей, обусловленных другими упрощающими допущениями.

Из экспериментов получено, что максимальная емкость катушки составляет порядка 150 пФ. Если учесть, что емкость конденсатора стабилизатора с последовательным колебательным контуром составляет порядка 7-10 мкФ, а с параллельным колебательным контуром – порядка 15-25 мкФ, то становится очевидным, что собственная емкость катушки пренебрежительно мала и ее учет не может никак влиять на результаты расчетов феррорезонансных устройств.

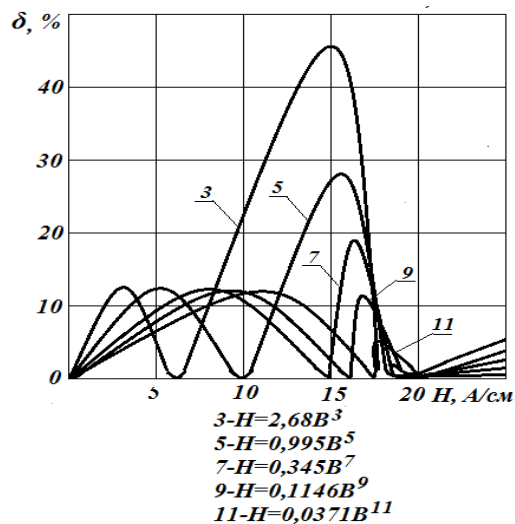
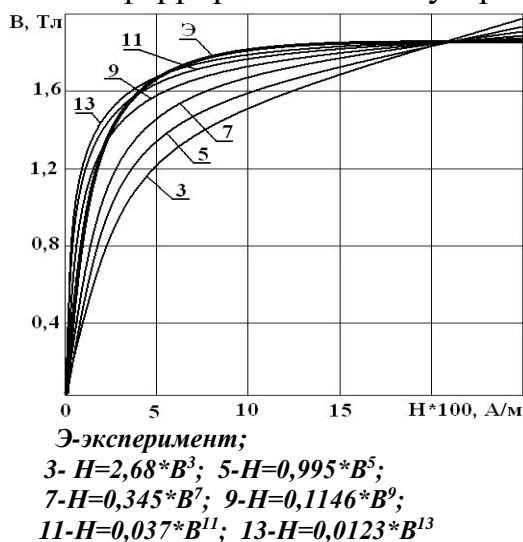


Рис.4. Аппроксимация полиномом **Рис.5. Погрешности аппроксимации**

Удельная величина потерь на гистерезис, вихревые токи и перемагничивание, являющихся основной долей потерь в магнитопроводе, может быть найдена из выражения $P_m = p_o \left(\frac{f}{f^*}\right)^\alpha \left(\frac{B_m}{B_m^*}\right)^\beta$, где p_o – удельная величина потерь в магнитопроводе материала сердечника при базовой амплитуде магнитной индукции $B_m^* = 1$ Тл и базовой частоте $f^* = 1000$ Гц; f , B_m – частота и амплитуда магнитной индукции, при которой работает НЭ; α , β – коэффициенты, зависящие от вида магнитного материала. Показано, что в случае феррорезонансных стабилизаторов напряжения, потери могут быть смоделированы обычным линейным сопротивлением. На рис.6 приведен график зависимости $P_m = f(B_m)$ для электротехнической стали Э360 (кривая 1) и аппроксимирующей прямой (прямая 1'). График аппроксимирован линейной зависимостью вида $P_m = KB_m + P$, где P – значение удельных потерь при $B_m = 0$. График зависимости относительной погрешности аппроксимации $\delta = f(B_m)$ показал (рис.7), что погрешность аппроксимации становится меньше

2%, следовательно, линейная аппроксимация вида $P_M = kB_m + P$ может считаться вполне допустимой.

Таким образом, погрешность расчета составляет 5,3%, что соизмеримо с погрешностями большинства математических моделей.

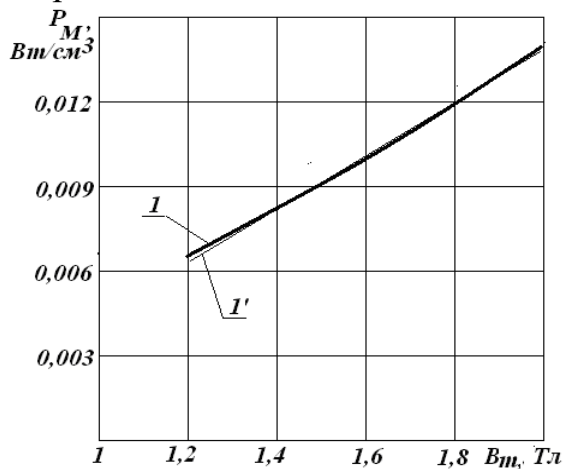


Рис.6. Моделирование потерь линейным сопротивлением

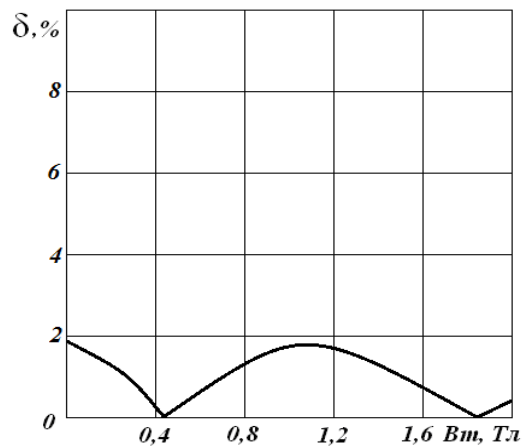


Рис.7. Погрешность аппроксимации линейным сопротивлением

С учетом изложенных выше допущений рассчитаны ВАХ БЗ стабилизирующих цепей ферромагнитной и феррорезонансной природы (рис.8), которые дают погрешности расчетов по сравнению с экспериментами не более 10%, что подтверждает их правильность.

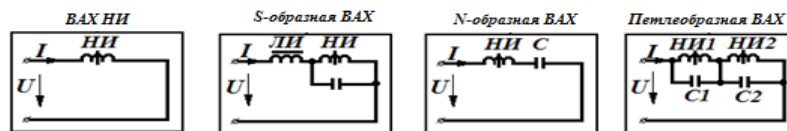


Рис. 8. Схемы базовых звеньев

В третьей главе «Многоконтурные обобщающие ферромагнитные цепи параметрических источников питания без магнитных связей» проведен анализ однофазной обобщающей ферромагнитной цепи без магнитных связей, рассмотрены способы преобразования полученных выражений при изменении конфигурации цепей, приводятся примеры реализации параметрических стабилизаторов на базе использования ферромагнитных компонентов без магнитных связей, а также рассмотрены примеры моделирования стабилизаторов с применением пакета SIMULINK программы MATLAB. Создание адекватной математической модели для этой цепи имеет важное научное и техническое значение, так как на ее основе могут быть получены математические модели любых параметрических стабилизаторов ферромагнитной природы без магнитных связей между индуктивными элементами. Схема обобщающей ферромагнитной цепи без магнитных связей показана на рис. 9. Электрическое состояние цепи может быть описано следующей системой уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа для мгновенных значений электрических величин

$$u = u_1 + u_2 + \dots + u_n, \quad (3)$$

$$i = i_{c1} + i_{g1} + i_1, \quad (4)$$

$$i = i_{C2} + i_{g2} + i_2, \quad (5)$$

$$i = i_{Cn} + i_{gn} + i_n. \quad (6)$$

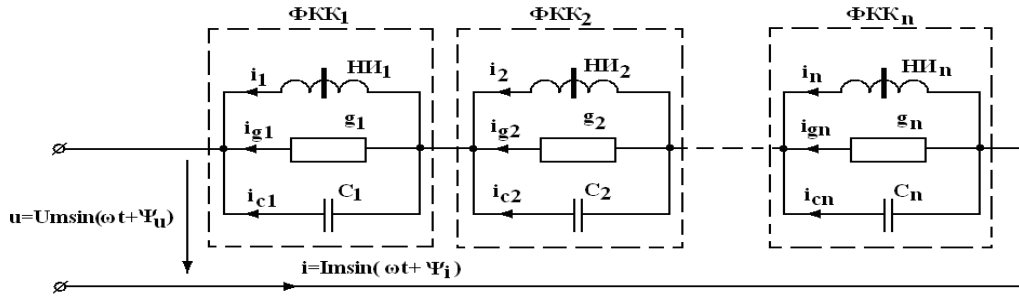


Рис. 9. Обобщающая ферромагнитная цепь без магнитных связей

При использовании аппроксимации кривой намагничивания сердечников HI_1 - HI_n выражением $H = kB^9$, а также с учетом известных соотношений, вытекающих из закона электромагнитной индукции, мгновенные значения токов в элементах цепи могут быть найдены из следующих выражений:

$$i_1 = \frac{k_1 l_1 b_1^9}{w_1}; \quad i_2 = \frac{k_2 l_2 b_2^9}{w_2} \dots \dots \dots i_n = \frac{k_n l_n b_n^9}{w_n}; \quad i_{C1} = w_1 C_1 s_1 \frac{d^2 b_1}{dt^2}; \quad i_{C2} = w_2 C_2 s_2 \frac{d^2 b_2}{dt^2}$$

$$i_{Cn} = w_n C_n s_n \frac{d^2 b_n}{dt^2}; \quad i_{g1} = w_1 g_1 s_1 \frac{db_1}{dt}; \quad i_{g2} = w_2 g_2 s_2 \frac{db_2}{dt} \dots \dots \dots i_{gn} = w_n g_n s_n \frac{db_n}{dt}. \quad (7)$$

После преобразования этих выражений получены следующие уравнения:

$$w_1 C_1 s_1 \frac{d^2 b_1}{dt^2} + w_1 g_1 s_1 \frac{db_1}{dt} + \frac{k_1 l_1 b_1^9}{w_1} = w_2 C_2 s_2 \frac{d^2 b_2}{dt^2} + w_2 g_2 s_2 \frac{db_2}{dt} + \frac{k_2 l_2 b_2^9}{w_2}, \quad (8)$$

$$w_2 C_2 s_2 \frac{d^2 b_2}{dt^2} + w_2 g_2 s_2 \frac{db_2}{dt} + \frac{k_2 l_2 b_2^9}{w_2} = w_3 C_3 s_3 \frac{d^2 b_3}{dt^2} + w_3 g_3 s_3 \frac{db_3}{dt} + \frac{k_3 l_3 b_3^9}{w_3}, \quad (9)$$

$$w_{n-1} C_{n-1} s_{n-1} \frac{d^2 b_{n-1}}{dt^2} + w_{n-1} g_{n-1} s_{n-1} \frac{db_{n-1}}{dt} + \frac{k_{n-1} l_{n-1} b_{n-1}^9}{w_{n-1}} = w_n C_n s_n \frac{d^2 b_n}{dt^2} + w_n g_n s_n \frac{db_n}{dt} + \frac{k_n l_n b_n^9}{w_n}. \quad (10)$$

Предполагая решения для мгновенных значений индукций в виде $b_1 = B_{1m} \sin \omega t$; $b_2 = B_{2m} \sin(\omega t - \varphi_1)$; $b_n = B_{nm} \sin(\omega t - \varphi_n)$, введя обозначения

$$\alpha_1 = w_1 C_1 s_1 \omega^2; \quad \beta_1 = w_1 g_1 s_1 \omega; \quad \gamma_1 = \frac{0,5 k_1 l_1}{w_1}; \quad \alpha_2 = w_2 C_2 s_2 \omega^2; \quad \beta_2 = w_2 g_2 s_2 \omega; \quad \gamma_2 = \frac{0,5 k_2 l_2}{w_2};$$

$$\alpha_n = w_n C_n s_n \omega^2; \quad \beta_n = w_n g_n s_n \omega; \quad \gamma_n = \frac{0,5 k_n l_n}{w_n}; \quad \tau = \omega t \quad \text{и преобразовывая}$$

полученные выражения по методу гармонического баланса без учета гармоник выше первой, получено следующие выражения для связей между магнитными индукциями:

$$\begin{cases} (\gamma_2 B_{2m}^9 - \alpha_2 B_{2m})^2 + (\beta_2 B_{2m})^2 = (\gamma_1 B_{1m}^9 - \alpha_1 B_{1m})^2 + (\beta_1 B_{1m})^2, \\ (\gamma_2 B_{2m}^9 - \alpha_2 B_{2m})^2 + (\beta_2 B_{2m})^2 = (\gamma_3 B_{3m}^9 - \alpha_3 B_{3m})^2 + (\beta_3 B_{3m})^2, \\ \dots \dots \dots \\ (\gamma_{n-1} B_{(n-1)m}^9 - \alpha_{n-1} B_{(n-1)m})^2 + (\beta_{n-1} B_{(n-1)m})^2 = (\gamma_n B_{nm}^9 - \alpha_n B_{nm})^2 + (\beta_n B_{nm})^2. \end{cases} \quad (11)$$

Показано, что решая систему (11), можно вычислить все возможные сочетания амплитуд первых гармоник магнитных индукций в индуктивностях НИ₁-НИ_n обобщающей ферромагнитной цепи без магнитных связей между ферромагнитными элементами.

Получены выражения для определения угла сдвига фаз между амплитудами магнитных индукций в нелинейных элементах, например в НИ_{n-1} и НИ_n

$$\varphi_n = \arctg\left(\frac{a_{n-1}d_n - d_{n-1}a_n}{d_{n-1}d_n + a_{n-1}a_n}\right), \quad (12)$$

где $\gamma_1 B_{1m}^9 - \alpha_1 B_{1m} = a_1$; $\gamma_2 B_{2m}^9 - \alpha_2 B_{2m} = a_2$; $\gamma_n B_{nm}^9 - \alpha_n B_{nm} = a_n$, $\beta_1 B_{1m} = d_1$; $\beta_2 B_{2m} = d_2$; $\beta_n B_{nm} = d_n$

Установлено, что амплитуда первой гармоники питающего тока может быть найдена через параметры любого из ФКК этой цепи. Например, для первого контура получено следующее выражение тока первой гармоники:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = i_{c1} + i_{g1} + i_1 = \frac{k_1 l_1 b_1^9}{w_1} + w_1 g_1 s_1 \frac{db_1}{dt} + w_1 C_1 s_1 \frac{d^2 b_1}{dt^2}. \quad (13)$$

После выполнения операций дифференцирования и замены степени гармонических функций суммой гармоник в первой степени, учитывая только члены с частотой основной гармоники, после преобразований по методу гармонического баланса получено выражение, описывающее зависимость между амплитудами первой гармоники магнитной индукции в НИ₁ и амплитудой тока в неразветвленной части цепи

$I_m = \sqrt{(\gamma_1 B_{1m}^9 - \alpha_1 B_{1m})^2 + (\beta_1 B_{1m})^2}$, а также формулу для определения начальной фазы тока $\psi_i = \arctg\left(\frac{\beta_1 B_{1m}}{-\alpha_1 B_{1m} + \gamma_1 B_{1m}^9}\right)$, или в общем виде через параметры ФКК_n

(элементы $C_3, g_3, НИ_n$) $I_m = \sqrt{(\gamma_n B_{nm}^9 - \alpha_n B_{nm})^2 + (\beta_n B_{nm})^2}$,

$$\psi_i = \arctg\left(\frac{\beta_n B_{nm} \cos \varphi_{n-1} - (\gamma_n B_{nm}^9 - \alpha_n B_{nm}) \sin \varphi_{n-1}}{(\gamma_n B_{nm}^9 - \alpha_n B_{nm}) \cos \varphi_{n-1} + \beta_n B_{3m} \sin \varphi_{n-1}}\right).$$

Определено следующее выражение для мгновенного значения приложенного напряжения с учетом известных соотношений, вытекающих из закона электромагнитной индукции:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = u_1 + u_2 + \dots + u_{n3} = w_1 s_1 \frac{db_1}{dt} + w_2 s_2 \frac{db_2}{dt} + \dots + w_n s_n \frac{db_n}{dt}. \quad (14)$$

Получено следующие выражения соответственно для амплитуды и начальной фазы приложенного к цепи напряжения как функцию от амплитуд магнитных индукций в нелинейных индуктивностях НИ₁-НИ_n:

$$U_m = \sqrt{(\nu_2 B_{2m} \sin \varphi_1 + \nu_3 B_{3m} \sin \varphi_2 + \dots + \nu_n B_{nm} \sin \varphi_{n-1})^2 + (\nu_1 B_{1m} + \nu_2 B_{2m} \cos \varphi_1 + \nu_3 B_{3m} \cos \varphi_2 + \dots + \nu_n B_{nm} \cos \varphi_{n-1})^2}, \quad (15)$$

$$\psi_u = \arctg\left(\frac{\nu_1 B_{1m} + \nu_2 B_{2m} \cos \varphi_1 + \nu_3 B_{3m} \cos \varphi_2 + \dots + \nu_n B_{nm} \cos \varphi_{n-1}}{\nu_2 B_{2m} \sin \varphi_1 + \nu_3 B_{3m} \sin \varphi_2 + \dots + \nu_n B_{nm} \sin \varphi_{n-1}}\right), \quad (16)$$

где обозначения $\nu_1 = w_1 s_1 \omega$; $\nu_2 = w_2 s_2 \omega$; $\nu_n = w_n s_n \omega$; $\varphi = \psi_u - \psi_i$.

В этой же главе рассмотрены пути преобразования уравнений

полученной математической модели для каждой из 5 топологических групп, вид которых показан на рис. 10. Получено достаточно хорошее совпадение между расчетными характеристиками и экспериментальными данными.

Примером реализации параметрического источника питания на базе многоконтурных феррорезонансных цепей без магнитных связей служит цепь по рис. 11. Зависимости B_{1m} и $B_{2m} = f(I_m)$ для этого стабилизатора показаны на рис.12. Из рисунка видно, что когда феррорезонансные скачки уже произошли в обоих контурах, устанавливается такой режим их работы, при котором первый ФКК (катушки $НН_1$ и конденсатор C_1) работает в индуктивном режиме на участке $a-a'$, а второй ФКК (катушка $НН_2$ и конденсатор C_2) работает в емкостном режиме на участке $b-b'$. При этом углы наклона этих характеристик α_1 и α_2 по отношению с горизонтали примерно одинаковы по значению, но отличаются по знаку. На рис.13 показана внешняя характеристика стабилизатора. Из рис. 13 видно, что в диапазоне изменения входного напряжения от 100 до 340В (или изменению индукций B_{1m} и B_{2m} в диапазоне 1,6–1,85Тл) напряжение на выходе стабилизатора, определяемое по выражению $U_d = U_{d1} + U_{d2}$, практически не изменяется (максимальное отклонения составляет около 1,5%).

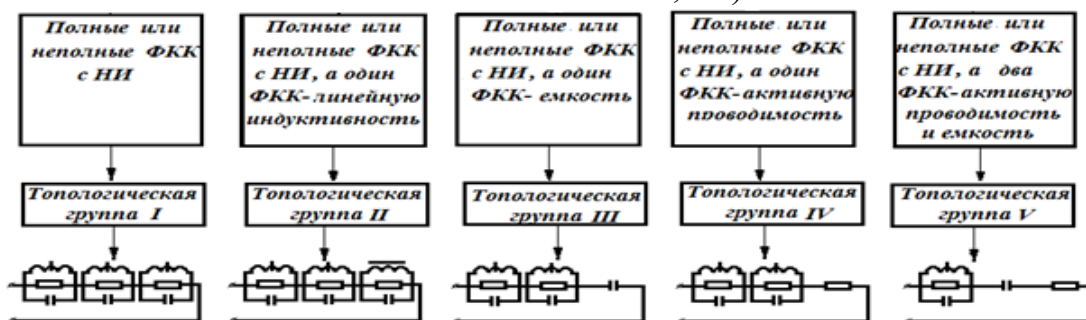


Рис.10.Топологические группы параметрических стабилизаторов без магнитных связей между элементами

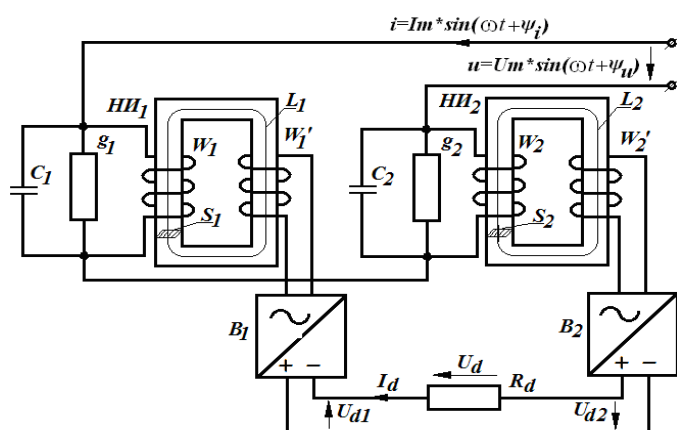


Рис.11. Схема стабилизатора без магнитных связей между ферромагнитными элементами

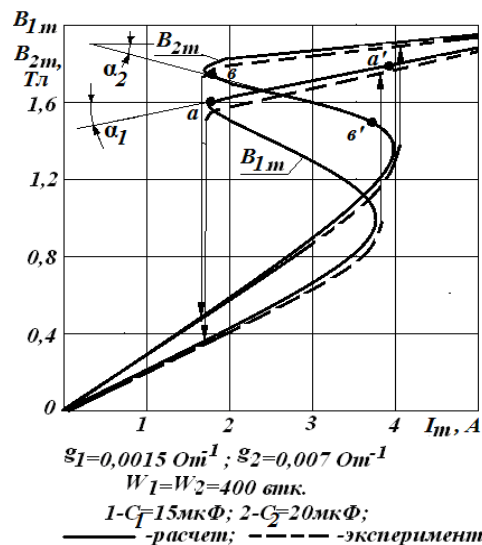


Рис. 12. Зависимости B_{1m} и $B_{2m} = f(I_m)$

Для подробного изучения свойств параметрического стабилизатора без магнитных связей между ферромагнитными элементами проводилось его

компьютерное моделирование с применением пакета SIMULINK программы MATLAB. Нелинейная катушка, являющаяся частью колебательного контура, моделируется схемой, показанной на рис.14. Подсистема моделирует связь между током и потокосцеплением

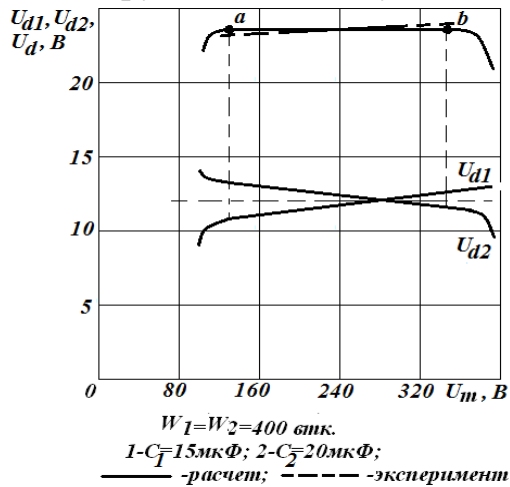


Рис. 13. Внешняя характеристика стабилизатора

$I = \frac{kl\psi^9}{W^{10}s^9} = \alpha\psi^9$, позволяющем реализовать передаточную функцию в виде $\psi(p) = [u(p) - Ri(p)] / p$. На основании этой подсистемы смоделирована модель стабилизатора по рис. 11, схема модели приведена на рис. 15.

На рис. 16,а, б и в показаны расчетные и экспериментальные вольтамперная (ВАХ), регулировочная и нагрузочная характеристики модели ИВЭП. Как видно из этих характеристик, модель подтверждает технические эффекты стабилизации входного тока цепи и выходного напряжения моделируемой

цепи при изменении питающего напряжения и нагрузочного тока, что свидетельствует о ее адекватности.

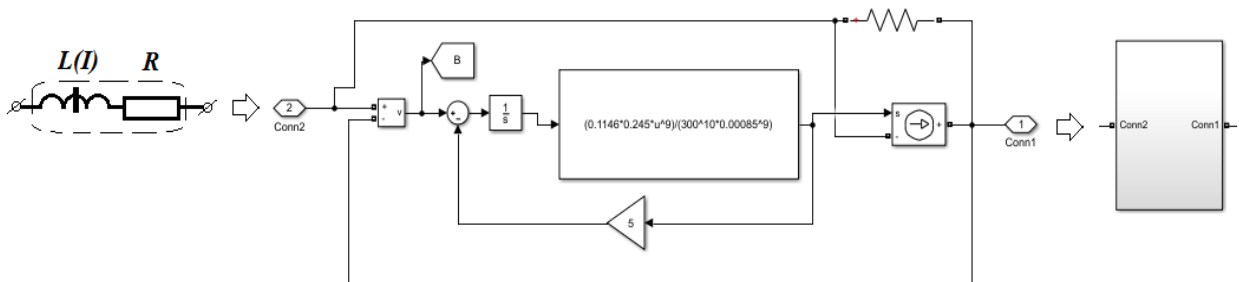


Рис. 14. Подсистема для моделирования нелинейной катушки стабилизатора

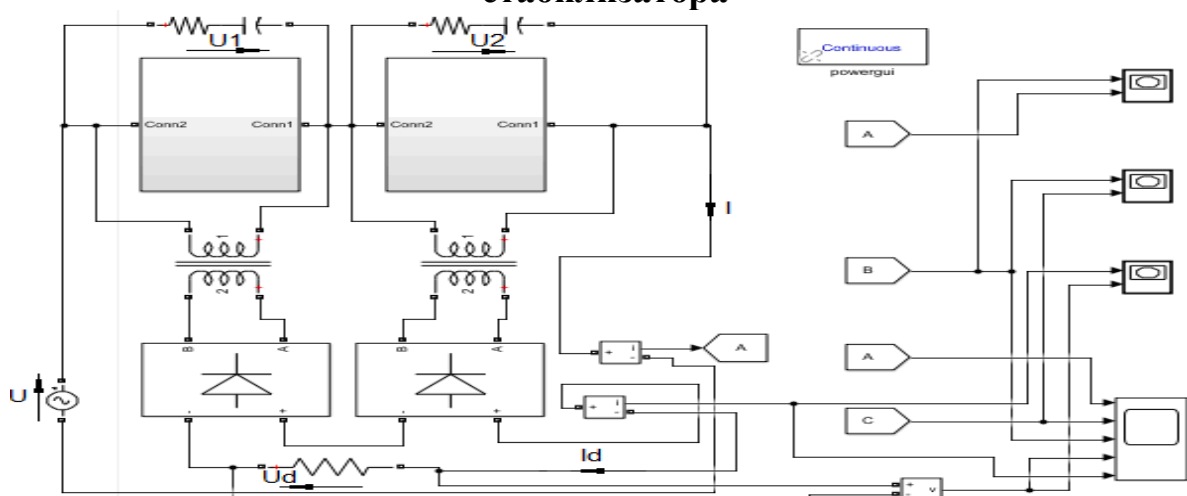


Рис. 15. Компьютерная модель стабилизатора без магнитных связей

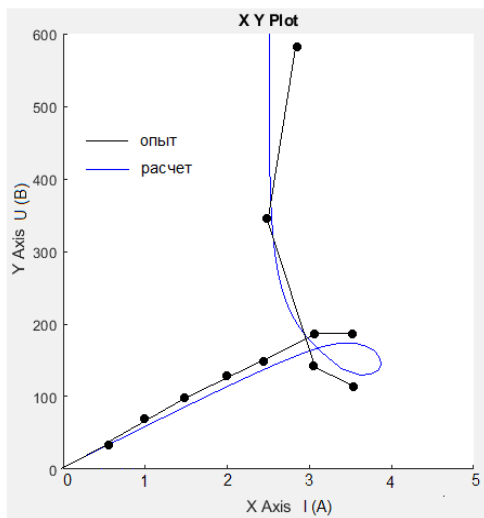


Рис.16,а. ВАХ ИВЭП

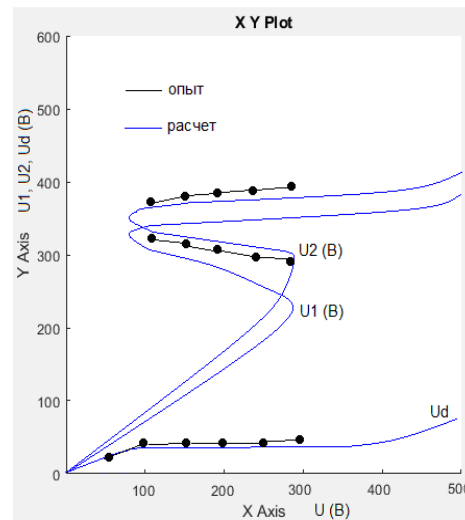


Рис.16,б. Регулировочная характеристика

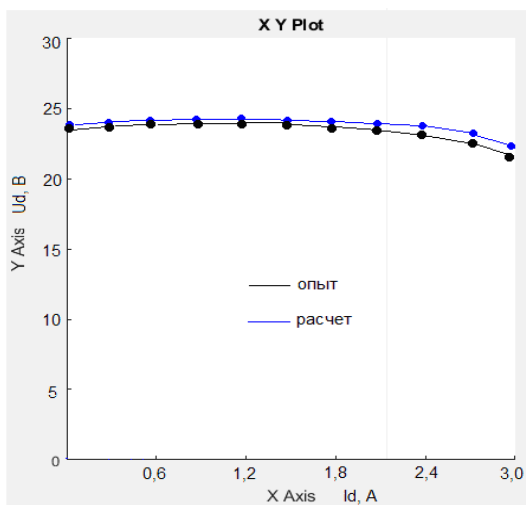


Рис. 16,в. Нагрузочная характеристика

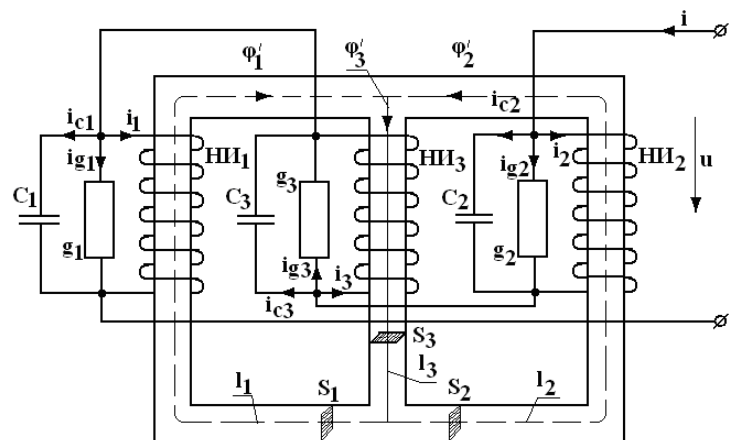


Рис.17. Обобщенная феррорезонансная цепь с магнитными связями

В четвертой главе «Многоконтурные феррорезонансные цепи с магнитными связями между ферромагнитными элементами» проведен анализ однофазной обобщающей ферромагнитной цепи с магнитными связями между электромагнитными компонентами, способы преобразования полученных выражений при изменении конфигурации цепей, а также рассмотрены схемы однофазных и трехфазных стабилизаторов с магнитными связями и с параметрической токовой защитой. Приводятся примеры компьютерного моделирования стабилизаторов.

Топологический анализ схем стабилизирующих цепей ферромагнитной и феррорезонансной природы с магнитными связями между ферромагнитными элементами показывает, что в наиболее полном виде они содержат не более трех параллельных ФКК, ферромагнитные элементы которых охвачены не более чем тремя нелинейными магнитными связями. Схема такой обобщенной цепи показана на рис. 17. Удаляя из нее элементы C , g или НИ и также меняя конфигурацию и способы осуществления нелинейных магнитных связей, а также заменяя эти связи линейными, можно получить практически любую из рассмотренных ранее цепей

стабилизирующих цепей или синтезировать новую цепь. Цепь описана следующей системой уравнений для мгновенных значений электрических и магнитных величин, составленных на основании законов Кирхгофа и закона полного тока:

а) для электрических величин:

$$\begin{cases} i = i_{c1} + i_{g1} + i_1 = i_{c2} + i_{g2} + i_2 = i_{c3} + i_{g3} + i_3, \\ u = u_1 + u_2 + u_3 = w_1 s_1 \frac{db_1}{dt} + w_2 s_2 \frac{db_2}{dt} + w_3 s_3 \frac{db_3}{dt}. \end{cases} \quad (17)$$

б) для магнитных величин (с учетом аппроксимации кривой намагничивания материала магнитопровода выражением $H = kb^9$):

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3 = 0, \\ b_1 s_1 + b_2 s_2 - b_3 s_3 = 0, \\ i_1 w_1 + i_3 w_3 = kb_1^9 l_1 + kb_3^9 l_3, \\ i_2 w_2 + i_3 w_3 = kb_2^9 l_2 + kb_3^9 l_3. \end{cases} \quad (18)$$

Получено следующее выражение для индукций в левом и правом стержнях магнитопровода:

$$(\gamma B_{2m}^9 - dF_{2m}^9 + AB_{2m})^2 + (B' B_{2m})^2 = (zB_{1m}^9 + dF_{1m}^9 - DB_{1m})^2 + (MB_{1m})^2, \quad (19)$$

где $\gamma = 0,5 \left(\frac{w_1 + w_3}{w_2} \right) kl_2$; $d = \frac{kl_3}{s_3}$; $\rho + \alpha = A$; $\beta - m = B'$; $\lambda + \chi = D$; $\xi + n = M$;

$$\alpha = (w_1 + w_3) w_2 C_2 s_2 \omega^2; \quad \beta = (w_1 + w_3) w_2 g_2 s_2 \omega; \quad m = w_3^2 g_3 s_2 \omega; \quad n = w_3^2 g_3 s_1 \omega;$$

$$\lambda = w_1^2 C_1 s_1 \omega^2; \quad \rho = w_3^2 C_3 s_2 \omega^2; \quad z = 0,5 kl_1; \quad d = \frac{kl_3}{s_3}; \quad \chi = w_3^2 C_3 s_1 \omega^2; \quad \rho = w_3^2 C_3 s_2 \omega^2.$$

Наблюдается общность структуры уравнения (19) с аналогичным выражением для обобщенной магнитной цепи без магнитных связей. Отличие заключается в наличии нелинейных функций F_{1m}^9 и F_{2m}^9 , определяющих параметры и свойства нелинейных магнитных связей.

Найдено следующее выражение угла сдвига фаз между амплитудами магнитных индукций B_{1m} и B_{2m} :

$$\varphi_1 = \arctg \left(\frac{(B' B_{2m})(zB_{1m}^9 + dF_{1m}^9 - DB_{1m}) - (\gamma B_{2m}^9 - dF_{2m}^9 + AB_{2m})(MB_{1m})}{(\gamma B_{2m}^9 - dF_{2m}^9 + AB_{2m})(zB_{1m}^9 + dF_{1m}^9 - DB_{1m}) + (B' B_{2m})(MB_{1m})} \right), \quad (20)$$

Амплитуда первой гармоники магнитной индукции в среднем стержне магнитопровода найдена с учетом полученных ранее решений для мгновенных значений магнитных индукций в крайних стержнях магнитопровода. Задаваясь решением для мгновенного значения индукции в среднем стержне магнитопровода в виде $b_3 = B_{3m} \sin(\omega t + \varphi_3)$, после преобразования по методу гармонического баланса получены следующие выражения для магнитной индукции и для начальной фазы тока:

$$B_{3m} = \sqrt{(\sigma_1 B_{1m} + \sigma_2 B_{2m} \cos \varphi_1)^2 + (\sigma_2 B_{2m} \sin \varphi_1)^2}, \quad (21)$$

$$\varphi_3 = \arctg \left(\frac{\sigma_2 B_{2m} \sin \varphi_1}{\sigma_1 B_{1m} + \sigma_2 B_{2m} \cos \varphi_1} \right). \quad (22)$$

Получены следующие выражения, связывающие амплитуды индукции B_{1m} и питающего тока I_{1m} , а также выражение для начальной фазы питающего тока:

$$I_m = \sqrt{(\gamma_1 B_{1m}^9 - \alpha_1 B_{1m})^2 + (\delta_1 B_{1m})^2}, \quad (23)$$

$$\psi_i = \arctg\left(\frac{\delta_1 B_{1m}}{\gamma_1 B_{1m}^9 - \alpha_1 B_{1m}}\right), \quad (24)$$

где $\alpha_1 = w_1 C_1 s_1 \omega^2$; $\delta_1 = w_1 g_1 s_1 \omega$; $\gamma_1 = 0,5 \frac{kl_1}{w_1}$.

Выражение для питающего напряжения U_m найдено по второму закону Кирхгофа, составленному для мгновенных значений напряжений на каждом из феррорезонансных контуров для цепи по рис.17:

$$U_m \sin(\omega t + \psi_u) = u_1 + u_2 + u_3 = w_1 s_1 \frac{db_1}{dt} + w_2 s_2 \frac{db_2}{dt} + w_3 s_3 \frac{db_3}{dt}. \quad (25)$$

Получены выражения, связывающие между собой амплитуду входного напряжения с амплитудами первых гармоник магнитных индукций в стержнях магнитопровода и для начальной фазы напряжения:

$$U_m = \sqrt{(\nu_2 B_{2m} \sin \varphi_1 + \nu_3 B_{3m} \sin \varphi_3)^2 + (\nu_1 B_{1m} + \nu_2 B_{2m} \cos \varphi_1 + \nu_3 B_{3m} \cos \varphi_3)^2}, \quad (26)$$

$$\psi_u = \arctg\left(\frac{\nu_1 B_{1m} + \nu_2 B_{2m} \cos \varphi_1 + \nu_3 B_{3m} \cos \varphi_3}{\nu_2 B_{2m} \sin \varphi_1 + \nu_3 B_{3m} \sin \varphi_3}\right). \quad (27)$$

Пользуясь полученными амплитудно-фазовыми соотношениями можно получить любую из интересующих характеристик – вольтамперную внешнюю, регулировочную, нагрузочную – для любого ФКК или для любого сочетания элементов в ФКК.

В этой же главе рассмотрены пути преобразования уравнений полученной математической модели для каждой из 5 топологических групп стабилизаторов с магнитными связями, получены удовлетворительные совпадения расчетных и экспериментальных данных.

Один из вариантов предлагаемых схем стабилизатора с магнитными связями показан на рис. 18, а на рис. 19 - его внешняя характеристика. Из

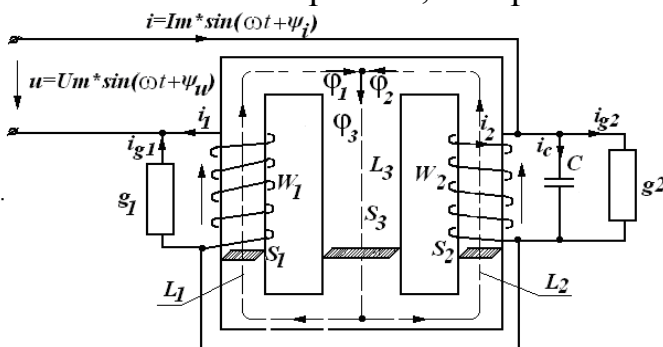


Рис. 18. Схема стабилизатора с магнитными связями

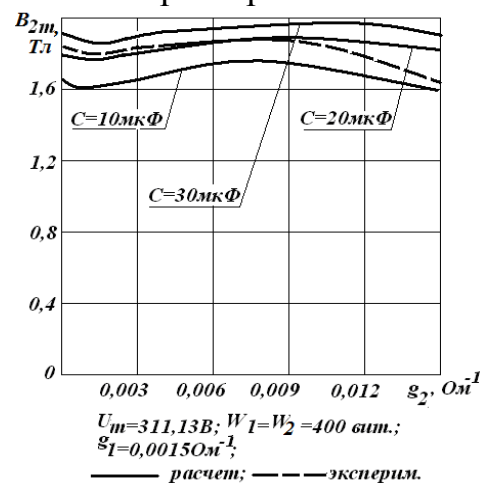


Рис. 19. Внешняя характеристика стабилизатора с магнитными связями

внешней характеристики видно, что магнитные связи позволили реализовать одно из положительных свойств этой характеристики – это участок ее подъема при увеличении нагрузки стабилизатора улучшая тем самым качество стабилизации напряжения на постоянном токе.

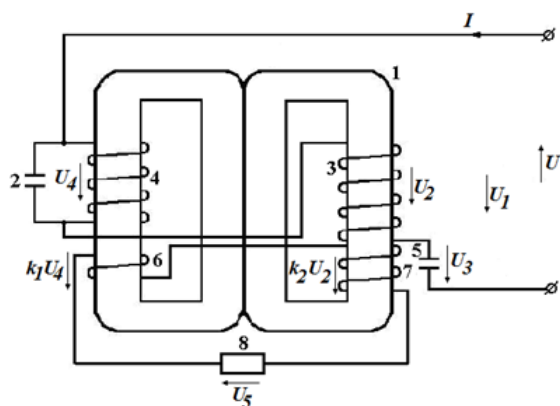


Рис.20. Стабилизатор с параметрической защитой от коротких замыканий

параметры параллельного контура и управляя тем самым моментом возбуждения в нем колебаний, можно ограничить токи при перегрузке или коротких замыканиях до 1,2 – 1,4 от номинального значения.

Рассмотрены также двухконтурные стабилизаторы с магнитными связями с трехфазным питанием. Для изучения свойств параметрического стабилизатора с магнитными связями проводилось его компьютерное моделирование с применением пакета SIMULINK программы MATLAB.

Компьютерная модель цепи по рис. 18 показана на рис. 21, она реализована на основании подсистемы по рис. 14. Магнитные связи реализованы с применением блоков взаимной индуктивности (Mutual Inductance).

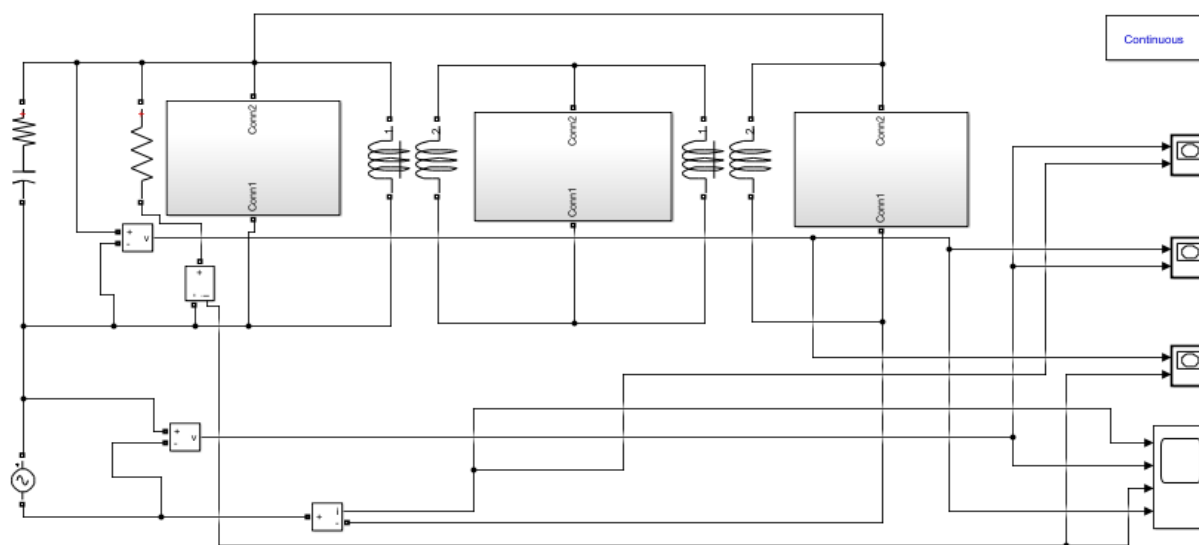


Рис. 21. Компьютерная модель стабилизатора с магнитными связями

Характер изменения кривых нагрузочной характеристики стабилизатора (рис.22), полученная из компьютерной модели для схемы с магнитными связями подтверждает адекватность компьютерной модели.

Как видно из этого рисунка, внешняя характеристика имеет участок подъема, что позволяет использовать его для компенсации падения напряжения на диодах в стабилизаторах с выходом на постоянном токе.

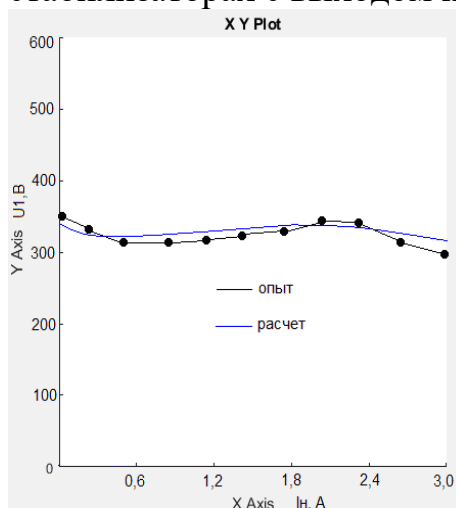


Рис. 22. Нагрузочная характеристика ИВЭП с магнитными связями

На рис. 23 показана компьютерная модель стабилизатора с магнитными связями и параметрической защитой от токов короткого замыкания по рис. 20, а на рис. 24 – внешняя характеристика этого стабилизатора. Из характеристики видно, что данная модель подтверждает возможность реализации параметрической токовой защиты с помощью данной схемы. Подтверждаются также эффекты стабилизации выходного напряжения при изменении входного напряжения и нагрузочного тока, а также эффект параметрической защиты.

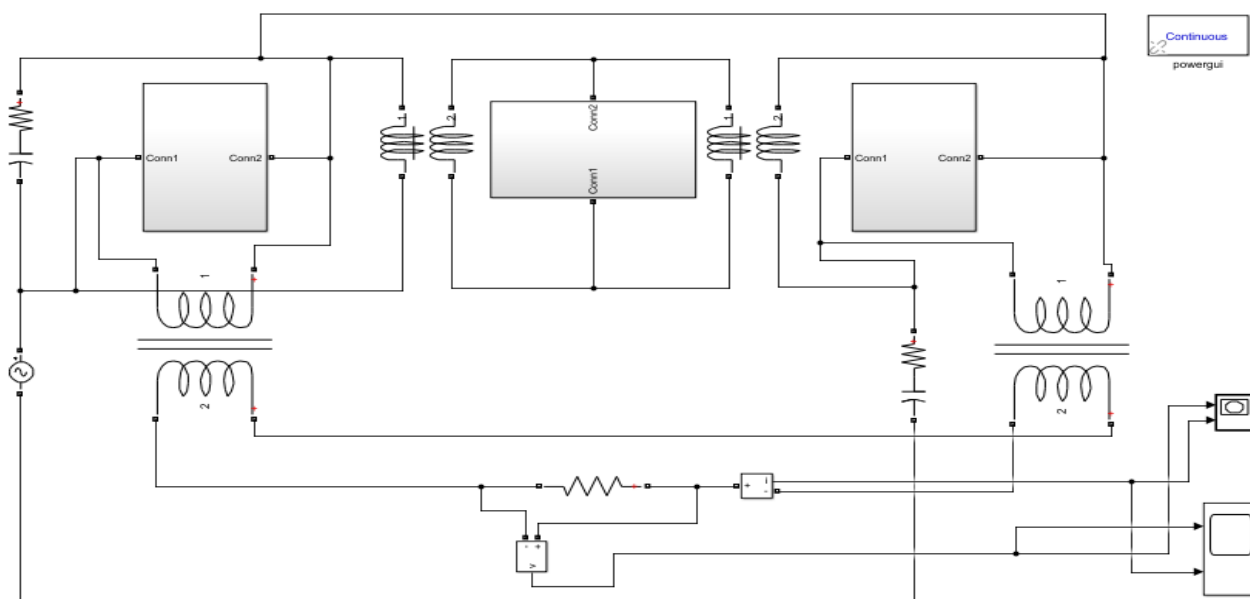


Рис. 23. Компьютерная модель стабилизатора с магнитными связями и параметрической токовой защитой.

Таким образом, приведенные выражения для вольтамперных, нагрузочных и регулировочных характеристик для обобщенной схемы с магнитными связями позволяют исследовать свойства уже известных схем стабилизаторов и синтезировать новые схемы, а компьютерные модели доказывают возможность получения в них новых положительных технических эффектов.

Для преобразования выходного напряжения стабилизатора в стандартный сигнал напряжения с целью его передачи в систему регулирования или управления разработано новое компенсирующее устройство с датчиками Холла, схема которого показана на рис.25.

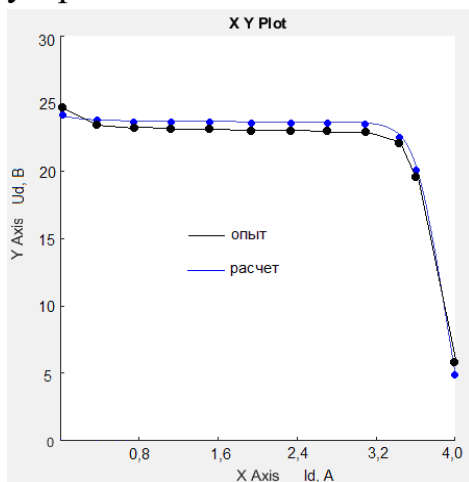


Рис.24. Внешняя характеристика стабилизатора с магнитными связями и параметрической токовой защитой

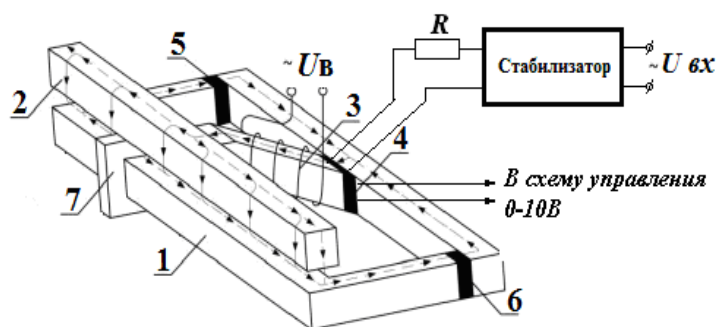


Рис.25. Конструктивная схема разработанного компенсирующего устройства: 1 и 2 – магнитопроводы; 3 – обмотка возбуждения; 4, 5 и 6 –элементы Холла; 7 – подвижный электромагнитный экран, R – токоограничивающий резистор

Отличительными особенностями нового компенсирующего устройства являются то, что в нем удалось устранить нерабочие воздушные зазоры между основным магнитным стержнем и боковыми частями удлиненного ферромагнитного стержня и добиться повышенной точности, чувствительности и линейности статической характеристики.

В пятой главе «Динамические режимы, элементы устойчивости, минимизация объема сердечника и инженерный расчет феррорезонансных источников вторичного электропитания» рассматриваются методы компьютерного расчета переходных процессов в многоконтурных феррорезонансных цепях стабилизаторов без магнитных связей и с магнитными связями, а также вопросы устойчивости, уменьшения веса и объема сердечников и инженерного расчета устройств.

Расчет переходных процессов в цепи без магнитных связей проводился численным методом Рунге-Кутты четвертого порядка для цепи по рис. 11. и для цепи с магнитными связями по рис.18. Системы дифференциальных уравнений для этих цепей приводилась соответственно к виду

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{db_1}{dt} = \frac{u - A_1 F}{B_1} \\ \frac{dF}{dt} = \frac{i - C_1 b_2^9 - D_1 F}{E} \\ \frac{db_2}{dt} = F \end{array} \right. , \quad (28)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{db_1}{dt} = \frac{U_m \sin(\omega t + \psi_u) - A_1 F}{B_1} \\ \frac{dF}{dt} = \frac{b_1^9 D_2 - b_2^9 K + \frac{U_m \sin(\omega t + \psi_u) - A_1 F}{B_1} L - F M_1}{N_1} \\ \frac{db_2}{dt} = F \end{array} \right. , \quad (29)$$

где $A_1 = W_2 S_2$; $B_1 = W_1 S_1$; $C_1 = \frac{kL_2}{W_2}$; $D_1 = W_2 g_2 S_2$; $D_2 = I + W_1/W_2$; $E = W_2 C_2 S_2$;

$$K = \frac{L_2}{L_1} + \frac{W_1 L_2}{W_2 L_1}; \quad L = \frac{W_1 W_2 g_1 S_1 + W_1^2 g_1 s_1}{k L_1}; \quad M_1 = \frac{W_2^2 g_2 S_2 + W_1 W_2 g_2 S_2}{k * L_1}; \quad N_1 = \frac{W_2^2 C S_2 + W_1 W_2 C S_2}{k L_1}$$

$$\frac{db_2}{dt} = F; \quad \frac{d_2 b_2}{dt^2} = \frac{dF}{dt}.$$

Переходные процессы рассчитывались для трех режимов: включение цепи на холостой ход, включение цепи на нагрузку и наброс нагрузки. При самых неблагоприятных условиях переходные процессы закачивались за два периода основной частоты, что свидетельствует о хороших динамических свойствах цепи.

Для более строгой оценки динамических свойств цепи по рис. 18 проводилось ее исследование с использованием элементов теории устойчивости. Для этого выражение (29) преобразовывалось к следующему виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{db_1}{dt} = A_2 U_m \sin(\omega t + \psi_u) - A_3 \frac{db_2}{dt} \\ \frac{d_2 b_2}{dt^2} = D_3 b_1^9 - D_4 b_2^9 + D_5 U_m \sin(\omega t + \psi_u) - D_6 \frac{db_2}{dt} \end{array} \right. , \quad (30)$$

где $A_2 = \frac{1}{B_1}$; $A_3 = \frac{A}{B_1}$; $D_3 = \frac{D_2}{N_1}$; $D_4 = \frac{K}{N_1}$; $D_5 = \frac{L}{B_1 N_1}$; $D_6 = \frac{A_1 L}{B_1 N_1} - \frac{M_1}{N_1}$.

Преобразуя выражение (30) по методу медленно меняющихся амплитуд и считая, что неизвестные b_1 , b_2 могут быть представлены как $b_1 = x \sin \omega t + y \cos \omega t$; $b_2 = m \sin \omega t + n \cos \omega t$ (где x , y , m , n – медленно меняющиеся во времени амплитуды искомым колебаний), после преобразований получено следующее характеристическое уравнение: $p^2 - p(\alpha + \delta) - \alpha\delta - \gamma\beta = 0$, (31). В соответствии с критерием Гурвица, для затухания приращений медленно меняющихся амплитуд Δm и Δn необходимо, чтобы выполнялись следующие условия: $-(\alpha + \delta) > 0$; $(\alpha\delta - \gamma\beta) > 0$. График зависимости $\alpha = \sqrt{-\gamma\beta}$ показан на рис. 26.

В работе проводилась минимизация сердечника, в качестве главного критерия минимизации был выбран минимальный объем электромагнитного элемента, а задача свелась к отысканию минимума целевой функции объема при наличии набора режимных ограничений.

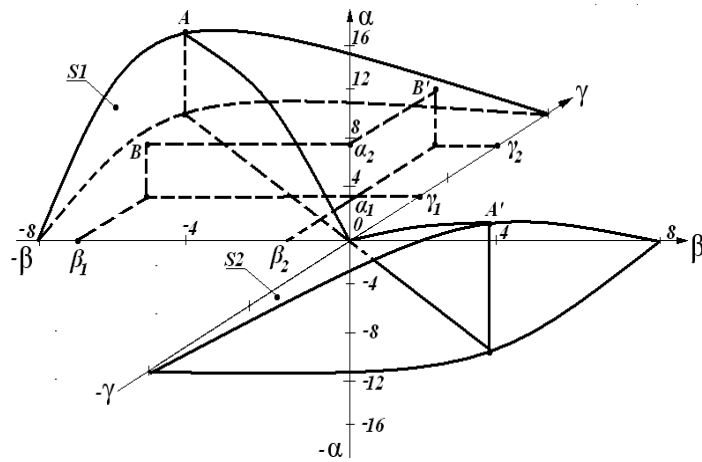


Рис.26. Поверхность раздела устойчивой и неустойчивой работы

При этом считалось, что устройства охлаждаются естественным образом, а в качестве ограничений выступают передаваемая электромагнитная мощность, перегрев и плотность тока. График выражение зависимости объема магнитопровода от плотности тока $V_M=f(J)$

$$V_M = \left(\frac{13\Delta T A}{P_o \left(\frac{f}{f^*}\right)^\varepsilon \left(\frac{B_{2m}}{B_{m^*}}\right)^\eta + 2J^2 \rho K_m K_t K_d} \right)^3, \quad (32)$$

где J – плотность тока в обмотках; ρ – удельное сопротивление материала обмоток; K_m – коэффициент заполнения стали; K_t – коэффициент увеличения сопротивления материала обмотки вследствие увеличения его температуры; K_d – добавочный коэффициент, значение которого равно 2, при допустимом перегреве $\Delta T=50^\circ\text{C}$ и $\Delta T=70^\circ\text{C}$ и при использовании магнитопроводов из стали Э360 (3424) показан на рис. 27.

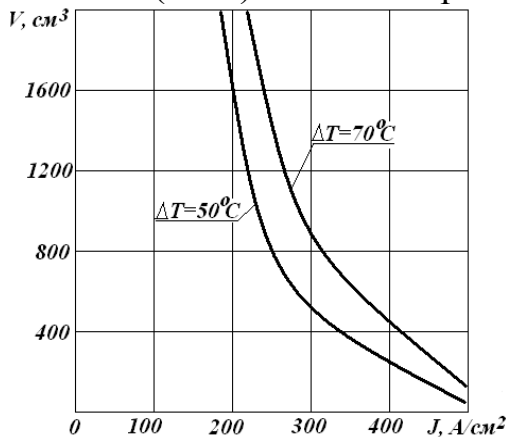


Рис.27. Графики зависимости объема магнитопровода от плотности тока при допустимых перегревах

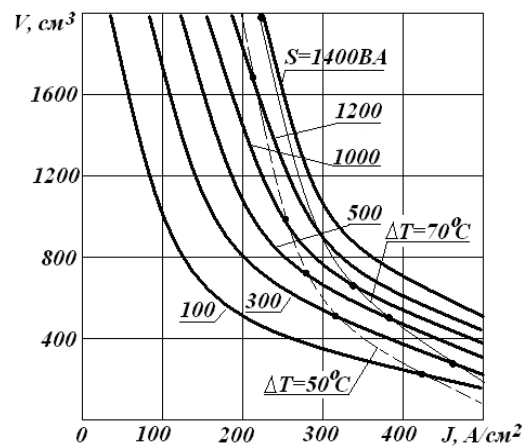


Рис.28. Графики зависимости объема магнитопровода от плотности тока и электромагнитной мощности

Из графиков видно, что с ростом объема магнитопровода ИВЭП плотность тока должна снижаться, причем в большей степени эта зависимость выражена для больших значений перегрева.

После преобразования выражения объема магнитопровода через электромагнитную мощность и преобразований получим выражение для целевой оптимизационной функции с ограничениями, которая связывает между собой электрические, магнитные и тепловые параметры. График целевой функции показан на рис. 28.

$$V_M = \left(\frac{S}{\pi f K_{об} k B_{2m}^{10}} \right)^{\frac{2}{3}} \left[\frac{13 \Delta T A}{P_o \left(\frac{f}{f^*} \right)^\alpha \left(\frac{B_{2m}}{B_{m^*}} \right)^\beta + 2 J^2 \rho K_m K_d K_t} \right], \quad (33)$$

где $K_{об}$ – обмоточный коэффициент, учитывающий заполнение окна магнитопровода обмоткой. Совместное решение выражения (32) и (33) для перегревов (штриховые линии) и электромагнитной мощности (сплошные линии) в точках пресечения дает плотности тока и мощности, при которых соблюдается тепловое равновесие при минимальном объеме электромагнитного элемента. Исследование динамических режимов и устойчивости позволило сделать вывод о пригодности исследованных схем для стабилизации напряжения, а найденная целевая функция объема положена в основу инженерного расчета оптимального ИВЭП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований по анализу, и моделированию параметрических источников электропитания феррорезонансной природы представлено следующее заключение:

1. Разработана обобщенная классификация параметрических источников питания на основе конфигурации базовых звеньев и способов реализации магнитных связей, позволяющая наметить пути схемотехнической и режимной оптимизации старых и вновь разрабатываемых схем.

2. Разработана методика оценки точности анализа стабилизаторов при использовании различных аппроксимирующих функций, нелинейности активных потерь в катушках, индуктивности рассеяния, собственной емкости обмоток и неполного учета гармонических составляющих, что позволяет определить предельные ошибки расчета для каждого из упрощающих допущений.

3. Разработаны обобщенные математические модели многоконтурных источников питания без магнитных связей и с магнитными связями между контурами, дающие возможность общего анализа феррорезонансных стабилизирующих цепей параметрической природы.

4. Созданы новые схемы многоконтурных стабилизаторов, а также разработаны их компьютерные модели, подтверждающие возможность достижения необходимых положительных технических эффектов.

5. Разработано новое компенсирующее устройство для преобразования выходного напряжения стабилизатора в стандартный сигнал, имеющее высокую точность и чувствительность, а также линейности статической характеристики.

6. Предложена методика минимизации весогабаритных показателей многоконтурных стабилизаторов, позволяющая проектировать оптимальные источники вторичного электропитания.

7. Разработаны методики инженерного расчета многоконтурных стабилизаторов, дающие возможность инженерного расчета феррорезонансных стабилизирующих устройств параметрической природы.

8. Разработанное устройство «Стабилизированный преобразователь числа фаз» внедрено на тяговой подстанции «Чукурсай» дистанции электроснабжения «Ташкент» АО «Ўзбекистон темир йўллари» в качестве источника питания для настройки устройств релейной защиты и автоматики с экономическим эффектом 149 млн. сум.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.T.03.03 ON THE
ADMISSION OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE
TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

BEDRITSKIY IVAN MIKHAILOVICH

**PARAMETRIC SOURCES OF SECONDARY POWER SUPPLY OF
FERRO-RESONANT NATURE: ANALYSIS AND MODELING**

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

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

Tashkent - 2021

The theme of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan in number B2021.1 Dsc /T419.

The dissertation has been prepared at Tashkent State Transport University.

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

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

Official opponents: **Ibodullaev Mukhtar Idodullaevich**
Doctor of technical sciences, professor

Kolesnikov Igor Konstantinovich
Doctor of technical sciences, professor

Plakhtiev Anatoliy Michaylovich
Doctor of technical sciences, professor

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

Defense of dissertation will take place in « 15 » 12 2021 at 10:00 o'clock at a meeting of the scientific council DSc.03/30.12.2019.T.03.03 at the Tashkent state technical university. (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

The doctoral dissertation could be reviewed at the Information-resource center of Tashkent State Technical University (registration number 230). (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 246-03-41.)

Abstract of dissertation sent out on « 02 » 12 2021 year.
(mailing report № 7 on « 12 » 12 2021 year).



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

O.F. Ishnazarov
Scientific Secretary of Scientific Council
on awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor, academician

T.Sh. Goyibov
Chairman of the Academic Seminar
under the Scientific Council on awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of DSc dissertation)

The aim of the study is to solve the problems of improving the quality and reliability of voltage stabilization using parametric stabilizers.

Tasks of their search:

creation of a reliable classification of parametric power supplies without magnetic couplings and with magnetic couplings between ferromagnetic elements based on the configurations of the base links;

estimation of the errors of approximation of the magnetization curves of the steel of the core when using various approximating functions;

estimation of the introduced errors from the nonlinearity of active losses, the disregard of the leakage induction, the disregard of the self-capacity of the windings and the disregard of all the harmonic components of the solution;

creation of a generalizing mathematical model of multi-circuit power supplies without magnetic connections between the circuits;

creation of a generalizing mathematical model of multi-circuit parametric sources with magnetic connections between the circuits;

synthesis of new stabilizer circuits based on the use of multi-circuit circuits without magnetic couplings and with magnetic couplings between ferromagnetic circuits;

investigation of the stability of multi-circuit stabilizer circuits;

investigation of the operation of multi-loop stabilizers in dynamic mode;

circuit optimization, optimization of modes and weight and size indicators of multi-loop stabilizers;

creation of a methodology for engineering calculation of multi-loop stabilizers.

The object of research is multi-circuit voltage stabilizers without magnetic couplings and with magnetic couplings between ferromagnetic circuits.

The scientific novelty of the work is as follows:

in the creation of a classification of parametric power supplies based on the configurations of the base links and methods of organizing magnetic connections between the circuits;

an objective assessment of the accuracy of calculating stabilizers using various approximating functions, nonlinearity of active losses, leakage induction, self-capacitance of the windings and incomplete consideration of the harmonic components of the solution;

in the development of generalizing mathematical models of multi-circuit parametric power supplies without magnetic connections between the circuits and with magnetic connections between the circuits;

in the synthesis of new stabilizer circuits based on the use of multi-circuit circuits without magnetic couplings and with magnetic couplings between ferromagnetic circuits;

in the creation of computer models of multi-loop stabilizers, the study of their stability and dynamic modes;

in optimization of weight and size indicators of multi-loop stabilizers;

in the development of methods for calculating multi-loop stabilizers.

Implementation of research results. The developed device «Stabilized phase converter» was introduced at the traction substation «Chukursay» of the distance of power supply «Tashkent» of JSC «Uzbekiston Temir Yullari» as a power source for setting up relay protection and automation devices.

The structure and volume of the research work. The structure of the dissertation consists of introduction, five chapters, conclusion, list of used literature and applications. The volume of the dissertation is 200 pages and a list of published works.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Бедрицкий И.М. Параметрические источники вторичного электропитания с ферромагнитными элементами (монография). Ташкент.: «Нашриёт», 2020 г.–162 с.
2. Патент РУз UZ IAP 06464(G01 R 17106 (2006.01) Компенсирующее устройство//авторы: Амиров С.Ф., Болтаев О.Т., Бедрицкий И.М., Файзуллаев Д.С. Жураева К.К.// 30.04.2021. Бюлл. №4.
3. А.с. 1705897 СССР (МКИ G05f 3/06). Стабилизированный трансформатор// Халилов Н.А., Бедрицкий И.М.// БИ №2, 1992. –с.24-30.
4. А.с. 1791861 СССР (МКИ G05f 3/06). Стабилизированный трансформатор// Халилов Н.А., Бедрицкий И.М.БИ №4, 1993.– с.46-51
5. Халилов Н.А., Бедрицкий И.М. Амплитудные соотношения в индуктивном элементе управляемого феррорезонансного контура. – Известия ВУЗов РУз, технические науки, №4, 2002 г., с. 10-13.
6. Халилов Н.А., Бедрицкий И.М., Кашкаров А.А. Феррорезонансные стабилизаторы с параметрической компенсацией шунтирующего действия нагрузки. – Известия ВУЗов РУз, технические науки, №4, 2002 г., с. 17-21.
7. Бедрицкий И.М., Халилов Н.А. К вопросу об аппроксимации кривых намагничивания электротехнических сталей. – Известия ВУЗов РУз, технические науки, №4, 2002 г., с. 33-36.
8. Bedritskiy I.M. Comparative analysis of analytical expressions for approximating the magnetization curves of electrical steels.– Proceedings of higher educational institutions. Electro mechanics. 2011. №6.С.39-42, (05.00.00; № 21)
9. Bedritskiy I.M., Juraeva K.K., Bazarov L.H., Saidvaliev S.S. Using of the parametric nonlinear LC-circuits in stabilized converters of the number of phases.– Jour of Adv Research in Dynamical & Control Systems, Vol. 12, Issue-06, 2020, s.98-107(Scopus, IF 0,31)
10. Bedritskiy I.M., Juraeva K.K., Bazarov L.H. Using of parametric nonlinear LC-circuits in stabilized transducers of the number of phase. Chemical technology control and management.2020, №2 (92)., s.42-48, (05.00.00; № 12).
11. Бедрицкий И.М., Жураева К.К. Погрешности расчетов ферромагнитных элементов стабилизаторов напряжения и тока параметрической природы.– Мухаммад ал Хоразмий авлодлари. Илмий - амалий ва ахборот -таҳлилий журнал №1(11), 2020 г., с.90-94, (05.00.00; № 10).
12. Бедрицкий И.М., Жураева К.К. Оценка погрешности расчета ферромагнитных элементов, используемых в параметрических стабилизаторах транспортных средств.– Транспорт, наука, техника и управление. Научно-информационный сборник. №6, 2020 г., с. 48-52, (05.00.00;№ 82)

13. Halilov N.A, Bedritskiy I.M. To a question on approximation of curves of magnetization of electro technical steels. // Engineering in Life Sciences. 2002. № 4, s. 33-36(Scopus, IF 2,46)

II бўлим (часть II; part II)

14. S.F.Amirov, I.M.Bedritskiy, L.Kh. Bazarov Optimization of Electromagnetic of a Parametrical Voltage Stabilizer with Magnetic Communications between the Nonlinear Coil and a Ballast Element//. International Journal of Multidisciplinary Research and Analysis.–2021, Volume 4 Issue 5 May.– s.591-597, IF 7,97

15. Бедрицкий И.М., Жураева К.К., Базаров Л.Х. Устойчивость работы параметрического умножителя числа фаз на основной частоте// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. / 2021. -№2 (70). –С.43–51.

16. Siddikov I.Kh, Anarbaev M., Khasanov M., Bedritskiy I.M. The analysis of base characteristics and inaccuracies of electromagnetic transducers current to voltage with flat measuring windings.– «European Science Review» №8, 2015 Austria, Vienna.– s.137-139.

17. Bazarov M., Bedritskiy I.M., Boltaev O.T. Estimation of an error of calculations of ferromagnetic elements from inductance of dispersion.– «European Journal of Technical and Natural Sciences» №3, 2017 Austria, Vienna, s.47-49

18. Bedritskiy I.M., Boltaev O.T. Modeling of sensors of the Hall in software packages Simscape and Simulink.– «European Science Review» №1, 2019 Austria, Vienna., s.53-55.

19. Болтаев О.Т., Бедрицкий И.М. Ахмедова Ф.А. Компьютерная модель магнитного преобразователя линейного перемещения с подвижным экраном и распределенными параметрами.– Universum: технические науки. – № 10(79). Часть 3. М., Изд. «МЦНО», 2020. –с.59-63.

20. Бедрицкий И.М. Сравнительный анализ аналитических выражений для аппроксимации кривых намагничивания электротехнических сталей.– «Электрика», издательство ООО «Наука и технологии», г. Москва, №7, 2011 г., с.38-41.

21. Халилов Н.А., Бедрицкий И.М. Амплитудные соотношения в управляемом колебательном контуре параметрического стабилизатора напряжения. – Труды Республиканской конференции «Проблемы выработки и экономии электроэнергии», Ташкент-1992 г., с. 58-63

22. Бедрицкий И.М. Стабилизирующие цепи феррорезонансной структуры с нелинейными магнитными связями. – Тезисы докладов Международной конференции по теории и методам расчета нелинейных цепей и систем, Ташкент, 1995 г., с. 25-26

23. Халилов Н.А., Бедрицкий И.М. Обобщающие уравнения стабилизирующих однофазных цепей феррорезонансной структуры. – Тезисы докладов Международной конференции по теории и методам расчета нелинейных цепей и систем, Ташкент, 1995 г., с. 27-28

24. Халилов Н.А., Бедрицкий И.М. Феррорезонансные цепи с параметрической компенсацией шунтирующего действия нагрузки. –

Международный сборник научных трудов «Наука и новые технологии», Кыргызстан, Бишкек, №4, 2000 г., с. 60-64

25. Бедрицкий И.М., Султанов И.А. Об аппроксимации кривых намагничивания холоднокатаных электротехнических сталей.– Материалы научно-технической конференции по проблемам наземных транспортных средств, Ташкент, 2008 г., с. 44-47

26. Бедрицкий И.М., Кучерявый Д.Д. Стабилизированный трансформатор с параметрической токовой защитой.– Труды научно-технической конференции «Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» Ташкент, 2010 г., с. 54-56

27. Бедрицкий И.М. Параметрическая токовая защита в стабилизаторах напряжения феррорезонансной природы. – Труды научно-технической конференции «Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте», Ташкент, 2011 г., с. 78-81

28. Бедрицкий И.М., Ибрагимов Р.И. Топологический анализ и пути оптимизации параметрических источников вторичного электропитания с ферромагнитными индуктивными элементами.– Труды научно-технической конференции «Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте», Ташкент, 2011 г., с. 45-48

29. Бедрицкий И.М. Топологический анализ параметрических источников вторичного электропитания с индуктивными и емкостными элементами. – Международная научно-практическая конференция «Инновация -2011», г. Ташкент, Узбекистан, 2011 г., с.18-19

30. Бедрицкий И.М. Параметрический стабилизатор с магнитными связями между балластным и стабилизирующим элементами.– IV Международная научная заочная конференция «Актуальные вопросы современной техники и технологии», 23 апреля 2011 г., г. Липецк, Россия, с.77-81

31. Бедрицкий И.М. Параметрический стабилизатор постоянного напряжения на базе двухконтурной феррорезонансной цепи.– Международная научная заочная конференция «Современная техника и технологии :исследования и разработки», 23 июля 2011 г., г. Липецк, Россия, с.59-61

32. Бедрицкий И.М., Жураева К.К. Оценка погрешности расчетов ферромагнитных элементов от неучтенной индуктивности рассеяния.– Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте. Республиканская научно-техническая конференция с участием зарубежных ученых, посвященная 80-летию ТашИИТ, 2012 г., с. 130-132

33. Бедрицкий И.М. Многофункциональный стабилизированный трансформатор.– V Международная научно-техническая конференция «Энергетика и энергоэффективные технологии», 15 января 2011 г. г. Липецк, Россия, с. 12-14

34. Bedritskiy I.M., Ibragimov R. I, Voltaev O. T. Multipurpose parametrical voltage stabilizer of a direct current with the integrated magnetic system.–

«European Science and Technology»: materials of the international research and practice conference, January 31-th, Wiesbaden, Germany, 2012 г., s.177-180

35. Бедрицкий И.М. О пригодности критерия равенства потерь в обмотках и сердечнике при оптимизации объема ферромагнитных элементов стабилизированных параметрических источников питания.– IX Международная научная конференция «Актуальные вопросы современной техники и технологии», 27 октября 2012 г., г. Липецк, Россия, с. 93-96

36. Siddikov I.Kh, Khakimov M.Kh, Anarbaev M., Bedritskiy I.M. Research of the electromagnetic transducer of the primary current to secondary voltage.– «Science and Education»: materials of the II-international research and practice conference, Dezember, 18-th, Munich, Germany, 2012 y.s.222-225

37. Бедрицкий И.М., Суллийев С.Х., Раимжонов О.М. Исследование датчиков движения магнитного типа с перемещаемым магнитным экраном.– Труды научно-технической конференции «Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте», ТашИИТ, Ташкент, 2014 г.с.35-38

38. Бедрицкий И.М. Принципы моделирования магнитных компонентов в программах компьютерной симуляции.– Международная научно-практическая конференция «Инновация -2014», ТашГТУ, г. Ташкент, Узбекистан, 2014 г. с. 33-38

39. Бедрицкий И.М. Стабилизаторы постоянного тока с управляемым индуктивным элементом в феррорезонансном контуре.– XI Международная научная конференция «Актуальные вопросы современной техники и технологии», 14 апреля 2014 г., г. Липецк, Россия, с.77-81

40. Бедрицкий И.М. Компьютерное моделирование магнитных компонентов датчиков движения и тока.– Труды семинара по скоростному движению, ТашИИТ, Ташкент, 2018 г.,с.54-56 40

41. Халилов Н.А., Бедрицкий И.М. Стабилизатор напряжения постоянного тока с параметрической стабилизацией.– Сборник материалов I Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы внедрения инновационной техники и технологий. г. Фергана, 2019 г., с. 98-100.

42. Болтаев О.Т. Назирова З.Г., Бедрицкий И.М. Электромагнит экранли магнит занжирларни тадқиқ қилишда кулланиладиган Холл элементининг компьютер моделіни яратиш.– Труды конференции «Ресурсосберегающие технологии на ж/д транспорте», 2019 г., с. 263-266

43. Bedritskiy I.M., Juraeva K.K. Estimation of Errors in Calculations of Coils with Ferromagnetic Core.– 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), s.1-6 (Scopus)

44. Бедрицкий И.М., Базаров Л.Х. О пригодности критерия равенства потерь в сердечнике и обмотках для оптимизации параметрического преобразователя числа фаз.– Труды конференции «Ресурсосберегающие технологии на ж/д транспорте», Ташкент, 2020 г., с. 15-17

45. Bedritskiy I.M., Juraeva K.K., Bazarov L.H. Evaluation of the stability of the parametric phase number converter.– International Scientific Seminar. Yu.N. Rudenko, Kazan, 2020.-с.12-18 (Scopus)

46. Бедрицкий И.М., Жураева К.К., Базаров Л.Х. Устойчивость работы параметрического умножителя числа фаз на основной частоте.– XI международная научно-практическая конференция «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». 2021 г., с. 8-10

47. Бедрицкий И.М. Анализ критериев получения максимально простых выражений и достижение минимальной погрешности вычислений при исследовании устройств с ферромагнитными элементами.– Сборник научных статей «Энергетическая безопасность» III Международного конгресса: Курск.– 2020.– Том 2.,с. 357-362

48. Bedritskiy I.M., Juraeva K.K., Nazirova Z.G., Bazarov L.H. Amplitude and phase relations in a two-circuit parametric circuit of Ferro resonance nature.– «Construction, Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering» (CONMECHYDRO 2021), Tashkent, с. 8-11(Scopus)

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

Қоғоз бичими 84×60-1/16. Ризограф босма усули. Times гарнитураси
Шартли босма табағи: 4 б.т. Адади: 100 нусха.
Буюртма № 43-14/2021 Нашрга рухсат этилди: 02.12.2021 й.

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