

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ**  
**ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ**  
**PhD.15/30.12.2019.Т.73.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ФАЙЗУЛЛАЕВ ЖОВҲАРБЕК СУЛТОН ЎҒЛИ**

**ЭЛЕКТРОВАЗЛАР ТОРТУВЧИ АСИНХРОН МОТОРЛАРИНИ**  
**ФУНКЦИОНАЛ ДИАГНОСТИКА УСУЛЛАРИ ВА ТЕХНИК**  
**ВОСИТАЛАРИНИ ТАКОМИЛЛАШТИРИШ**

**05.08.05 – Темир йўлларининг ҳаракатланувчи таркиби, поездларни**  
**тортиш ва электрлаштириш**

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

**Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD)  
диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)  
по техническим наукам**

**Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD) on  
technical sciences**

**Файзуллаев Жовхарбек Султон ўғли**

Электровозлар тортувчи асинхрон моторларини функционал диагностика  
усуллари ва техник воситаларини такомиллаштириш..... 3

**Файзуллаев Жовхарбек Султон угли**

Совершенствование методов и технических средств функциональной  
диагностики тяговых асинхронных двигателей электровозов..... 21

**Fayzullaev Jovkharbek Sulton ugli**

Improving methods and measuring tools for functional diagnostics of electric  
equipment of electric locomotives..... 39

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ

List of published works..... 42

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ**  
**ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ**  
**PhD.15/30.12.2019.Т.73.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТРАНСПОРТ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ФАЙЗУЛЛАЕВ ЖОВҲАРБЕК СУЛТОН ЎҒЛИ**

**ЭЛЕКТРОВАЗЛАР ТОРТУВЧИ АСИНХРОН МОТОРЛАРИНИ**  
**ФУНКЦИОНАЛ ДИАГНОСТИКА УСУЛЛАРИ ВА ТЕХНИК**  
**ВОСИТАЛАРИНИ ТАКОМИЛЛАШТИРИШ**

**05.08.05 – Темир йўлларининг ҳаракатланувчи таркиби, поездларни**  
**тортиш ва электрлаштириш**

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

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси қошидаги Олий аттестация комиссиясида № В2020.3.PhD/Т1475. рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент давлат транспорт университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (<http://tstu.uz>) ва "ZiyoNet" Ахборот таълим порталида ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) жойлаштирилган.

**Илмий раҳбар:**

**Халиков Абдулхак Абдулхайрович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Расмий оппонентлар:**

**Пирматов Нурали Бердиярович**  
техника фанлари доктори, профессор

**Валиев Мухаммад Шералиевич**  
техника фанлари номзоди, доцент

**Етакчи ташкилот:**

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

Диссертация химояси Тошкент давлат транспорт университети хузуридаги PhD, 28.06.2018 Т.73.01 рақамли Илмий кенгашининг 2020 йил «17» 10 соат 10<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади. Манзил: 100167, Тошкент ш., Темирийўлчилар кўчаси, 1-уй. Тел.: (99871) 299-00-01; факс: (99871) 293-57-54; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz).

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси билан Тошкент давлат транспорт университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (013 рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100167, Тошкент ш., Темирийўлчилар кўчаси, 1-уй. Тел.: (99871) 299-00-01; 293-57-54.

Диссертация автореферати 2020 йил «09» 10 да тарқатилди.  
(2020 йил «09» 10 даги №014 рақамли реестр баённомаси).



**А.И. Азизходжаев**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш раиси, т.ф.д., профессор

**Я.О. Рузметов**  
Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш илмий котиби, т.ф.н., доцент

**Ш.С. Файзибаев**  
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш  
қошидаги илмий семинар раиси,  
т.ф.д., профессор

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

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳонда сўнгги йилларда халқ хўжалигининг турли тармоқларида, шу жумладан темир йўл транспортида бошқа электротехник, электромеханик ва электроэнергетик қурилмалар билан бир қаторда асинхрон моторлардан ҳам кенг қўламда фойдаланилмоқда. Хусусан, “Ўзбекистон темир йўллари” акциядорлик жамиятига қарашли электрлашган темир йўлларда ҳаракатланаётган 49 та ўзгарувчан ток электровозларида жами 294 та тортувчи асинхрон моторлар ишлатилмоқда. Чет эл ва мамлакатимиз тажрибаси шуни кўрсатадики, тортувчи асинхрон моторларни диагностикалаш тизимлари ва улардаги ўлчаш техник воситаларининг такомиллашмаганлигидан ҳар йили моторларнинг 20 ÷ 25 % и муддатидан аввал ишдан чиқмоқда. Шунинг учун ҳам дунёнинг ривожланган мамлакатларида, жумладан АҚШ, Буюк Британия, Франция, Испания, Германия, Япония, Жанубий Корея, Хитой, Россия Федерацияси ва бошқа давлатларда тортувчи асинхрон моторлар ишлаш самарадорлигини оширишнинг муҳим омилларидан бири бўлган функционал диагностика тизимларини жорий этиш ва уларни такомиллаштиришга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда йирик электротехник ва электроэнергетик ишлаб чиқариш объектларининг электр жиҳозлари ва ускуналари техник ҳолатини узлуксиз назорат қилиш ва баҳолаш мақсадида кенг қўлланилаётган электр, иссиқлик, виброакустик, магнит ва оптик ҳодисаларга асосланган функционал диагностика усуллари ҳамда техник воситалари асосида қурилган диагностика тизимлари ишончлилигини ошириш, уларнинг функционал имкониятларини кенгайтириш ва таннархини пасайтиришга қаратилган илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда. Бу борада, жумладан электровозлар тортувчи асинхрон моторларининг тўла қонли математик-диагностик моделларини яратиш, диагностика учун етарли даражада маълумот бера оладиган, ўлчаш учун имконият ва қулай шароит мавжуд бўлган ва турли хил ташқи ҳалақитларга инвариант бўлган диагностик параметрларни танлаш ҳамда бир нечта функционал диагностика усуллари билан биргаликда фойдаланиш тартибларини ишлаб чиқишга катта аҳамият берилмоқда. Шу билан бирга электровозлар тортувчи асинхрон моторлари функционал диагностика усуллари ва уларда фойдаланиладиган техник воситаларни такомиллаштириш зарур ҳисобланмоқда.

Республикида турли транспорт соҳаларини ривожлантириш, жумладан темир йўл транспорти инфратузилмасини ривожлантириш, юқори тезликда ҳаракатланувчи таркиб участкаларини кенгайтириш, мавжуд темир йўл ҳудудларини электрлаштириш чора-тадбирлари амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «... миллий иқтисодиётнинг рақобатбардошлигини ошириш, ... транспорт-коммуникация ва социал-инфратузилмавий лойиҳаларни ечишга йўналтирилган фаол инвестицион сиёсат, ... ишлаб чиқаришни техник ва технологик янгилаш, ... ишлаб

чиқаришга энергия тежовчи технологияларни кенг тадбиқ этиш»<sup>1</sup> вазифалари белгилаб берилган. Ушбу вазифани амалга ошириш, жумладан тортувчи асинхрон моторлар функционал диагностика усуллари ва техник воситаларини такомиллаштириш, муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси «Темир йўл транспорти тўғрисида»ги Қонуни (1999), Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 23 августдаги ПҚ-3238-сон «Замонавий энергия самарадор ва энергия тежайдиган технологияларни яна жорий этиш чора-тадбирлари тўғрисидаги»ги Қарори 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 технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурстежамкорлик» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Тортувчи асинхрон моторлар функционал диагностика усуллари ва техник воситаларини такомиллаштириш бўйича долзарб масалаларни бажаришга қаратилган илмий тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи илмий марказларида ва олий таълим муассасаларида, жумладан University of Michigan and General Electric, Bergen Laboratories Ins. (АҚШ), Technical University of Ilmenau and Siemens, Siemens and Halke (Германия), Davy and United Instruments (Буюк Британия), Sony and Tokyo technology institute, Toshiba (Япония), ASEA (Швеция), Kelk Electronics (Канада), Миллий тадқиқот университети (МЭИ), Уфа давлат авиация техника университети, (Россия), Киев автоматика институти (Украина) ва Тошкент давлат транспорт университети (Ўзбекистон)да олиб борилмоқда.

P. Bechard, S. Narsha, , William T. Tomson, L. Alexandre, , P. Kankar, S. Jang, A. Stavrou, R. Ong, A. Lotze, P. Kauert, C. Enke, L. Walther, T. Barthon, И.Х. Хайруллин, Ф.Р. Исмагилов, К.К. Ким, А.А. Зарифьян, М.А. Гашимов, Д.Ю. Пашали, О.А. Бойкова, З.Г. Гиоев, А.Д. Глущенко, М.Д. Глущенко, В.И. Киселев, В.Н. Жидков, О.Р. Хамидов, А.С. Мазнев, А.В. Грищенко, В.Г. Тонких, М.Ш. Валиев, Н.Е. Конюхов, М.Ф. Зарипов, Н.М. Усмонхўжаев, Н.Б. Пирматов ва бошқалар тортувчи асинхрон моторлар функционал диагностика усуллари ва техник воситаларини такомиллаштириш илмий муаммоларининг ечимига ўз ҳиссаларини қўшганлар. Ушбу олимларнинг саъй-ҳаракатлари билан функционал диагностика тизимлари ва унда қўлланиладиган техник воситаларни лойиҳалаш ва ҳисоблашнинг назарий асослари ишлаб чиқилди ва ривожлантирилди, мазкур тизимлар ва улардаги техник воситаларнинг такомиллашган конструкциялари ва схемаларига оид ечимлар таклиф қилинди ва ишлаб чиқаришга жорий этилди. Бироқ тортувчи

---

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

асинхрон моторларнинг тўла қонли математик-диагностик моделларини ишлаб чиқиш ҳисобига функционал диагностика усулларини такомиллаштириш, сезгирлиги ва аниқлиги юқори ҳамда чизикли статик характеристикага эга бўлган янги ўлчаш техник воситаларини яратишга алоҳида эътибор қаратилмаган.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат транспорт университети илмий-тадқиқот ишлари режасининг 3-сон «Электрлашган темир йўллар тортувчи подстанциялари ва контакт тармоғи электр жиҳозларининг техник ҳолатини диагностикалаш воситаларини такомиллаштириш» (2018-2020) мавзусидаги лойиҳа доирасида бажарилган.

**Диссертация ишининг мақсади** электровозлар тортувчи асинхрон моторлари функционал диагностика усуллари ва техник воситаларини такомиллаштириш орқали улардан фойдаланиш самарадорлигини оширишдан иборат.

**Диссертация тадқиқотининг вазифалари** қуйидагилардан иборат:

электровозлар тортувчи асинхрон моторлар замонавий функционал диагностика усуллари ва техник воситаларини қиёсий таҳлил этиш;

электровозлар тортувчи асинхрон моторлари диагностик параметрларини танлаш ва ўлчаш кетма-кетлигини асослаш;

электровозлар тортувчи асинхрон моторлари функционал диагностика техник воситаларини такомиллаштириш;

электровозлар тортувчи асинхрон моторлари математик-диагностик моделларини ишлаб чиқиш;

электровозлар тортувчи асинхрон моторлари функционал диагностикаси янги техник воситаларининг математик моделларини ишлаб чиқиш;

тортувчи асинхрон моторлар функционал диагностика тизимлари ва техник воситаларининг асосий техник характеристикаларини тадқиқ этиш.

**Тадқиқот объекти** сифатида тортувчи асинхрон моторларни функционал диагностика тизимлари ва уларнинг техник воситалари олинган.

**Тадқиқот предмети** тортувчи асинхрон моторларнинг такомиллашган функционал диагностика усуллари ва техник воситаларини ишлаб чиқиш ҳамда уларнинг асосий характеристикаларини ўрганиш ташкил этади.

**Тадқиқот усуллари.** Тадқиқот жараёнида тарқоқ параметрларга эга электр ва магнит занжирлари назарияси, муҳандислик ижодиёт усуллари, турли физик табиатли занжирларнинг энергия-информацион моделлари ва параметрик структура схемалар усули ҳамда хатоликлар назариясидан фойдаланилган. Назарий ҳисоблаш ишлари компьютер техникаси ёрдамида бажарилган, шунингдек тадқиқотнинг экспериментал усуллари қўлланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

электровозлар тортувчи асинхрон моторларининг диагностик параметрларини танлаш ва ўлчаш кетма-кетлиги ишлаб чиқилган;

электровозлар тортувчи асинхрон моторлари функционал диагностика тизимлари учун сезгирлиги ва аниқлиги юқори ҳамда чизикли статик характеристикага эга бўлган янги ўлчаш техник воситалари яратилган;

электровозлар тортувчи асинхрон моторларининг математик-диагностик моделлари статор ва ротор чулғамлари ҳамда магнит ўтказгичнинг ўзаро ва атроф-муҳит билан таъсирларини инобатга олган ҳолда ишлаб чиқилган;

тортувчи асинхрон моторлар функционал диагностика тизими янги техник воситаларининг математик моделлари улардаги параметрлар тарқоқлиги ва магнитланиш эгри чизиғининг нозизиқлигини инобатга олган ҳолда ишлаб чиқилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижаси** қуйидагилардан иборат:

тортувчи асинхрон моторларни функционал диагностикалаш жараёнини компьютерда идентификациялаш мақсадида уларнинг боғланишлар матрицалари ва диагностика техник воситаларини танлаш функцияларининг мантиқий реализациялари ишлаб чиқилган;

тортувчи асинхрон моторларни функционал диагностика жараёнини автоматлаштириш мақсадида уларнинг нормал ишлаётган ва носоз блокларини функционал диагностикалаш алгоритми ишлаб чиқилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги.** Асосий қонунлар, назариялар ва занжир ҳамда тизимларни ҳисоблаш усулларининг тўғри қўлланилиши, шунингдек назарий ва экспериментал натижаларнинг ўзаро мос келиши билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти тортувчи асинхрон моторлар функционал диагностика тизими янги техник воситаларининг математик моделлари улардаги электр ва магнит занжирлари параметрларининг тарқоқлиги ва ферромагнит материал магнитланиш эгри чизиғининг нозизиқлигини инобатга олган ҳолда ишлаб чиқилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти тортувчи асинхрон моторлар техник ҳолатини баҳолаш учун ишлаб чиқилган функционал диагностика қурилмаси юқори ишончликка, унинг яратилган ўлчаш техник воситалари эса юқори сезгирлик ва аниқликка ҳамда чизикли статик характеристикага эгаллиги, ишлаб чиқилган математик моделлар функционал диагностика усуллари ишончлигини ошириш ва функционал диагностика тизимлари ҳамда улар техник воситаларини назарий тадқиқ этиш имконини бериши билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Электровозлар тортувчи асинхрон моторлари функционал диагностика усуллари ва техник воситаларини такомиллаштириш асосида:

магнитоэластик куч датчиги қурилмасига Ўзбекистон Республикаси Интеллектуал мулк агентлигининг ихтирога патенти олинган (№IAP 04866, 2014 й.). Натижада сезгирлиги, аниқлиги ва статик характеристикасининг чизиклилиги нисбатан юқори бўлган тортувчи асинхрон мотор вибрация параметрларини электр сигналга ўзгартириб берадиган қурилмани яратиш имконини берган;



ишлаб чиқилган функционал диагностика қурилмаси «Ўзбекистон темир йўллари» акциядорлик жамиятининг «Ўзбекистон» депоси электровози тортувчи асинхрон моторларининг техник ҳолатини диагностика ва назорат қилиш мақсадида ишлаб чиқариш жараёнига татбиқ этилган («Ўзбекистон темир йўллари» акциядорлик жамиятининг 2020 йил 5 августдаги 01/2692-20-сон маълумотномаси). Натижада, қутилаётган иқтисодий самарадорлик тортувчи асинхрон мотор техник ҳолатини диагностика ва назорат қилиш аниқлигини ошириш ҳисобига 205,503 млн сўмни ташкил этади.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Мазкур тадқиқот натижалари 8 та халқаро, шу жумладан SCOPUS рўйхатига киритилган 3 та илмий анжуманларда апробациядан ўтказилди.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мавзуси бўйича жами 22 та илмий иш, жумладан Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси тавсия этган илмий нашрларда 11 мақола чоп этилган, шунингдек ихтиролар учун 3 та Ўзбекистон Республикаси патенти олинган.

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

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

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

**“Масаланинг ҳолати ва тадқиқот вазифаларининг қўйилиши”** номли биринчи бобда ўзгарувчан ток электровозларида ишлатилаётган тортувчи асинхрон мотор(ТАМ)ларнинг ишдан чиқиш сабаблари, уларнинг техник ҳолатини назорат ва баҳолаш учун қўлланилаётган функционал диагностика тизим(ФДТ)лари ҳамда уларда фойдаланиладиган техник воситаларга қўйиладиган талаблар ўрганилиб, ФДТ моторнинг турли иш режимларида ҳам самарали ва ишончли ишлай олиши, диагностика жараёни объектнинг ишлаш вақти билан мослаштирилган ва уни автоматлаштириш имконияти мавжуд бўлиши ҳамда объектни қисмларга ажратишни талаб этмаслиги, индустриал ҳалақитларга сезувчанлиги паст каби талабларга жавоб бериши лозимлиги аниқланди.

ТАМлар замонавий функционал диагностика усулларининг қиёсий таҳлили қўйилган талабларга функционал диагностиканинг электр, иссиқлик, вибрацион ва магнит усулларини биргаликда қўллаш мақсадга мувофиқлигини кўрсатди. ТАМлар ФДТ мавжуд ўлчаш техник восита(ЎТВ)лари асосий характеристикаларининг қиёсий таҳлили шуни кўрсатдики, уларга қўйилган талабларга электромагнит принцида ишлайдиган ЎТВлари маълум даражада жавоб бериши аниқланди.

Шу билан бирга, ТАМлар техник ҳолатини узлуксиз баҳолаб борувчи мавжуд ФДТларининг имкониятлари чекланганлиги, уларда қўлланиладиган ЎТВлари паст сезгирлик ва аниқликка ҳамда ночизик статик характеристикага эга эканлиги аниқланди. Шу боис кейинги тадқиқотлар ТАМлар техник ҳолатини назорат ва баҳолаш учун имкониятлари кенгайтирилган, сезгирлиги ва аниқлиги юқори ҳамда чизикли статик характеристикага эга бўлган ЎТВларига эга бўлган ФДТларини ишлаб чиқишга қаратилиши зарур.

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

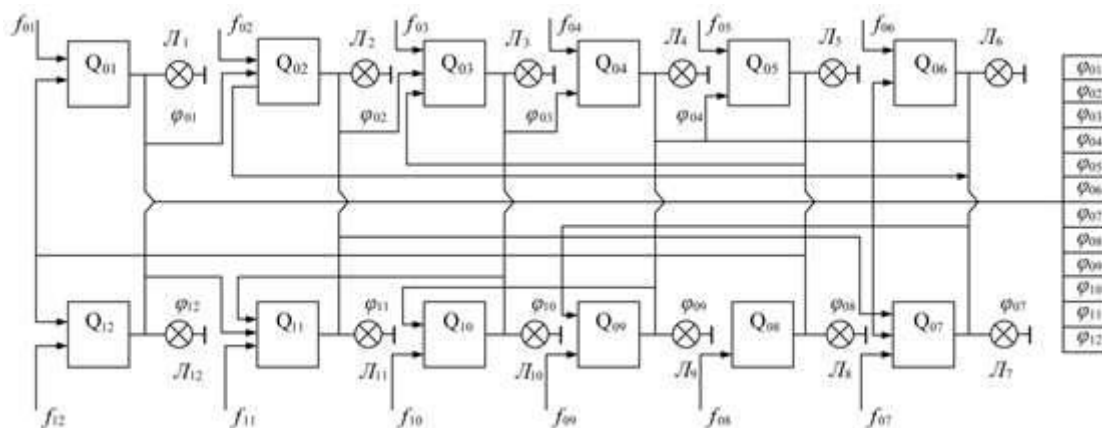
**“Тортувчи асинхрон моторларни функционал диагностика усуллари ва техник воситаларини такомиллаштириш”** номли иккинчи боб ТАМ диагностик параметрларини танлаш, уларни функционал диагностикалаш алгоритмининг ишлаб чиқиш ва ФДТларида қўлланиладиган ЎТВларининг сезгирлиги ва аниқлиги юқори ҳамда чизикли статик характеристикага эга бўлган янги конструкция ва схемаларини яратишга қаратилган.

ТАМларни функционал диагностикасида унинг диагностик параметрларини танлашдаги биринчи омил – бу уни ўлчай олиш имкониятининг мавжудлиги, кейин эса ўзида мотордаги носозлик ва нуқсонлар тўғрисидаги маълумотларга эга бўлиш имконияти ҳамда турли хил ташқи ва ички ҳалақитлардан ҳимояланган бўлишига қараб танланиши лозимлиги кўрсатилди.

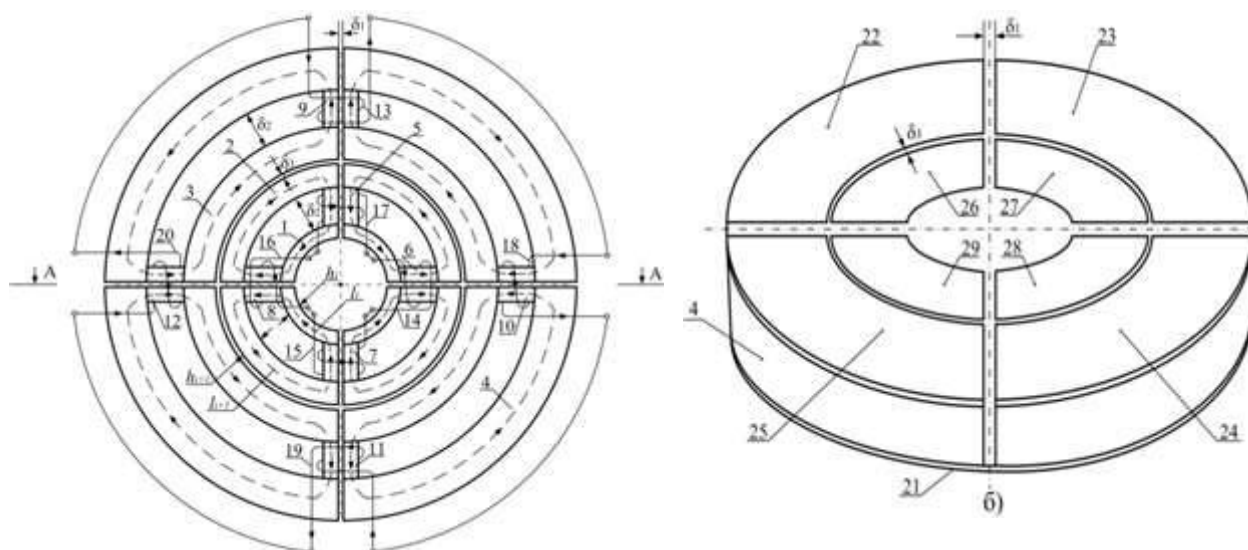
ТАМлар учун тузилган умумий функционал диагностика техник воситаларининг блок-схемаси асосида диагностика жараёнини ЭХМ да идентификациялаш мақсадида уларнинг боғланиш(инциденция)лар матрицалари ва диагностик техник воситаларини танлаш функцияларининг мантикий реализациялари ишлаб чиқилди (1- расм). Бу ФДТ тезкорлиги ва ишончлилигини ошириш имконини беради.

ТАМларни функционал диагностика жараёнини автоматлаштириш мақсадида уларнинг нормал ишлаётган ва носоз блоklarини функционал диагностикалаш алгоритми ишлаб чиқилди.

ТАМларни ФДТлари аниқлигини ошириш мақсадида уларда фойдаланиш учун мўлжалланган ва сезгирлиги, аниқлиги ҳамда статик характеристикасининг чизиклилиги юқори бўлган вибрация параметрларини, ток ва кучланиш ҳамда магнит майдони параметрларини ЎТВларининг янги конструкциялари яратилди. 2- расмда ТАМ корпуси вибрация параметрларини уларга пропорционал бўлган электр сигналга ўзгартириб берувчи такомиллаштирилган ЎТВ нинг конструктив схемаси келтирилган. Ушбу ЎТВда магнитоэластик материалдан ясалган ҳалқасимон ўтказгичларни битта горизонтал текисликда коаксиал ва бир-биридан маълум бир оралик билан жойлаштириш ва унинг конструкциясидан катта габарит ўлчамларга эга бўлган куч узатувчи элементларни қаттиқ ва эластик бўлмаган материалдан ясалган ҳамда магнитоэластик ҳалқасимон магнит ўтказгичларнинг пастки ва устки қисмларига маҳкамланган дисксимон қопқоқлар билан алмаштириш қурилманинг габарит ўлчамларини сезиларли



**1- расм. Ўзгарувчан ток электровозининг ТАМ ва унинг иш режимини бошқарув тизими умумий функционал диагностикаси техник воситаларининг блок-схемаси:**  $Q_{01} \div Q_{12}$  – ТАМ ҳар бир блокнинг чиқиш функциясини ЭХМ да шакллантирувчи (идентификацияловчи) локал функционал диагностика тизими;  $f_{01} \div f_{12}$  – диагностикаланувчи блоklar турли режимлари учун чиқиш сигналларининг рухсат этилган минимал ва максимал қийматлари;  $\varphi_{01} \div \varphi_{12}$  – диагностикаланувчи блоklar техник ҳолати бўйича маълумот берувчи сигналлар;  $L_{01} \div L_{12}$  – сигнал лампалари.



**2- расм. ТАМ корпуси вибрацияси параметрларини ўлчовчи ЎТВнинг конструктив схемаси:** 1-4 - концентрик ўзаклар; 5-12 - ферромагнит туташтиргичлар; 13-20 – ўлчаш чулғамининг секциялари; 21 - дисксимон қопқоқ; 22-29 - секторларга ажратилган дисксимон қопқоқ.

даражада кичрайтиради ва унинг конструктив тузилишини бирмунча соддалаштиради ҳамда сезгирлигини оширади. Магнитоэластик ҳалқасимон магнит ўтказгичларни секторларга ажратиш диагностикаланаётган объект алоҳида қисмларидаги локал механик куч ёки вибрация параметрларини ўлчаш имконини беради, бу эса, табиийки, техник восита функционал имкониятларини кенгайтиради.

“Тортувчи асинхрон моторларни функционал диагностика тизимлари ва техник воситаларининг математик моделлари” номли учинчи бобда функционал диагностиканинг ахборот-математик моделлари,

ТАМ иссиқлик режимларининг математик-диагностик моделлари ва ЎТВларининг математик моделлари ишлаб чиқилган.

ТАМ техник ҳолатини баҳолашда асосий диагностик параметрлардан бири бўлган статор токи ва унинг частота спектрларини таҳлил этиш мақсадида спектрал функция Фурьенинг тўғри алмаштириши ёрдамида қаторга ёйилиб, унинг ҳар бир ҳади учун қуйидаги спектрал зичлик ифодаси ҳосил қилинган:

$$F(\omega) = \frac{\sigma_\lambda^2}{\alpha} e^{-\sigma_\phi^2} \left\{ \sigma_\phi^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sigma_\phi^2)^n (n + D_{\dot{y}_p})}{n! [(n + D_{\dot{y}_p})^2 + \Omega^2]} + \right. \\ \left. + (1 - 2\sigma_\phi^2) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sigma_\phi^2)^n (n+1+D_{\dot{y}_p})}{n! [(n+1+D_{\dot{y}_p})^2 + \Omega^2]} + \sigma_\phi^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sigma_\phi^2)^n (n+2+D_{\dot{y}_p})}{n! [(n+2+D_{\dot{y}_p})^2 + \Omega^2]} \right\}, \quad (1)$$

бу ерда  $\sigma_\lambda^2 = \sigma_\phi^2 M_{am}^2$ ;  $\sigma_\phi^2 = \sigma_\lambda^2 M_{\phi m}^2$ ;  $M_{am}$ ,  $M_{\phi m}$  – мос равишда амплитуда ва фаза модуляцияларининг доимий коэффициентлари;  $D_{\dot{y}_p} = \frac{1}{4\alpha} N_\varphi$ ;  $N_\varphi$  – фаза флуктуацияси;  $\Omega = (\omega - \omega_0)/\alpha$ ;  $\Omega = n/60$  – модуляция частотаси;  $\omega_0$  – манба кучланишининг бурчак частотаси;  $n$  – роторнинг айланиш тезлиги;  $\varphi$  – бошланғич фазаси;  $\omega > 0$ ;  $\alpha$  – математик кутилиши  $m_\alpha = 0$  ва дисперцияси  $\sigma^2$  га тенг бўлган боғлиқ бўлмаган тасодифий катталиқ.

ТАМда эксцентритет мавжуд бўлган ҳолат учун статор токининг спектрлари ( $F(\omega)$  функция графиги) 3- расмда келтирилган.

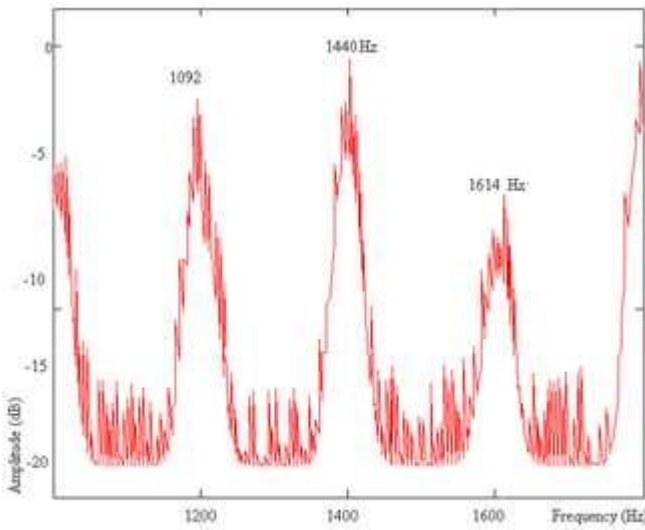
(1) ифода ва унинг графиги (3- расм) таҳлили шуни кўрсатадики, ТАМ роторида эксцентритет пайдо бўлганда статор токида амплитудали модуляция пайдо бўлади. ТАМ ротори стерженлари ёки олмахон уяси кўринишидаги чулғам ҳалқасининг бир қисми шикастланганда статор токи частотаси сирпанишга тенг бўлган амплитуда бўйича модуляцияланади.

Роторининг турли хил сон стерженлари шикастланган ТАМ статор токи спектрларининг Фурьенинг интеграл ўзгартириши ёрдамида олинган графиклари (4- расм)нинг таҳлили шуни кўрсатадики, шикастланган стерженларнинг сони ортиши билан асосий гармоникада частотаси сирпанишнинг иккиланган қийматига тенг бўлган ташкил этувчилар пайдо бўлишига сабаб бўлади.

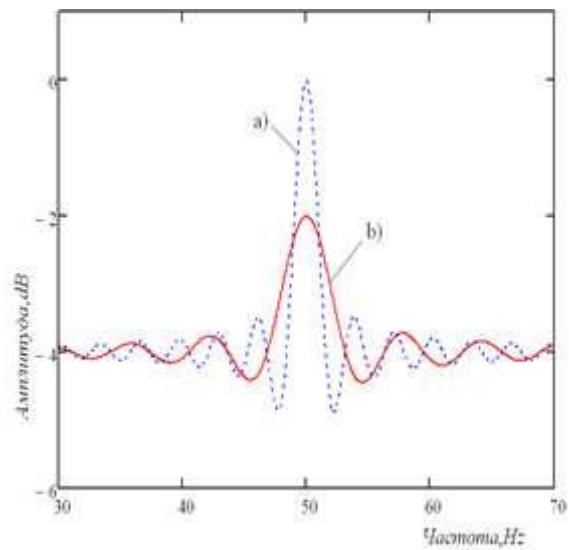
ТАМ ўзаро иссиқлик алмашинувчи учта (5- расм, а): статор чулғами (1), статор магнит ўтказувчи қисми (ферромагнит ўзак) (2) ва ротор чулғами (3) каби жисмлардан ташкил топган иссиқлик тизими сифатида қаралган ҳамда жисмларнинг ўзаро ва ҳар бир жисмнинг атроф-муҳит билан иссиқлик алмашинуви ҳисобга олинган ҳолат учун математик-диагностик моделлари ишлаб чиқилган.

Учта жисмли тизимнинг иссиқлик схемасига эквивалент бўлган электр алмашлаш схема (6- расм, б)даги ўткинчи жараёнларни ҳисоблаш учун тугун потенциаллари ( $\varphi_1(p)$ ,  $\varphi_2(p)$  ва  $\varphi_3(p)$ ) усули асосида қуйидаги оператор кўринишидаги тенгламалар системаси тузилган:

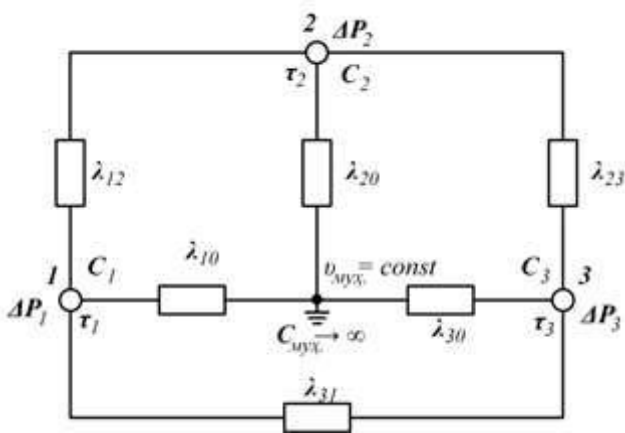
$$\begin{cases} Y_{11}(p)\varphi_1(p) - Y_{12}(p)\varphi_2(p) - Y_{13}(p)\varphi_3(p) = J_{11}(p), \\ -Y_{21}(p)\varphi_1(p) + Y_{22}(p)\varphi_2(p) - Y_{23}(p)\varphi_3(p) = J_{22}(p), \\ -Y_{31}(p)\varphi_1(p) - Y_{32}(p)\varphi_2(p) + Y_{33}(p)\varphi_3(p) = J_{33}(p), \end{cases} \quad (2)$$



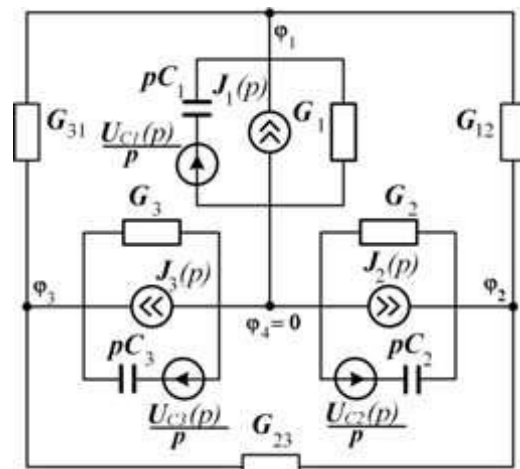
3- расм. ТАМда эксцентритет мавжуд бўлганда статор токининг спектрлари



4- расм. ТАМ роторининг иккита (a) ва олтига (b) стерженлари шикастланган ҳолатлари учун статор токи спектрлари



a)



б)

5- расм. ТАМ учта жисмли тизимининг иссиқлик (a) ва унга эквивалент бўлган электр (б) алмашлаш схемалари

бу ерда  $Y_{11}(p) = G_1 + G_{12} + G_{31} + pC_1 - \alpha_\theta \Delta P_{10}$ ;  $Y_{22}(p) = G_2 + G_{12} + G_{23} + pC_2$ ;  $Y_{33}(p) = G_3 + G_{23} + G_{31} + pC_3$ ;  $Y_{12}(p) = Y_{21}(p) = G_{12}$ ;  $Y_{13}(p) = Y_{31}(p) = G_{31}$ ;  $Y_{23}(p) = Y_{32}(p) = G_{23}$ ;  $J_{11}(p) = J_1(p) + U_{C1}(0)C_1$ ;  $J_{22}(p) = J_2(p) + U_{C2}(0)C_2$ ;  $J_{33}(p) = J_3(p) + U_{C3}(0)C_3$ ;  $J_1(p) = (\Delta P_{10}/p\theta_{\dot{y}p1})$ ;  $J_2(p) = (\Delta P_{20}/p\theta_{\dot{y}p2})$ ;  $J_3(p) = (\Delta P_{30}/p\theta_{\dot{y}p3})$ ; бунда  $\Delta P_1 = 3I^2R_0(1 + \alpha_\theta\tau_1)$ ,  $\Delta P_{20}$  ва  $\Delta P_{30}$  – мос равишда учта жисмдаги актив қувват исрофлари, [Вт];  $I$ ,  $R_0$  – мос равишда статор чулғами токи ва чулғамнинг ҳарорати атроф-

муҳит ҳароратига тенг бўлгандаги актив қаршилиги, [A] ва [Ом];  $\alpha_\theta$  – чулғам материали қаршилигининг ҳарорат коэффициенти, [1/K];  $U_{C1}(0)$ ,  $U_{C2}(0)$ ,  $U_{C3}(0)$  – коммутация пайтидаги мос равишда  $C_1$ ,  $C_2$  ва  $C_3$  конденсаторлардаги қолдиқ(бошланғич) кучланишлар;  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  ва  $\tau_3$  – мос равишда ҳар бир жисм ҳароратининг атроф-муҳит ҳароратига нисбатан орттирмаси, [K];  $G_i$  ва  $G_{ij}$  – эквивалент электр занжири тугунларининг хусусий ва тугунлараро умумий электр ўтказувчанликлари, [Сим].

(2) тенгламалар системасини ечиш ва ТАМ иссиқлик режимидаги тегишли катталиқ ва параметрларни аниқлаш асосида ТАМнинг қуйидаги диагностик-математик моделлари ишлаб чиқилди:

$$\tau_{1T} = \frac{\tau_{1H} - \tau_{1K}(1 - k^2)}{1 + \alpha_\theta \tau_{1K}(1 - k^2)}, \quad (3) \quad \tau_{1T} = \tau_{1H} \frac{a + k^2}{1 + a + \alpha_\theta \tau_{1H}(1 - k^2)}, \quad (4)$$

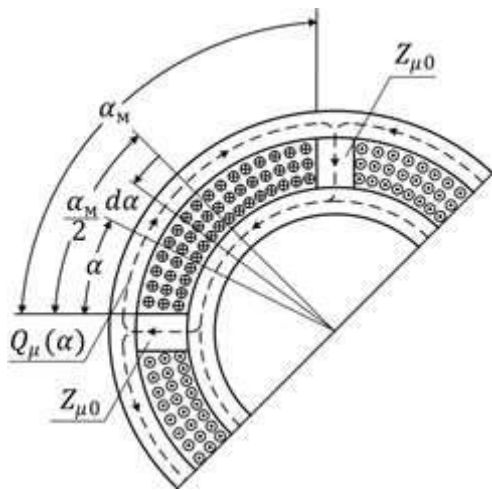
$$k_c = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_H} = e^{B \left( \frac{1}{\tau_{1H} + \vartheta_{\text{мух.}} + 273} - \frac{1}{\tau_{1T} + \vartheta_{\text{мух.}} + 273} \right)}; k_H \leq 1 \text{ ва } k_c \leq 1, \quad (5)$$

бу ерда  $\tau_{1T}$ ,  $\tau_{1H}$ ,  $\tau_{1K}$  – статор чулғами ҳарорати орттирмасининг мос равишда турғун, номинал ва қисқа тутатиш режимидаги қийматлари;  $a = \Delta P_{\text{пн}} / \Delta P_{\text{мн}}$  – исроф коэффициенти;  $\Delta P_{\text{пн}}$ ,  $\Delta P_{\text{мн}}$  – номинал режимда мос равишда пўлат ўзак ва чулғам мис симидаги актив қувват исрофлари, [Вт];  $k = I / I_H$  – статор токи карралиги;  $k_H = (a + k^2) / (a + 1)$ ;  $k_c$  – изоляция ресурси сарфини баҳоловчи коэффициент;  $\varepsilon$  – изоляция сарфланишининг тезлиги;  $\varepsilon_H$  – изоляциянинг иссиқликдан емирилиш номинал тезлиги, таянч соат/соат;  $\theta_{1H} = \tau_{1H} + \vartheta_{\text{мух.}} + 273$  – изоляциянинг берилган синфи учун абсолют номинал ҳарорат, [K];  $\theta_{1T} = \tau_{1T} + \vartheta_{\text{мух.}} + 273$  – изоляциянинг берилган синфи учун абсолют турғун ҳарорат, [K];  $B$  – изоляциянинг берилган синфини тавсифловчи кўрсаткич.

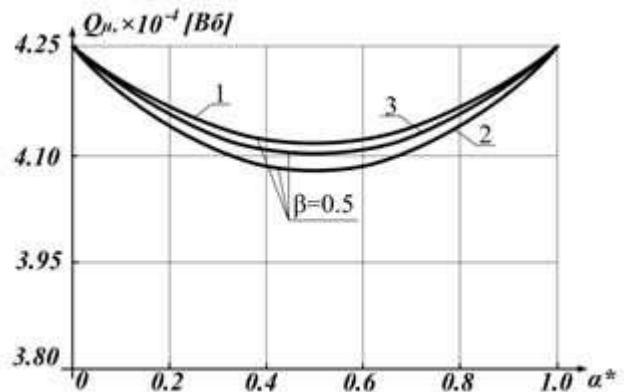
Ҳосил қилинган математик-диагностик моделлар таҳлили ТАМ статор чулғами ҳароратини атроф-муҳит ҳароратига нисбатан орттишининг турғун қиймати мотор токи карралигига, исроф коэффициентига ва чулғам материали қаршилигининг иссиқлик коэффициентига боғлиқлигини кўрсатди.

ТАМларни функционал диагностикасида қўллаш учун мўлжалланган янги электромагнит ЎТВларининг математик моделлари ишлаб чиқилди. Янги ЎТВлари магнит занжирлари чулғамни магнит занжири бўйлаб йиғиқ ва тарқоқ жойлашган ҳамда ферромагнит ўзак магнитланиш эгри чизигининг ночизиклигини инобатга олмасдан ва инобатга олган ҳолда таҳлил қилинди. ЎТВ магнит занжири учун энг мураккаб бўлган ҳолат (6- расм, а), яъни чулғам секциялари магнит занжири бўйлаб тарқоқ жойлашганлиги ва магнитланиш эгри чизигининг ночизиклиги ҳисобга олинган магнит занжири учун дифференциал тенгламаларни тузиш ва ечишнинг классик усули асосида ҳосил қилинган магнит оқими ( $Q_\mu(\alpha)$ ) нинг манба ва электромагнит занжир параметрлари ҳамда координатасига боғлиқлиги кўринишидаги математик моделлари қуйида келтирилган:

$$Q_\mu(\alpha) = \frac{K_1 \gamma^2}{b_1} ch \left[ \gamma \left( \frac{1}{2} \alpha_M - \alpha \right) \right] - \frac{b_2 K_1^3}{b_1} ch^3 \left[ \gamma \left( \frac{1}{2} \alpha_M - \alpha \right) \right], \quad (6)$$



а)



б)

**6- расм. Чулғам секциялари тарқоқ жойлашган ЎТВ магнит занжири (а) ва ундаги  $Q_\mu = f(\alpha^*)$  боғланиш эгри чизиклари (б):**

1 – ферромагнит материал  $B = f(H)$  боғланишининг ночизиклиги ҳисобга олинмаганда; 2 – шу боғланиш ночизиклиги ҳисобга олинганда; 3 – экспериментал

$$\text{бу ерда } K_1 = \frac{(2Z_{\mu\text{п}}F_{\text{к}} - Z_{\mu 0}f_{\text{к}})}{Z_{\mu 0}Z_{\mu\text{п}}\Delta} \left[ sh\left(\frac{1}{2}\gamma\alpha_m\right) + \frac{\gamma}{Z_{\mu 0}C_{\mu\text{п}}} ch\left(\frac{1}{2}\gamma\alpha_m\right) \right], \text{ [Вб];}$$

$$\text{бу ерда } Z_{\mu\text{п}1} = \frac{0,5\pi r_{1\text{ўр}}}{\mu_0 b h_1 \alpha_m} = Z_{\mu\text{п}2} = \frac{0,5\pi r_{2\text{ўр}}}{\mu_0 b h_2 \alpha_m} = Z_{\mu\text{п}}, \left[ \frac{1}{\text{Гн}\cdot\text{град}} \right] \text{ ва}$$

$$C_{\mu\text{п}} = \mu_0 \frac{0,25b\pi(r_{1\text{ўр}} + r_{2\text{ўр}})}{\delta_{\text{иш}}\alpha_m}, \left[ \frac{\text{Гн}}{\text{град}} \right] - \text{мос равишда 1- ва 2- ҳалқасимон ферромагнит}$$

ўзаклар магнит қаршиликларининг ҳамда ферромагнит ўзаклар орасидаги ҳаво оралиғи магнит сиғимининг  $\alpha$  бурчак бирлигига тўғри келадиган погон қийматлари;  $r_{1\text{ўр}}$ ,  $r_{2\text{ўр}}$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $b$  ва  $\delta_{\text{иш}}$  - мос равишда ферромагнит ўзаклар ўртача радиуслари, қалинликлари, узунлиги ва ферромагнит ўзаклар орасидаги ишчи ҳаво оралиғи;  $\mu$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ , [Гн/м] - мос равишда ферромагнит ўзак материалининг нисбий магнит сингдирувчанлиги ва ҳавонинг абсолют магнит сингдирувчанлиги (магнит доимийси);  $\alpha$ ,  $\alpha_m$  - мос равишда бурчак координатаси ва унинг максимал қиймати;  $F_{\text{к}}$ ,  $f_{\text{к}}$  - магнит юритувчи куч ва унинг  $\alpha$  бурчак бирлигига тўғри келадиган погон қиймати;  $\gamma = \sqrt{2Z_{\mu\text{п}}C_{\mu\text{п}}}$ , [1/град] - магнит оқимининг магнит занжири бўйлаб тарқалиш коэффициенти;  $Z_{\mu 0}$  - ҳалқасимон ферромагнит ўзакларни ўзаро уловчи ферромагнит туташтиргич магнит қаршилиги;  $b_1 = a_1 \frac{\pi r_{\text{ўр}}}{S_{\mu}\alpha_m} C_{\mu\text{п}}$ ,

$$[1/\text{град}^2]; \quad b_2 = a_2 \frac{\pi r_{\text{ўр}}}{S_{\mu}^3\alpha_m} C_{\mu\text{п}}, \quad [1/(\text{Тл}^2 \cdot \text{м}^4\text{град}^2)]; \quad r_{\text{ўр}} = 0,5(r_{1\text{ўр}} + r_{2\text{ўр}});$$

$$\Delta = \left[ \left( 1 + \frac{\gamma^2}{Z_{\mu 0}^2 C_{\mu\text{п}}^2} \right) sh(\gamma\alpha_m) + \frac{\gamma}{Z_{\mu 0} C_{\mu\text{п}}} ch(\gamma\alpha_m) \right], [-].$$

Ҳосил қилинган математик моделлар ва улар асосида қурилган графиклар (6- расм, б) таҳлили шуни кўрсатадики, чулғамлари тарқоқ жойлашган магнит занжири ундаги магнит ўтказгич материали магнитланиш эгри чизигининг ночизиклиги ҳисобга олинмай ҳисобланганда натижа

тажриба натижаларидан  $10 \div 12 \%$  га, магнитланиш эгри чизигининг ночизиклиги ҳисобга олинганда эса -  $5 \div 7 \%$  га фарқ қилади.

**“Тортувчи асинхрон моторлар функционал диагностика тизимларининг асосий характеристикалари”** номли тўртинчи бобда ишлаб чиқилган ЎТВ ларининг статик, динамик характеристикалари ва хатоликлари, ФДТларининг ишончилиги ўрганилган ҳамда ТАМни функционал диагностикалашда фойдаланилган стенд ва техник воситалар келтирилган.

Вибрация параметрларини ўлчашга мўлжалланган ва чулғамлари мос равишда йиғиқ ва тарқоқ жойлашган ҳамда асосий магнитланиш эгри чизигининг ночизиклиги ҳисобга олинмаган ва олинган магнитоэластик ЎТВ статик характеристикаларининг аналитик тенгламалари қуйидаги кўринишда ҳосил қилинган:

$$E_{\text{чик},1} = 2j\omega W Q_{\mu}(0) = 2j\omega W K_0(I'_M) ch \left[ \frac{1}{2} \beta(I'_M) \right], \quad (7)$$

$$E_{\text{чик},2} = 2j\omega W \left\{ \frac{K_0(I'_M) \beta^2(I'_M)}{b_1 \alpha_M^2} ch \left[ \frac{1}{2} \beta(I'_M) \right] - \frac{b_2 K_0^3(I'_M)}{b_1} ch^3 \left[ \frac{1}{2} \beta(I'_M) \right] \right\}, \quad (8)$$

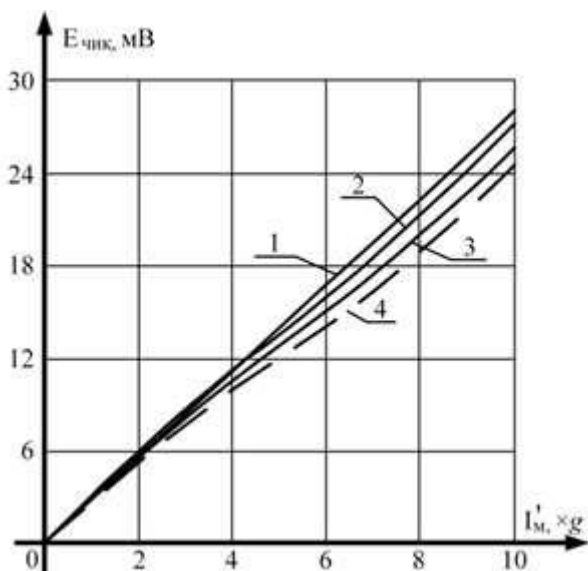
$$E_{\text{чик},3} = \frac{2j\omega W_{\text{пог}} K_1(I'_M)}{\beta(I'_M) b_1 \alpha_M} \left\{ \beta^2(I'_M) - 2b_2 \alpha_M^2 K_1^2(I'_M) \left[ 1 + \frac{1}{3} ch^2 \left[ \frac{1}{2} \beta(I'_M) \right] \right] \right\}, \quad (9)$$

бу ерда  $K_0 = \frac{2F_{\kappa}}{Z_{\mu 0} \Delta} \left[ sh \left( \frac{1}{2} \gamma \alpha_M \right) + \frac{\gamma}{Z_{\mu 0} C_{\mu n}} ch \left( \frac{1}{2} \gamma \alpha_M \right) \right]$ , [Вб];  $W$ ,  $W_{\text{пог}}$  – чулғам секциясидаги ўрамлар сони ва унинг погон қиймати;  $I'_M$  – вибротезланиш, [м/с<sup>2</sup>];

(7), (8), (9) тенгламалар ва улар асосида ҳамда ўтказилган тажриба натижалари бўйича қурилган статик характеристикалар таҳлили шуни кўрсатадики (7- расм), яратилган магнитоэластик ЎТВ лари ўзгартириш функцияларининг аналитик ифодаларини келтириб чиқаришда чулғам секцияларининг  $\alpha$  координата бўйлаб тарқоқ жойлашганлигини ва магнит ўтказгич материали асосий магнитланиш эгри чизиги ночизиклигини ҳисобга олиш ҳисоблашларда тажриба натижаларига нисбатан хатоликни 13–15 % га камайтириш имконини беради.

Яратилган ЎТВларнинг динамик характеристикалари вибрация параметрларини ўлчовчи магнитоэластик ЎТВ мисолида ФДТлари иш режимларида кўп учрайдиган қуйидаги тўртта намунавий режимлар (таъсирлар)да ўрганилди: 1) ўзгармас кучланиш ( $U_{\text{э.к.}}$ ) манбаидан таъминланаётган ЎТВ киришига синусоидал қонуният билан ўзгараётган вибротезланиш ( $I'_M(t) = I'_{Mm} \sin \omega_M t$ ) берилган ҳолат; 2) синусоидал кучланиш ( $U_{\text{э.к.}}(t) = U_{\text{э.к.}m} \sin \omega_{\text{э}t}$ ) манбаидан таъминланаётган ЎТВ киришига синусоидал қонуният билан ўзгараётган вибротезланиш берилган ҳолат; 3) синусоидал вибротезланиш таъсирида бўлган ЎТВ ўзгармас кучланиш манбаига уланган ҳолат; 4) синусоидал вибротезланиш таъсирида бўлган ЎТВ синусоидал кучланиш манбаига уланган ҳолат. Ушбу режимлар учун





**7- расм. Яратилган магнитоэластик ЎТВ нинг статик характеристикалари:** 1 – чулғам секциялари тарқоқ жойлашганлиги ва магнит ўтказгич материали асосий магнитланиш эгри чизиғи ночизиклиги ҳисобга олинмаган ҳолат учун; 2 – чулғам секциялари тарқоқ жойлашганлиги ҳисобга олинмаган ва асосий магнитланиш эгри чизиғининг ночизиклиги ҳисобга олинган ҳолат учун; 3 – чулғам секциялари тарқоқ жойлашганлиги ва асосий магнитланиш эгри чизиғининг ночизиклиги ҳисобга олинган ҳолат учун; 4 – экспериментал статик характеристика

ўткинчи (ўтиш) кучланишларининг ифодалари олинди. Масалан, 2- ҳолат учун ўткинчи кучланиш ифодаси қуйидагига тенг (8- расм):

$$U_{\text{э.чик.2}}(t) = -A_2 e^{-\delta_{\text{э}\mu} t} \left\{ \sin \left[ \left( \omega_{\text{э}} - \sqrt{\delta_{\text{э}\mu}^2 - \omega_{\mu}^2} \right) t - \varphi_1 \right] + \right. \\ \left. + \sin \left[ \left( \omega_{\text{э}} + \sqrt{\delta_{\text{э}\mu}^2 - \omega_{\mu}^2} \right) t + \varphi_1 \right] \right\} + B_1 \left\{ \sin \left[ \left( \omega_{\text{э}} - \omega_{\text{м}} \right) t - \varphi_{\text{м}} \right] + \right. \\ \left. + \sin \left[ \left( \omega_{\text{э}} + \omega_{\text{м}} \right) t + \varphi_{\text{м}} \right] \right\}, \quad (10)$$

бу ерда  $A_2 = \frac{k U_{\text{э.к.т.}} I'_{\text{мт}} \omega_{\text{м}} \sqrt{2\delta_{\text{э}\mu}^2 - \omega_{\mu}^2}}{2\sqrt{(\delta_{\text{э}\mu}^2 - \omega_{\mu}^2)} \left\{ \left( 4\delta_{\text{э}\mu} \sqrt{(\delta_{\text{э}\mu}^2 - \omega_{\mu}^2)} \right)^2 + [2(\delta_{\text{э}\mu}^2 - \omega_{\mu}^2) + (\omega_{\mu}^2 + \omega_{\text{м}}^2)]^2 \right\}}, [B];$

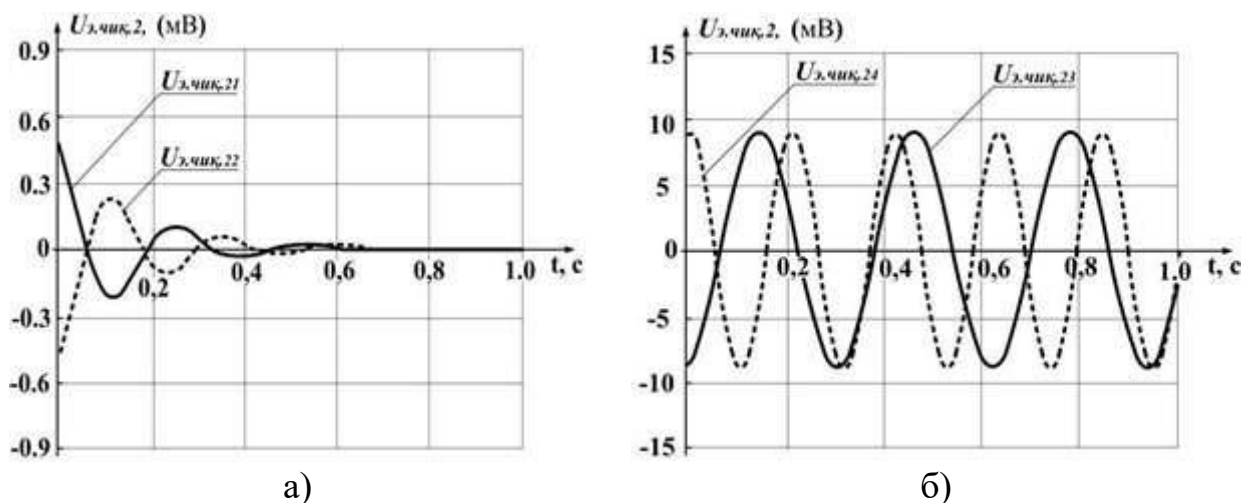
$$B_1 = \frac{k U_{\text{э.к.т.}} I'_{\text{мт}} \omega_{\text{м}}}{\sqrt{4\delta_{\text{э}\mu}^2 \omega_{\text{м}}^2 + (\omega_{\mu}^2 - \omega_{\text{м}}^2)^2}}, [B]; \quad k = \omega_{\mu}^2 K_{I_3 U_{\mu}} K_{I_{\mu} U_{\text{э}}} G_{\text{э}} K_{U_{\text{м}} C_{\mu}} L_{\text{м}}, [\Gamma\text{H}/(\text{м} \cdot \text{Ом})];$$

$$2\delta_{\text{э}\mu} = \omega_{\mu}^2 (T_{\text{э}} + T_{\mu}), [c^{-1}]; \quad T_{\text{э}} = K_{I_3 U_{\mu}} K_{I_{\mu} U_{\text{э}}} G_{\text{э}} C_{\mu\Sigma}, [c]; \quad T_{\mu} = R_{\mu} C_{\mu\Sigma}, [c];$$

$$\omega_{\mu}^2 = (1/L_{\mu} C_{\mu\Sigma}), [c^{-2}]; \quad \varphi_1 = \text{arch} \frac{(\omega_{\mu}^2 - \omega_{\text{м}}^2) \sqrt{(\delta_{\text{э}\mu}^2 - \omega_{\mu}^2)}}{\delta_{\text{э}\mu} (\delta_{\text{э}\mu}^2 + \omega_{\mu}^2)}; \quad \varphi_{\text{м}} = \text{arctg} \frac{2\delta_{\text{э}\mu} \omega_{\text{м}}}{(\omega_{\mu}^2 - \omega_{\text{м}}^2)}.$$

(10) ифода ва унинг асосида қурилган ўткинчи жараён графиклари (8- расм) таҳлили шуни кўрсатадики, синусоидал кучланиш манбаидан таъминланаётган магнитоэластик ЎТВ киришига синусоидал қонуният билан ўзгараётган вибротезланиш берилганда ўткинчи чиқиш кучланиш амплитудаси  $\delta_{\text{э}\mu}$  кўрсаткич билан сўнўвчи, частоталари эса манба кучланиши частотаси ва ЎТВ электр ва магнит занжирлари параметрлари билан аниқланувчи частотанинг мос равишда айирмаси ва йиғиндисидан иборат бўлган иккита гармоник эркин ташкил этувчилар (8- расм, а) ҳамда частоталари манба кучланиши ва вибрация частотасининг мос равишда

айирмаси ва йиғиндисидан иборат бўлган иккита гармоник турғун ташкил этувчилар (8- расм, б) йиғиндисидан иборат бўлади.



**8- расм. Синусодал кучланиш манбаидан таъминланаётган магнитоэластик ЎТВ киришига  $I'_M(t) = I'_{Mm} \sin \omega_M t$  қонуният билан ўзгараётган вибротезланиш берилган ҳолат учун ўткинчи жараён графиклари**

ТАМ ФДТларида қўллаш учун яратилган ЎТВларининг магнитоэластик ЎТВ мисолида ўрганилган ўлчаш хатолигининг таҳлили шуни кўрсатдики, яратилган вибрация параметрларини ўлчовчи магнитоэластик ЎТВ нинг нисбий келтирилган хатолиги  $\pm 0,5\%$  дан ошмайди.

ТАМ статор токи, корпусининг вибрация параметрлари, ташқи магнит майдонининг параметрлари ва улар таркибидаги гармоник ташкил этувчиларнинг спектрал таҳлилига асосланган ҳамда такомиллаштирилган функционал диагностика усуллари ва янги ЎТВ ларидан фойдаланилган ҳолда яратилган функционал диагностика қурилмаси ишончилигини баҳолаш бўйича амалга оширилган назарий ва экспериментал тадқиқотлар яратилган функционал диагностика қурилмаси ёрдамида ТАМ техник ҳолатини етарли ишончилик билан функционал диагностикалаш имконияти мавжудлигини кўрсатди.

Яратилган функционал диагностикалаш қурилмаси “Ўзбекистон темир йўллари” АЖ “Ўзбекистон” локомотив депосида тортувчи асинхрон моторлар иш жараёни мобайнида юзага келадиган нуқсон ва носозликларни аниқлаш мақсадида қўлланилди. Янги функционал диагностика қурилмасини қўллаш орқали моторнинг реал техник ҳолатини назорат қилиш соддалашди, тортувчи моторнинг механик ва электр қисмларида юзага келадиган нуқсон ва носозликларга доир маълумотларни эрта ва аниқ олиш ҳисобига йиллик иқтисодий самарадорлик 205,503 млн (икки юз беш миллион беш юз уч минг) сўмни ташкил этди.

Яратилган функционал диагностика қурилмаси ва техник воситаларининг конструктив ва принципиал схемалари ҳамда такомиллаштирилган функционал диагностика усуллари магистрантлар учун

Олий ва ўрта махсус таълим Вазирлиги грифи билан чоп этилган «Тортиш электр таъминоти объектларининг техник ҳолатини диагностикалаш ва назорат қилиш» номли дарсликка киритилган.

Диссертация иловасида турли физик табиатга эга занжирларнинг энергия-информацион модели асосий элементлари, ишлаб чиқилган ЎТВ ларни тадқиқ этишда қўлланадиган занжирлараро физик-техник эффектлар ва занжир ичидаги параметрларнинг техник тавсифлари, шунингдек илмий тадқиқот натижаларининг ишлаб чиқариш жараёнига татбиқ этилиши тўғрисидаги акт ва маълумотнома келтирилган.

## ХУЛОСА

1. Тортувчи асинхрон моторлар замонавий функционал диагностика усуллари ва техник воситаларининг қиёсий таҳлили шуни кўрсатдики, қўйилган талабларга функционал диагностиканинг электр, иссиқлик, вибрацион ва магнит усуллари биргаликда қўллаш ҳамда бунда электромагнит принципдаги ўлчаш техник воситаларидан фойдаланиш мақсадга мувофиқлиги аниқланди.

2. Тортувчи асинхрон моторлар учун тузилган умумий функционал диагностика техник воситаларининг блок-схемаси асосида диагностика жараёнини ЭХМ да идентификациялаш, функционал диагностика тезкорлиги ва ишончлилигини ошириш ҳамда диагностика жараёнини автоматлаштириш мақсадида уларнинг боғланиш(инцидент)лар матрицалари ва диагностика техник воситаларини танлаш функцияларининг мантикий реализациялари ҳамда уларнинг нормал ишлаётган ва носоз блокларини функционал диагностикалаш алгоритми ишлаб чиқилди.

3. Тортувчи асинхрон моторларни функционал диагностика тизимлари кўрсаткичларининг аниқлигини ошириш мақсадида уларда фойдаланиш учун мўлжалланган ва сезгирлиги, аниқлиги ҳамда статик характеристикасининг чизиқлилиги юқори бўлган вибрация параметрлари, ток, кучланиш ва магнит майдони параметрларини ўлчовчи техник воситалар яратилди.

4. Тортувчи асинхрон мотор ўзаро иссиқлик алмашинувчи учта: статор чулғами, магнит ўтказгич ва ротор чулғами каби жисмлардан ташкил топган иссиқлик тизими сифатида қаралган ҳолат учун ишлаб чиқилган математик-диагностик моделларида жисмларнинг ўзаро ва ҳар бир жисмнинг атроф-муҳит билан иссиқлик алмашинувчини ҳисобга олиниши моторларни диагностикалаш аниқлигининг ошишига олиб келиши аниқланди. Тортувчи асинхрон мотор статор чулғами ҳароратини ортишининг турғун қиймати мотор токи карралигига, исроф коэффициентига ва чулғам материали қаршилигининг иссиқлик коэффициентига боғлиқлиги аниқланди.

5. Тортувчи асинхрон моторларни функционал диагностикалашда қўлланиладиган янги электромагнит ўлчаш техник воситаларининг математик моделлари ишлаб чиқилди. Ушбу моделларда ферромагнит ўзақлар магнитланиш эгри чизиғи ва қўзғатувчи чулғамларнинг занжир

бўйлаб тақсимланишини ҳисобга олиш ишлаб чиқилган моделлар аниқлигининг ошишига олиб келиши аниқланди.

6. Ўтказилган назарий ва экспериментал тадқиқотлар натижалари бўйича қурилган статик характеристикалар таҳлили шуни кўрсатдики, яратилган ўлчаш техник воситалари ўзгартириш функцияларининг аналитик ифодаларини келтириб чиқаришда чулғам секцияларининг тарқоқ жойлашганлигини ва магнит ўтказгич материали асосий магнитланиш эгри чизиғи нозизиқлигини ҳисобга олиш хатоликни 13–15 % га камайтириш имконини беради.

7. Яратилган ўлчаш техник воситаларининг турли хил намунавий кириш таъсирларидаги динамик характеристикалари ўрганилди. Синусоидал кучланиш манбаидан таъминланаётган магнитоэластик ўлчаш техник воситаси киришига синусоидал қонуният билан ўзгараётган вибротезланиш берилганда ўткинчи чиқиш кучланиш частоталари манба кучланиши частотаси ва ўлчаш техник воситаси электр ва магнит занжирлари параметрлари билан аниқланувчи частотанинг мос равишда айирмаси ва йиғиндисидан иборат бўлган иккита эркин гармоник ташкил этувчилар ҳамда частоталари манба кучланиши ва вибрация частотасининг мос равишда айирмаси ва йиғиндисидан иборат бўлган иккита турғун гармоник ташкил этувчилар йиғиндисидан иборат бўлиши аниқланди.

8. Тортувчи асинхрон мотор статор токи, корпусининг вибрация параметрлари, ташқи магнит майдонининг параметрлари ва улар таркибидаги гармоник ташкил этувчиларнинг спектрал таҳлиliga асосланган ҳамда такомиллаштирилган функционал диагностика усуллари ва янги ўлчаш техник воситаларидан фойдаланилган ҳолда яратилган функционал диагностика қурилмаси ишончилигини баҳолаш бўйича амалга оширилган назарий ва экспериментал тадқиқотлар яратилган функционал диагностика қурилмаси ёрдамида моторларни ишлатиш режимларида техник ҳолатини етарлича ишончилик билан функционал диагностикалаш имконияти мавжудлигини кўрсатди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ  
PhD.15/30.12.2019.Т.73.01 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТРАНСПОРТНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**ФАЙЗУЛЛАЕВ ЖОВХАРБЕК СУЛТОН УГЛИ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ  
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЯГОВЫХ АСИНХРОННЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ**

**05.08.05 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и  
электрификация**

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

**Ташкент – 2020**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2020.3.PhD/Т1475.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном транспортном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-сайте Научного Совета (<http://tstu.uz>) и Информационно-образовательном портале «Ziynet» ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)).

**Научный руководитель:** Халиков Абдулхак Абдулхайрович  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** Пирматов Нурали Бердиярович  
доктор технических наук, профессор

Валиев Мухаммад Шералиевич  
кандидат технических наук, доцент

**Ведущая организация:** ООО «Научно-технический центр»  
АО «Ўзбекэнерго»


Защита диссертации состоится «17» 10 2020 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета PhD.15/30.12.2019.Т.73.01 при Ташкентском государственном транспортном университете (Адрес: 100167, Ташкент, Темирийўлчилар, 1. Тел.: (99871) 299-00-01; факс: (99871) 293-57-54, e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).


С диссертацией можно ознакомиться в Ташкентском государственном транспортном университете (регистрационный номер – 013).

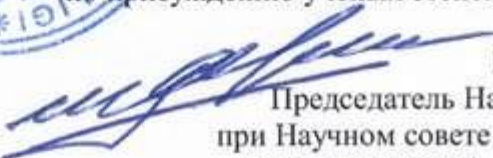
(Адрес: 100167, Ташкент, ул. Темирийўлчилар, 1. Тел.: (99871) 299-05-66.

Автореферат диссертации разослан «09» 10 2020 года.  
(протокол реестра № 014 от «09» 10 2020 года).



  
**А.И. Адилходжаев**  
Председатель Научного совета  
по присуждению учёных степеней,  
д.т.н., профессор

  
**Я.О. Рузметов**  
Ученый секретарь Научного совета  
по присуждению учёных степеней, к.т.н., доцент

  
**Ш.С. Файзиев**  
Председатель Научного семинара  
при Научном совете по присуждению  
учёных степеней, д.т.н., профессор

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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире в последние годы в различных отраслях народного хозяйства, в том числе на железнодорожном транспорте, наряду с другими электротехническими, электромеханическими и электроэнергетическими установками широко применяются и асинхронные двигатели. В частности, на 49 электровозах переменного тока, эксплуатируемых на электрифицированных железных дорогах акционерного общества “Ўзбекистон темир йўллари”, функционируют 294 тяговых асинхронных двигателей. Зарубежный и местный опыт показывает, что из-за несовершенства систем диагностирования ежегодно выходит из строя 20 ÷ 25 % этих двигателей.

В мире с целью непрерывного контроля и оценки технического состояния электрического оборудования и установок на электротехнических и электроэнергетических производственных объектах проводятся научно-исследовательские работы, направленные на повышение достоверности, расширения функциональных возможностей и снижения стоимости систем функциональной диагностики и их технических средств, построенных на электрических, тепловых, виброакустических, магнитных и оптических явлениях. В частности, уделяется большое внимание разработкам полноценных математических диагностических моделей тяговых асинхронных двигателей электровозов, выбору их диагностических параметров, позволяющих получить достоверную информацию для диагностики, имеющие возможность измерения и инвариантных к различным внешним помехам, а также комплексному использованию методов функциональной диагностики. Вместе с тем, требуется совершенствование методов и технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей электровозов.

В нашей республике осуществляются меры по развитию различных сфер транспорта, в частности, развитию инфраструктуры железнодорожного транспорта, расширение участков высокоскоростных магистралей и электрификация существующих железнодорожных участков. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 гг. отмечены задачи, а именно, «...повышение конкурентоспособности национальной экономики, ...активная инвестиционная политика, направленная на решение транспортно-коммуникационных и социально-инфраструктурных проектов, ...техническое и технологическое обновление производства, ...широкое внедрение в производство энергосберегающих технологий»<sup>2</sup>. Реализация данных задач, в том числе совершенствование методов и технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей являются важнейшими задачами.

Данное диссертационное исследование в определенной мере служит

---

<sup>2</sup>Указ Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 г. № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».

осуществлению поставленных нормативно-правовых задач, а именно: Закон Республики Узбекистан «О железнодорожном транспорте» (1999), Указ Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2017 г. № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Указ Президента Республики Узбекистан от 23 августа 2017 г. № УП-3338 «О мерах по дальнейшему внедрению современных энергоэффективных и энергосберегающих технологий».

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

**Степень изученности проблемы.** Научные исследования, направленные на решение актуальных задач по усовершенствованию методов и технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей, осуществляются в ведущих научных центрах и высших образовательных учреждениях мира, в том числе University of Michigan and General Electric, Bergen Laboratories Ins. (США), Technical University of Ilmenau and Siemens, Siemens and Halke (Германия), Davyand United Instrumets (Великобритания), Sony and Tokyo technology institute, Toshiba (Япония), ASEA (Швеция), Kelk Electronics (Канада), в национальном исследовательском университете (МЭИ), Уфимском государственном авиационном техническом университете (Россия), Киевском институте автоматики (Украина), Ташкентском государственном техническом университете и Ташкентском государственном транспортном университете (Узбекистан).

Определенный вклад в решение научных проблем совершенствования методов и технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей внесли P. Bechard, S. Narsha, , William T. Tomson, L. Alexandre, , P. Kankar, S. Jang, A. Stavrou, R. Ong, A. Lotze, P. Kauert, C. Enke, L. Walther, T. Barthon, И.Х. Хайруллин, Ф.Р. Исмагилов, К.К. Ким, А.А. Зарифьян, М.А. Гашимов, Д.Ю. Пашали, О.А. Бойкова, З.Г. Гиоев, А.Д. Глущенко, М.Д. Глущенко, В.И. Киселев, В.Н. Жидков, О.Р. Хамидов, А.С. Мазнев, А.В. Грищенко, В.Г. Тонких, М.Ш. Валиев, Н.Е. Конюхов, М.Ф. Зарипов, Н.М. Усмонхўжаев, Н.Б. Пирматов и др. Усилиями этих ученых разработаны и развиты теоретические основы проектирования и совершенства методов и технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей, предложены и внедрены в производство оригинальные конструкции и схемные решения этих систем и их технических средств. Вместе с этим не уделено достаточного внимания совершенствованию методов функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей за счет разработки математических диагностических моделей и технических средств с повышенной чувствительностью, точностью и линейностью статических характеристик.



**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта №3 «Совершенствование средств диагностики технического состояния электрооборудования тяговых подстанций и контактной сети электрических железных дорог» (2018-2020).

**Целью исследования** является повышение эффективности эксплуатации тяговых асинхронных двигателей электровозов путем совершенствования методов и технических средств их функциональной диагностики.

**Задачи исследования:**

сравнительный анализ существующих методов и технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей электровозов;

обоснование последовательность выбора и измерения диагностических параметров тяговых асинхронных двигателей электровозов;

совершенствование технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей электровозов;

разработка математических диагностических моделей тяговых асинхронных двигателей электровозов;

разработка математических моделей новых технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей электровозов;

исследование основных характеристик систем функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей электровозов и их технические средства.

**Объектом исследования** являются системы функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей электровозов и их технических средств.

**Предметом исследования** является разработка усовершенствованных методов и технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей электровозов, а также изучение их основных характеристик.

**Методы исследований.** В процессе исследований использованы теория электрических и магнитных цепей с распределенными параметрами, методы инженерного творчества, энергоинформационные модели цепей различной физической природы и аппарат параметрических структурных схем, а также теория погрешностей. Теоретические расчеты проводились с применением компьютерной техники, а также использовались экспериментальные методы исследований.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

разработана последовательность выбора и измерения диагностических параметров тяговых асинхронных двигателей электровозов;

разработаны новые измерительные технические средства с повышенной чувствительностью, точностью и линейностью статических характеристик для систем функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей электровозов;

разработаны математические диагностические модели тяговых асинхронных двигателей электровозов с учетом взаимодействия обмоток статора, ротора и магнитопровода, также влияния окружающей среды;

разработаны математические модели новых технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей электровозов с учетом распределенности параметров и нелинейности кривой намагничивания их цепей.

**Практические результаты исследования** заключаются в:

разработке с целью идентификации процесса диагностирования на компьютере логических реализации функций выбора технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей и матрицы их инцидентов;

разработке с целью автоматизации процесса функционального диагностирования тяговых асинхронных двигателей алгоритм функционального диагностирования их нормально функционирующих и неисправных блоков.

**Достоверность полученных результатов исследования** обосновывается корректным применением основных законов, теорий и методов расчета цепей и систем, а также подтверждается совпадением теоретических и экспериментальных результатов.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования характеризуется разработанными математическими моделями новых технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей электровозов с учетом распределенности параметров электрических и магнитных цепей, а также нелинейности кривой намагничивания ферромагнитного материала.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что созданное устройство функциональной диагностики для определения технического состояния тяговых асинхронных двигателей имеет высокую достоверность, разработанные измерительные технические средства имеют повышенную чувствительность, точность и линейность статической характеристики, а полученные математические модели обеспечивают повышение достоверности методов функциональной диагностики и позволяют теоретически исследовать системы функциональной диагностики и их технические средства.

**Внедрение результатов исследования.** На основе совершенствования методов и технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей электровозов:

получен патент Агентства по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан на магнитоупругий датчик усилий (№ IAP 04866 – 2014 г.). В результате создано устройство для преобразования параметров

вибрации тягового асинхронного двигателя в электрический сигнал с повышенной чувствительностью, точностью и линейностью статической характеристики;

разработанное устройство функциональной диагностики внедрено в производственный процесс диагностирования и контроля технического состояния тягового асинхронного двигателя электровоза в локомотивном депо «Ўзбекистон» АО «Ўзбекистон темир йўллари». Ожидаемый экономический эффект от внедрения нового устройства за счет повышения достоверности функционального диагностирования и контроля технического состояния тягового асинхронного двигателя составил 205,503 млн. сум (справка АО «Ўзбекистон темир йўллари» от 05 августа 2020 года №01/2692-20).

**Апробация результатов исследования.** Результаты данного исследования прошли апробацию на 8 международных научных конференциях, в том числе на 3, включенных в перечень SCOPUS.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 22 научных работ, в том числе 11 статей в зарубежных и республиканских периодических научных журналах, а также получены 3 патента РУз на изобретение.

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

## 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 технологии республики, излагаются научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о внедрениях результатов научных исследований в производство и учебный процесс.

**В первой главе – «Состояние вопроса и постановка задачи исследований»** – изучены причины выхода из строя тяговых асинхронных двигателей (ТАД) электровозов переменного тока, выявлены предъявляемые требования к системам функциональной диагностики (СФД) и к их техническим средствам, применяемые для контроля и оценки технического состояния ТАД. Установлено, что СФД должна эффективно и надежно функционировать при различных режимах ТАД, процесс диагностирования должен совмещаться с рабочем временем объекта и иметь возможность автоматизации, не требовать демонтажа объекта, а также показания СФД не должны зависеть от различных индустриальных помех.

Сравнительной оценкой основных показателей современных методов функциональной диагностики установлено целесообразность комплексного

применения электрических, тепловых, вибрационных и магнитных методов функциональной диагностики. Анализ основных характеристик измерительных технических средств (ИТС) СФД показал, что наиболее полно предъявленным требованиям соответствуют ИТС электромагнитного принципа действия.

Вместе с этим показано, что существующие СФД, непрерывно оценивающие техническое состояние ТАД, имеют ограниченные возможности, а их существующие ИТС имеют относительно низкую чувствительность, точность и узкий линейный участок статической характеристики. Поэтому дальнейшие исследования должны быть направлены на создание СФД с расширенными функциональными возможностями контроля и оценки технического состояния ТАД, на разработку ИТС с повышенной чувствительностью, точностью и широким линейным участком статической характеристики.

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

**Вторая глава – «Совершенствование методов и технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей электровозов»** – посвящена выбору диагностических параметров ТАД, разработке алгоритма их функционального диагностирования, а также разработкам новых конструктивных и схемных решений ИТС СФД с повышенной чувствительностью, точностью и широким линейным участком статической характеристики.

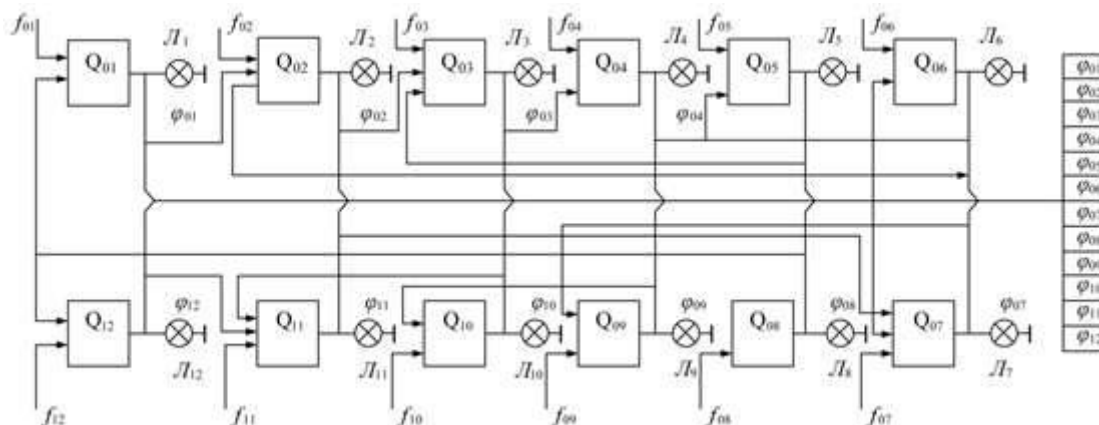
Показано, что приоритетными факторами при выборе диагностического параметра функциональной диагностики ТАД являются возможность его измерения и информативность, т.е. он должен нести существенную информацию о дефектах и неисправностях в ТАД, а потом его инвариантность, т.е. независимость параметра от различного рода внешних и внутренних помех.

На основе блок-схемы технических средств общей функциональной диагностики ТАД с целью идентификации процесса диагностирования на компьютере были разработаны логическая реализация функций выбора технических средств диагностики и матрицы их инцидентов (рис.1).

С целью автоматизации процесса функционального диагностирования ТАД разработан алгоритм функционального диагностирования их нормально функционирующих и неисправных блоков.

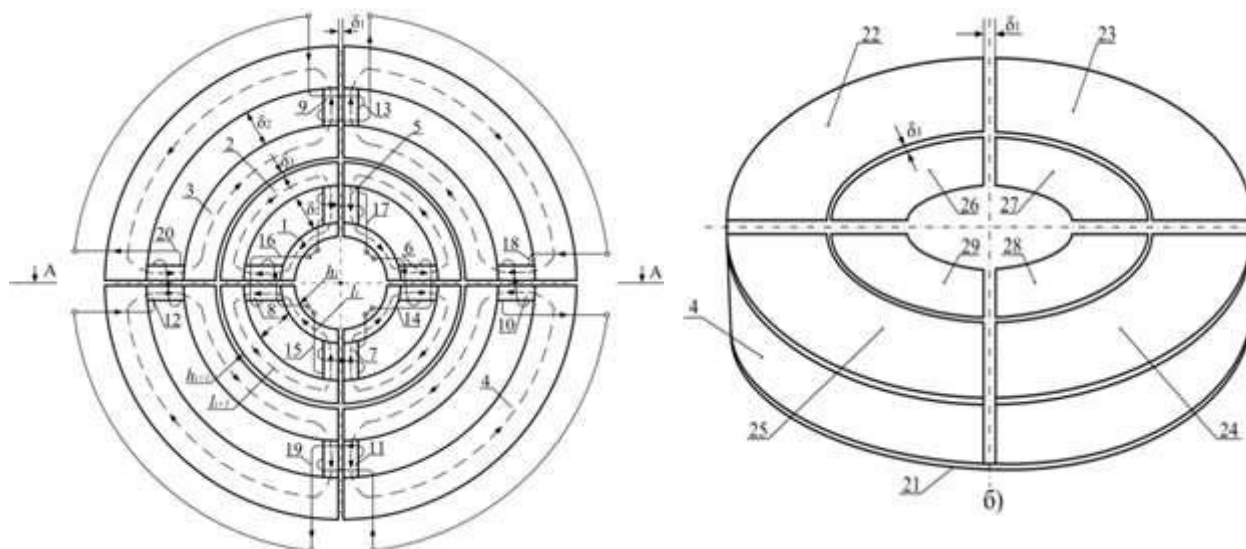
С целью повышения достоверности СФД ТАД разработаны новые конструкции ИТС для измерения параметров вибрации, тока и напряжения, а также параметров магнитного поля с повышенной чувствительностью, точностью и широким линейным участком статической характеристики. На рис.2 приведена конструктивная схема усовершенствованного ИТС, преобразующего параметры вибрации корпуса ТАД в пропорциональные электрические сигналы. Благодаря расположению кольцевых магнитопроводов на одной горизонтальной плоскости коаксиально и с радиальными зазорами и исключению из конструкции громоздких

силопередающих элементов в виде упругих конических втулок, концентрически и взаимно-зеркально расположенных вдоль вертикальной оси в один ряд, существенно уменьшается габаритный размер и упрощается



**Рис.1. Блок-схема технических средств общей функциональной диагностики ТАД и система управления его рабочих режимов:**

$Q_{01} \div Q_{12}$  – локальная система функциональной диагностики для идентификации выходной функции каждого блока ТАД;  $f_{01} \div f_{12}$  – допустимые минимальные и максимальные значения выходных сигналов для различных режимов диагностируемых блоков;  $\varphi_{01} \div \varphi_{12}$  – сигналы, информирующие о техническом состоянии диагностирующих блоков;  $L_{01} \div L_{12}$  – сигнальные лампы.



**Рис.2. Конструктивная схема технического средства, измеряющего параметры вибрации корпуса ТАД:** 1-4 – концентрические сердечники; 5-12 – ферромагнитные перемычки; 13-20 – секции измерительных обмоток; 21 – дискообразная крышка; 22-29 – секторы дискообразной крышки.

конструктивное исполнение датчика, а благодаря разделению кольцевых магнитопроводов на соответствующие секторы, появляется возможность измерять локальные усилия, в результате чего расширяются функциональные возможности технического средства.

**В третьей главе – «Математические модели систем функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей и их технических средств»** – разработаны информационно-математические модели функциональной диагностики, математические диагностические модели тепловых режимов ТАД и математические модели новых ИТС СФД.

С целью анализа тока статора и его частотных спектров, являющийся одним из основных диагностических параметров оценки технического состояния ТАД, спектральная функция разложена в ряд с помощью прямого преобразования Фурье и для каждого ее члена получено следующее выражение спектральной плотности:

$$F(\omega) = \frac{\sigma_\lambda^2}{\alpha} e^{-\sigma_\Phi^2} \left\{ \sigma_\Phi^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sigma_\Phi^2)^n (n + D_{\dot{y}_p})}{n! [(n + D_{\dot{y}_p})^2 + \Omega^2]} + \right. \\ \left. + (1 - 2\sigma_\Phi^2) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sigma_\Phi^2)^n (n+1+D_{\dot{y}_p})}{n! [(n+1+D_{\dot{y}_p})^2 + \Omega^2]} + \sigma_\Phi^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sigma_\Phi^2)^n (n+2+D_{\dot{y}_p})}{n! [(n+2+D_{\dot{y}_p})^2 + \Omega^2]} \right\}, \quad (1)$$

здесь  $\sigma_\lambda^2 = \sigma_\Phi^2 M_{am}^2$ ;  $\sigma_\Phi^2 = \sigma_\lambda^2 M_{\Phi m}^2$ ;  $M_{am}$ ,  $M_{\Phi m}$  – постоянные коэффициенты амплитудных и фазовых модуляций соответственно;  $D_{cp} = \frac{1}{4\alpha} N_\varphi$ ;  $N_\varphi$  – флуктуация фазы;  $\Omega = (\omega - \omega_0)/\alpha$ ;  $\Omega = n/60$  – частота модуляции;  $\omega_0$  – круговая частота напряжения питания;  $n$  – скорость вращения ротора;  $\varphi$  – начальная фаза;  $\omega > 0$ ;  $\alpha$  – независимая случайная величина с известным математическим ожиданием ( $m_\alpha = 0$ ) и дисперсией ( $\sigma^2$ ).

На рис.3 представлены спектры тока статора (график функции  $F(\omega)$ ) ТАД с эксцентритетом. Анализ выражения (1) и ее графика (рис.3) показывает, что при появлении эксцентритета ротора ТАД в токе статора возникают амплитудно-модулированные сигналы. При повреждении стержней ротора или части кольца беличей клетки ТАД, ток статора будет модулирован по амплитуде с частотой, равной величине скольжения ротора.

Анализ графиков спектров тока статора ТАД с различными числами поврежденных стержней ротора (рис.4), полученных с помощью интегрального преобразования Фурье, показал, что с ростом количества поврежденных стержней ротора, в составе основной гармонике тока появляются составляющие с частотой, равной удвоенному значению скольжения.

ТАД рассмотрен как тепловая система, состоящая из трех тел (рис.5, а): обмотка статора (1), магнитопровод (ферромагнитный сердечник) (2) и ротор (3), в которых учтен теплообмен не только между соответствующими телами, но и теплообмен между каждым телом и окружающей средой.

Для расчета переходного процесса в электрической схеме замещения (рис.5, б), эквивалентной трехтельной тепловой схеме, составлена следующая система уравнений в операторной форме с помощью метода узловых потенциалов ( $\varphi_1(p)$ ,  $\varphi_2(p)$  и  $\varphi_3(p)$ ):

$$\begin{cases} Y_{11}(p)\varphi_1(p) - Y_{12}(p)\varphi_2(p) - Y_{13}(p)\varphi_3(p) = J_{11}(p), \\ -Y_{21}(p)\varphi_1(p) + Y_{22}(p)\varphi_2(p) - Y_{23}(p)\varphi_3(p) = J_{22}(p), \\ -Y_{31}(p)\varphi_1(p) - Y_{32}(p)\varphi_2(p) + Y_{33}(p)\varphi_3(p) = J_{33}(p), \end{cases} \quad (2)$$

здесь  $Y_{11}(p) = G_1 + G_{12} + G_{31} + pC_1 - \alpha_\theta \Delta P_{10}$ ;  $Y_{22}(p) = G_2 + G_{12} + G_{23} + pC_2$ ;  $Y_{33}(p) = G_3 + G_{23} + G_{31} + pC_3$ ;  $Y_{12}(p) = Y_{21}(p) = G_{12}$ ;  $Y_{13}(p) = Y_{31}(p) = G_{31}$ ;  $Y_{23}(p) = Y_{32}(p) = G_{23}$ ;  $J_{11}(p) = J_1(p) + U_{C1}(0)C_1$ ;  $J_{22}(p) = J_2(p) + U_{C2}(0)C_2$ ;  $J_{33}(p) = J_3(p) + U_{C3}(0)C_3$ ;  $J_1(p) = (\Delta P_{10}/p\theta_{cp1})$ ;  $J_2(p) = (\Delta P_{20}/p\theta_{cp2})$ ;  $J_3(p) = (\Delta P_{30}/p\theta_{cp3})$ ; где  $\Delta P_1 = 3I^2 R_0(1 + \alpha_\theta \tau_1)$ ,  $\Delta P_{20}$

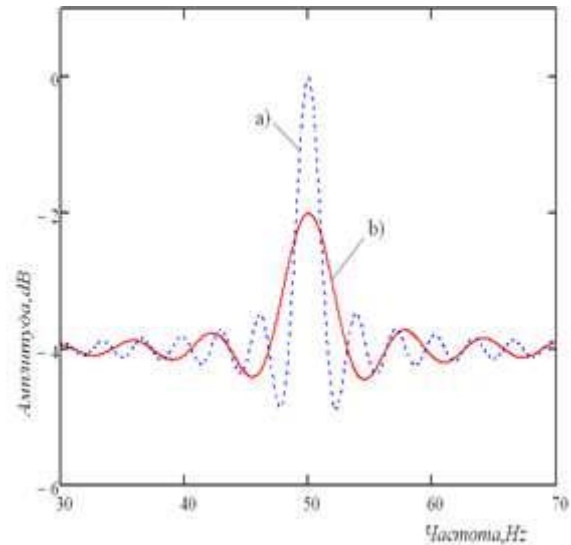
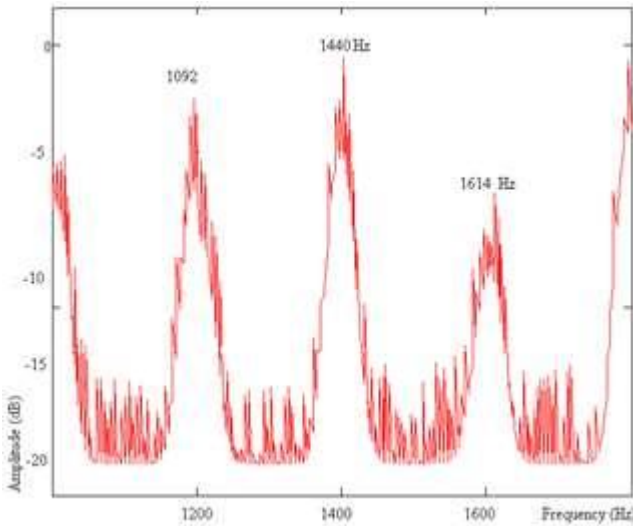
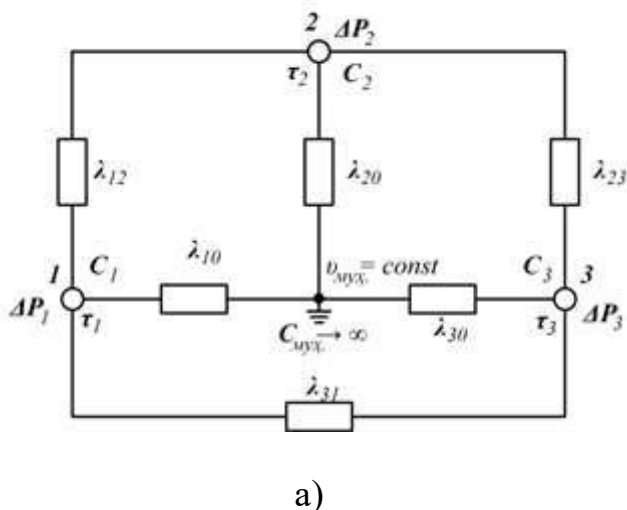
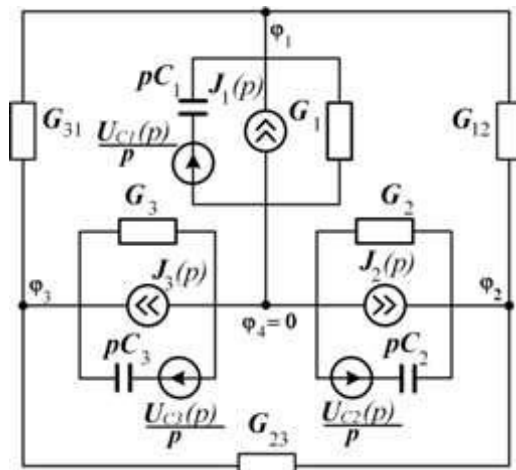


Рис.3. Спектры тока статора ТАД с эксцентритетом

4- расм. Спектры тока статора ТАД для случаев повреждения двух (a) и шести (b) стержней ротора



а)



б)

Рис.5. Тепловая (а) и эквивалентная ей электрическая схема замещения (б) трехфазной системы ТАД

и  $\Delta P_{30}$  – потери активной мощности в соответствующих телах, [Вт];  $I$ ,  $R_0$  – соответственно ток статора и активное сопротивление обмотки при

температуре, равной температуре окружающей среды, [А] и [Ом];  $\alpha_\theta$  – температурный коэффициент материала обмотки, [1/К];  $U_{C1}(0)$ ,  $U_{C2}(0)$ ,  $U_{C3}(0)$  – начальные значения напряжений на соответствующих конденсаторах  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ ;  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_3$  – превышение температуры соответственно обмотки статора, магнитопровода статора и ротора над температурой окружающей среде, [К];  $G_i$  и  $G_{ij}$  – соответственно собственная проводимость  $i$ -го узла и общая проводимость между узлами  $i$  и  $j$  эквивалентной электрической цепи, [Сим];  $\theta_{cp1}$ ,  $\theta_{cp2}$  и  $\theta_{cp3}$  – средние температуры соответствующих тел, [К].

В результате решения системы уравнений (2) и определения соответствующих величин и параметров теплового режима ТАД получены следующие математические диагностические модели ТАД:

$$\tau_{1T} = \frac{\tau_{1H} - \tau_{1K}(1 - k^2)}{1 + \alpha_\theta \tau_{1K}(1 - k^2)}, \quad (3) \quad \tau_{1T} = \tau_{1H} \frac{a + k^2}{1 + a + \alpha_\theta \tau_{1H}(1 - k^2)}, \quad (4)$$

$$k_p = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_H} = e^{B \left( \frac{1}{\tau_{1H} + \vartheta_{мух} + 273} - \frac{1}{\tau_1 + \vartheta_{мух} + 273} \right)}; k_H \leq 1 \text{ ва } k_p \leq 1, \quad (5)$$

здесь  $\tau_{1y}$ ,  $\tau_{1H}$ ,  $\tau_{1K}$  – значения превышения температуры обмотки статора при установившемся, номинальном режимах и при режиме короткого замыкания;  $a = \Delta P_{CH} / \Delta P_{MH}$  – коэффициент потери;  $\Delta P_{CH}$ ,  $\Delta P_{MH}$  – потери активной мощности в стали и медном проводе обмотки при номинальном режиме;  $k = I / I_H$  – кратность тока статора;  $k_H = (a + k^2) / (a + 1)$ ;  $k_p$  – коэффициент расхода ресурса изоляции;  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_H$  – скорость теплового износа изоляции и его номинальное значение, базовый час/час;  $\theta_{1H} = \tau_{1H} + \vartheta_{cp} + 273$  – абсолютное значение номинальной температуры для данного класса изоляции, [К];  $\theta_{1y} = \tau_{1y} + \vartheta_{cp} + 273$  – значение абсолютной установившейся температуры для данного класса изоляции, [К];  $B$  – показатель, характеризующий изоляцию данного класса.

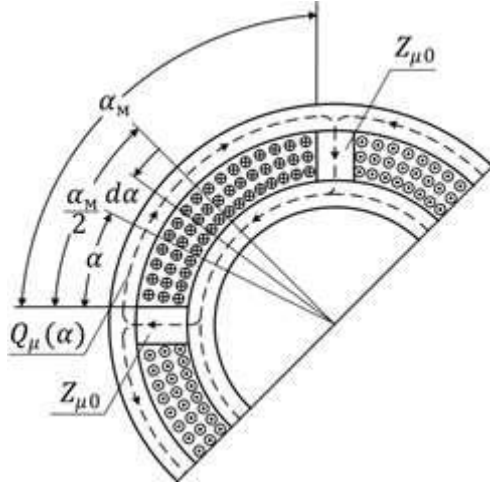
Анализ полученных математических диагностических моделей ТАД показывает, что установившееся превышение температуры обмотки статора ТАД зависит от кратности тока обмотки статора, коэффициента потерь и температурного коэффициента сопротивления материала проводника обмотки.

Разработаны математические модели новых, рекомендованных для применения в СФД ТАД, электромагнитных ИТС. Для этого анализ магнитных цепей новых ИТС произведен без учета и с учетом распределенности обмоток по длине цепи, а также без и с учетом нелинейности кривой намагничивания ферромагнитного сердечника. Для наиболее сложного случая, когда секции обмоток распределены по длине магнитной цепи и учтено влияние нелинейности кривой намагничивания (рис.6), классическим методом составления и решения дифференциальных уравнений получено выражение математической модели в виде зависимости магнитного потока  $Q_\mu(\alpha)$  от параметров источника питания, электромагнитных цепей и координаты:

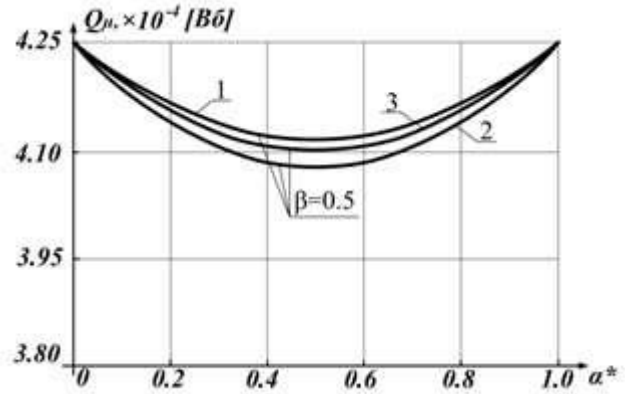


$$Q_{\mu}(\alpha) = \frac{K_1 \gamma^2}{b_1} ch \left[ \gamma \left( \frac{1}{2} \alpha_M - \alpha \right) \right] - \frac{b_2 K_1^3}{b_1} ch^3 \left[ \gamma \left( \frac{1}{2} \alpha_M - \alpha \right) \right], \quad (6)$$

здесь  $K_1 = \frac{(2Z_{\mu\pi} F_B - Z_{\mu 0} f_B)}{Z_{\mu 0} Z_{\mu\pi} \Delta} \left[ sh \left( \frac{1}{2} \gamma \alpha_M \right) + \frac{\gamma}{Z_{\mu 0} C_{\mu\pi}} ch \left( \frac{1}{2} \gamma \alpha_M \right) \right]$ , [Вб];



а)



б)

**Рис.6. Магнитная цепь ИТС с распределенной секцией обмоток (а) и кривые зависимости  $Q_{\mu} = f(\alpha^*)$  (б):** 1 – без учета нелинейной зависимости  $B = f(H)$  ферромагнитного материала; 2 – с учетом этой нелинейной зависимости; 3 – экспериментальная

$Z_{\mu\pi 1} = \frac{0,5\pi r_{1cp}}{\mu\mu_0 b h_1 \alpha_M} = Z_{\mu\pi 2} = \frac{0,5\pi r_{2cp}}{\mu\mu_0 b h_2 \alpha_M} = Z_{\mu\pi} \left[ \frac{1}{\Gamma_{H-град}} \right]$  и  $C_{\mu\pi} = \mu_0 \frac{0,25b\pi(r_{1cp}+r_{2cp})}{\delta_p \alpha_M}$ ,  $\left[ \frac{\Gamma_H}{град} \right]$  – погонные значения комплексного магнитного сопротивления ферромагнитных сердечников и магнитной емкости между ними, приходящиеся на единицу угла магнитной цепи;  $r_{1cp}$ ,  $r_{2cp}$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $b$  и  $\delta_p$  – соответственно средние радиусы, толщин, длина ферромагнитных сердечников и рабочий зазор между ними;  $\mu$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ , [Гн/м] – соответственно относительная магнитная проницаемость материала ферромагнитного сердечника и абсолютное значение магнитной проницаемости воздуха (магнитная постоянная);  $\alpha$ ,  $\alpha_M$  – угловая координата и ее максимальное значение;  $F_B$ ,  $f_B$  – магнитодвижущая сила равномерно распределенной секции обмотки возбуждения и ее погонное значение, приходящейся на единицу угла  $\alpha$ ;  $\gamma = \sqrt{2Z_{\mu\pi} C_{\mu\pi}}$ , [1/град] – коэффициент распространения магнитного потока по магнитной цепи;  $Z_{\mu 0}$  – магнитное сопротивление ферромагнитных перемычек;  $b_1 = a_1 \frac{\pi r_{cp}}{S_{\mu} \alpha_M} C_{\mu\pi}$ , [1/град<sup>2</sup>];  $b_2 = a_2 \frac{\pi r_{cp}}{S_{\mu}^3 \alpha_M} C_{\mu\pi}$ , [1/(Тл<sup>2</sup> · м<sup>4</sup> град<sup>2</sup>)];  $r_{cp} = 0,5(r_{1cp} + r_{2cp})$ ;  $\Delta = \left[ \left( 1 + \frac{\gamma^2}{Z_{\mu 0}^2 C_{\mu\pi}^2} \right) sh(\gamma \alpha_M) + \frac{\gamma}{Z_{\mu 0} C_{\mu\pi}} ch(\gamma \alpha_M) \right]$ , [-].

Анализ полученных математических моделей и их кривых (рис.6, б) показывает, что при расчете магнитной цепи ИТС с учетом распределенности обмоток, но без учета нелинейности кривой намагничивания материала магнитопровода, результаты расчета отличаются от экспериментальных на  $10 \div 12 \%$ , а с учетом нелинейности кривой намагничивания материала магнитопровода – на  $5 \div 7 \%$ .

**В четвертой главе – «Основные характеристики систем функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей»** – изучены статические и динамические характеристики, погрешность разработанных ИТС, достоверность СФД, а также приведены результаты экспериментальных исследований разработанного устройства функциональной диагностики ТАД.

Получены аналитические уравнения статических характеристик магнитоупругого ИТС параметров вибрации с сосредоточенными и распределенными обмотками, а также без учета и с учетом нелинейности основной кривой намагничивания:

$$E_{\text{вых.1}} = 2j\omega W Q_{\mu}(0) = 2j\omega W K_0(I'_M) ch \left[ \frac{1}{2} \beta(I'_M) \right], \quad (7)$$

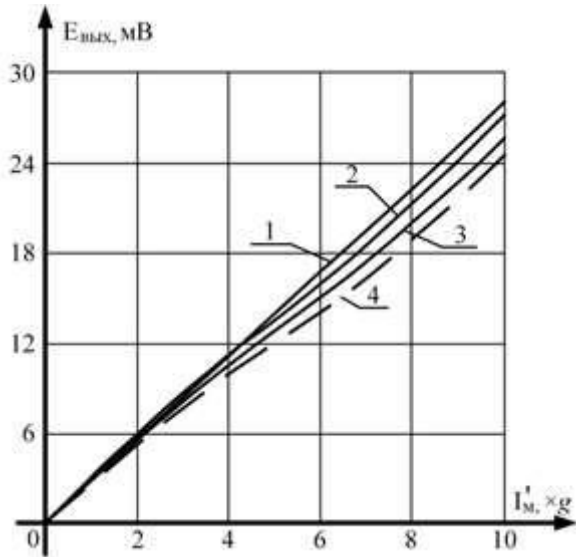
$$E_{\text{вых.2}} = 2j\omega W \left\{ \frac{K_0(I'_M) \beta^2(I'_M)}{b_1 \alpha_M^2} ch \left[ \frac{1}{2} \beta(I'_M) \right] - \frac{b_2 K_0^3(I'_M)}{b_1} ch^3 \left[ \frac{1}{2} \beta(I'_M) \right] \right\}, \quad (8)$$

$$E_{\text{вых.3}} = \frac{2j\omega W_{\text{пог.}} K_1(I'_M)}{\beta(I'_M) b_1 \alpha_M} \left\{ \beta^2(I'_M) - 2b_2 \alpha_M^2 K_1^2(I'_M) \left[ 1 + \frac{1}{3} ch^2 \left[ \frac{1}{2} \beta(I'_M) \right] \right] \right\}, \quad (9)$$

здесь  $K_0 = \frac{2F_B}{Z_{\mu 0 \Delta}} \left[ sh \left( \frac{1}{2} \gamma \alpha_M \right) + \frac{\gamma}{Z_{\mu 0} c_{\mu \Pi}} ch \left( \frac{1}{2} \gamma \alpha_M \right) \right]$ , [Вб];  $W$ ,  $W_{\text{пог.}}$  – количество витков в секции обмотки и ее погонное значение;  $I'_M$  – виброускорение, [м/с<sup>2</sup>];

Анализ уравнений (7), (8), (9) и их кривых, а также экспериментальной кривой статической характеристики (рис.7) показал, что учет при выводе аналитических выражений функции преобразования нового магнитоупругого ИТС параметров вибрации, распределенности секции обмоток по координате  $\alpha$  и нелинейности основной кривой намагничивания материала магнитопровода позволяет снизить погрешность расчета на 13–15 %.

Динамические характеристики разработанных ИТС СФД исследованы на примере магнитоупругого ИТС параметров вибрации при следующих четырех типовых режимах (воздействиях): 1) ИТС питается от источника постоянного напряжения ( $U_{\text{э.в.}}$ ), а на его вход подается виброускорение  $I'_M(t) = I'_{Mm} \sin \omega_M t$ ; 2) ИТС питается от источника синусоидального напряжения  $U_{\text{э.в.}}(t) = U_{\text{э.в.}m} \sin \omega_{\text{э}} t$ , а на его вход подается виброускорение  $I'_M(t) = I'_{Mm} \sin \omega_M t$ ; 3) на вход ИТС действует виброускорение  $I'_M(t) = I'_{Mm} \sin \omega_M t$ , а оно подключается к источнику постоянного напряжения; 4) на вход ИТС действует виброускорение  $I'_M(t) = I'_{Mm} \sin \omega_M t$ , а оно подключается к источнику синусоидального напряжения.



**Рис.7. Статические характеристики разработанного магнитоупругого ИТС:** 1 – без учета распределенности секции обмоток и нелинейности основной кривой намагничивания материала магнитопровода; 2 – без учета распределенности секции обмоток, но с учетом нелинейности основной кривой намагничивания; 3 – с учетом распределенности секции обмоток и нелинейности основной кривой намагничивания; 4 – экспериментальная статическая характеристика

Получены выражения переходного напряжения для этих режимов. В частности, для второго режима, выражение переходного напряжения имеет следующий вид (рис.8):

$$U_{э.чик.2}(t) = -A_2 e^{-\delta_{э\mu} t} \left\{ \sin \left[ \left( \omega_{э} - \sqrt{\delta_{э\mu}^2 - \omega_{\mu}^2} \right) t - \varphi_1 \right] + \right. \\ \left. + \sin \left[ \left( \omega_{э} + \sqrt{\delta_{э\mu}^2 - \omega_{\mu}^2} \right) t + \varphi_1 \right] \right\} + B_1 \left\{ \sin \left[ \left( \omega_{э} - \omega_M \right) t - \varphi_M \right] + \right. \\ \left. + \sin \left[ \left( \omega_{э} + \omega_M \right) t + \varphi_M \right] \right\}, \quad (10)$$

$$\text{здесь } A_2 = \frac{k U_{э.вм.} I'_{мт} \omega_M \sqrt{2\delta_{э\mu}^2 - \omega_{\mu}^2}}{2 \sqrt{(\delta_{э\mu}^2 - \omega_{\mu}^2) \left( 4\delta_{э\mu} \sqrt{(\delta_{э\mu}^2 - \omega_{\mu}^2)} \right)^2 + [2(\delta_{э\mu}^2 - \omega_{\mu}^2) + (\omega_{\mu}^2 + \omega_M^2)]^2}}, \quad [B];$$

$$B_1 = \frac{k U_{э.в.} I'_{мт} \omega_M}{\sqrt{4\delta_{э\mu}^2 \omega_M^2 + (\omega_{\mu}^2 - \omega_M^2)^2}}, \quad [B]; \quad k = \omega_{\mu}^2 K_{I_3 U_{\mu}} K_{I_{\mu} U_3} G_3 K_{U_M C_{\mu}} L_M, \quad [\Gamma\text{H}/(\text{M} \cdot \text{Om})];$$

$$2\delta_{э\mu} = \omega_{\mu}^2 (T_3 + T_{\mu}), \quad [c^{-1}]; \quad T_3 = K_{I_3 U_{\mu}} K_{I_{\mu} U_3} G_3 C_{\mu\Sigma}, \quad [c]; \quad T_{\mu} = R_{\mu} C_{\mu\Sigma}, \quad [c];$$

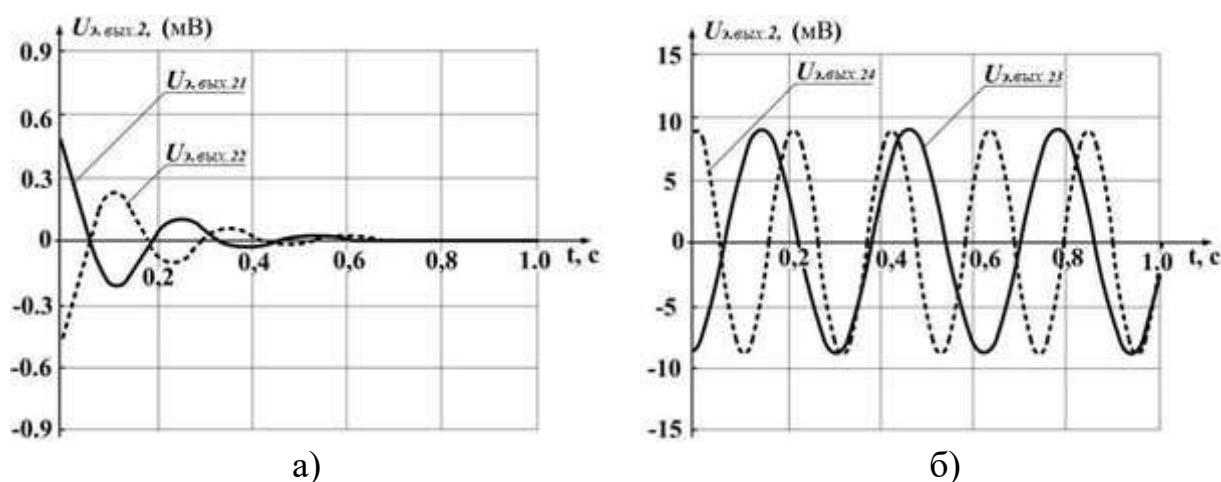
$$\omega_{\mu}^2 = (1/L_{\mu} C_{\mu\Sigma}), \quad [c^{-2}]; \quad \varphi_1 = \text{arch} \frac{(\omega_{\mu}^2 - \omega_M^2) \sqrt{(\delta_{э\mu}^2 - \omega_{\mu}^2)}}{\delta_{э\mu} (\delta_{э\mu}^2 + \omega_{\mu}^2)}; \quad \varphi_M = \text{arctg} \frac{2\delta_{э\mu} \omega_M}{(\omega_{\mu}^2 - \omega_M^2)}.$$

Анализ выражения (10) и его графиков (рис.8) переходного процесса показал, что при подаче виброускорения на вход ИТС, питаемого от источника синусоидального напряжения, переходное напряжение состоит из суммы следующих четырех составляющих: двух свободных гармонических составляющих (рис.8, а), убывающих по амплитуде с показателем  $\delta_{э\mu}$  и с частотами, равными соответственно разности и суммы частоты напряжения питания и частоты, определяемой параметрами электрических и магнитных цепей ИТС, а также двух установившихся составляющих с частотами, равными соответственно разности и суммы частот напряжения питания и

вибрации (рис.8, б).

Анализ погрешности измерения разработанных ИТС, рекомендуемых для применения в СФД ТАД, на примере магнитоупругого ИТС показал, что относительная приведенная погрешность разработанного магнитоупругого ИТС параметров вибрации не превышает  $\pm 0,5\%$ .

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования разработанного устройства функциональной диагностики, созданного с учетом усовершенствованных методов и технических средств и основанного на анализе величин и спектров гармонических составляющих тока статора, вибрации корпуса и внешнего магнитного поля ТАД показали, что созданное устройство функциональной диагностики с достаточной достоверностью позволяет оценить техническое состояние ТАД.



**Рис.8. Графики переходного процесса для режима подачи на вход ИТС виброускорения  $I'_M(t) = I'_{Mm} \sin \omega_M t$ , питаемого от источника синусоидального напряжения**

Разработанное устройство функциональной диагностики внедрено в производственный процесс диагностирования и контроля технического состояния тягового асинхронного двигателя электровоза в локомотивном депо «Ўзбекистон» АО «Ўзбекистон темир йўллари». Ожидаемый экономический эффект от внедрения нового устройства за счет повышения достоверности функционального диагностирования и контроля технического состояния тягового асинхронного двигателя составил 205,503 млн (двести пять миллионов пятьсот три тысячи) сум. Конструктивные и принципиальные схемы разработанных устройств функциональной диагностики и их технических средств, а также усовершенствованные методы функциональной диагностики технических систем включены в учебник, подготовленный в соавторстве соискателя по учебной дисциплине «Диагностика и контроль технического состояния объектов тягового электроснабжения» для магистрантов.

В приложении диссертации приведены основные элементы энергоинформационной модели цепей различной физической природы, технические характеристики межцепных физико-технических эффектов и

внутрицепных параметров, используемых при исследовании разработанных ИТС, а также акты внедрения и справки об использовании результатов научных исследований в производство.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сравнительным анализом современных методов функциональной диагностики и их технических средств показано целесообразность комплексного применения электрических, тепловых, вибрационных и магнитных методов и электромагнитных измерительных технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей.

2. На основе блок-схемы технических средств общей функциональной диагностики тягового асинхронного двигателя с целью идентификации и автоматизации процесса диагностирования на ЭВМ, была разработана логическая реализация функций выбора технических средств диагностики, матрицы их инцидентов и алгоритм функционального диагностирования их нормально функционирующих и неисправных блоков.

3. С целью повышения достоверности систем функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей разработаны новые конструкции технических средств для измерения параметров вибрации, тока и напряжения, а также параметров магнитного поля с повышенной чувствительностью, точностью и широким линейным участком статической характеристики.

4. Разработанные математические диагностические модели тягового асинхронного двигателя как тепловую систему, состоящую из трех тел: обмотки статора, магнитопровода и ротора, в которых учтен теплообмен не только между соответствующими телами, но и теплообмен между каждым телом и окружающей средой позволили повысить достоверность диагностирования. Установившееся превышение температуры обмотки статора тягового асинхронного двигателя зависит от кратности тока обмотки статора, коэффициента потерь и температурного коэффициента сопротивления материала проводника обмотки.

5. Разработаны математические модели новых, рекомендованных для применения в системах функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей, электромагнитных измерительных технических средств. Установлено, что учет нелинейности кривой намагничивания ферромагнитного сердечника и распределенности обмоток по длине цепи позволяет повысить адекватность разработанных моделей.

6. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования статических характеристик показали, что учет нелинейности кривой намагничивания ферромагнитного сердечника и распределенности обмоток по длине цепи при получении аналитических выражений функции преобразования разработанных измерительных технических средств позволяет снизить погрешность на 13–15 %.

7. Исследованы динамические характеристики разработанных

измерительных технических средств при различных типовых воздействиях. При подаче виброускорения на вход ИТС, питаемого от источника синусоидального напряжения, переходное напряжение состоит из суммы следующих четырех составляющих: двух свободных гармонических составляющих с частотами, равными соответственно разности и суммы частоты напряжения питания и частоты, определяемой параметрами электрических и магнитных цепей ИТС, а также двух установившихся составляющих с частотами, равными соответственно разности и суммы частот напряжения питания и вибрации.

8. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования разработанного устройства функциональной диагностики, созданного с учетом усовершенствованных методов и технических средств и основанного на анализе величин и спектров гармонических составляющих тока статора, вибрации корпуса и внешнего магнитного поля тяговых асинхронных двигателей показали, что созданное устройство функциональной диагностики с достаточной достоверностью позволяет оценить их техническое состояние в эксплуатационных режимах.

**TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY  
SCIENTIFIC COUNCIL FOR AWARDED  
SCIENTIFIC DEGREES PhD.15/30.12.2019.T.73.01**

---

**TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY**

**FAYZULLAEV JOVKHARBEK SULTON UGLI**

**IMPROVEMENT OF METHODS AND TECHNICAL MEANS OF  
FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF TRACTOR ASYNCHRONOUS  
MOTORS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES**

**05.08.05 – Rolling stock, draft of trains and electrification**

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

**Tashkent – 2020**

The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under № B2020.3.PhD/T1475.

The dissertation has been prepared at Tashkent state transport university.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of the Scientific Council (<http://tstu.uz>) and on the web site of «ZiyoNet» Information and education portal ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

**Scientific supervisor:**

**Khalikov Abdulxak Abdulxairovich**  
Doctor of technical sciences, professor

**Official opponents:**

**Pirmatov Nurali Berdiyarovich**  
Doctor of technical sciences, professor

**Valiyev Mukhammad Sheraliyevich**  
Candidate of technical sciences, docent

**Leading organization:**

**OOO «Scientific and Technical Center»  
JSC «Uzbekenergo»**

The defense will be take place « 17 » 10 2020 at 10<sup>00</sup> at the meeting of Scientific Council at the Scientific Council PhD.15/30.12.2019.T.73.01 Tashkent state transport university. Address: 1, Temiryo'Ichilar str., Tashkent 100167, Uzbekistan. Phone: (+998 71) 299-00-01, fax: (99871) 293-57-57, e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be reviewed at the Information-Resource Center of the Tashkent state transport university (Registration number - 013 ). (Address: 1, Temiryo'Ichilar str., Tashkent 100167, Uzbekistan. Phone: (+998 71) 299-05-66)

Abstract of dissertation was distributed on « 09 » 10 2020 year.

(mailing record № 014 on « 09 » 10 2020 year)



**A.I. Adilkhodjaev**  
Chairman of Scientific Council  
on awarding scientific degrees,  
Doctor of technical sciences, professor

**Ya.O. Ruzmetov**  
Scientific secretary of the Scientific Council  
on awarding scientific degrees,  
Candidate of technical sciences

**Sh.S. Fayziboyev**  
Chairman of the scientific seminar  
under Scientific Council on  
awarding scientific degrees,  
Doctor of technical sciences, professor



## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**The aim of the study** is to increase the efficiency of operation of traction asynchronous motors of electric locomotives by improving methods and technical means of their functional diagnostics.

**Tasks of the research:**

- comparative analysis of existing methods and technical means of functional diagnostics of traction asynchronous motors of electric locomotives;
- selection of diagnostic parameters of traction asynchronous motors of electric locomotives;
- improvement of technical means of functional diagnostics of traction asynchronous motors of electric locomotives;
- development of mathematical diagnostic models of traction asynchronous motors of electric locomotives;
- development of mathematical models of new technical means of functional diagnostics of traction asynchronous motors of electric locomotives;
- research of the main characteristics of systems for functional diagnostics of traction asynchronous motors of electric locomotives and their technical means.

**Object of their search** is the main technical characteristics of functional diagnostics systems for traction asynchronous motors of electric locomotives and their technical means.

**Scientific novelty of the research** is as following:

- developed a sequence for selecting diagnostic parameters of traction asynchronous motors of electric locomotives;
- developed new measuring tools with increased sensitivity, accuracy and linearity of static characteristics for functional diagnostics systems of traction asynchronous motors of electric locomotives;
- developed mathematical diagnostic models of traction asynchronous motors of electric locomotives, taking into account the interaction of stator windings, rotor and magnetic circuit, as well as the influence of the environment;
- developed mathematical models of new technical means of functional diagnostics of traction asynchronous motors of electric locomotives, taking into account the distribution of parameters and nonlinearity of the chain magnetization curve;
- the main characteristics of systems of functional diagnostics of traction asynchronous motors of electric locomotives and their technical means are investigated.

The novelty of technical solutions is confirmed by three patents of the Republic of Uzbekistan for inventions.

**The structure and volume of the research work.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references, an appendix. The volume of the dissertation is 128 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**  
**I бўлим (I часть; I part)**

1. K.K. Juraeva., J.S. Fayzullaev. Mathematical models of magnetic circuits of sensors of functional diagnostic systems of electric carriers // IOP Conference Series Materials Science and Engineering –Vol.537 – 2019. –P. 062026.
2. J.S. Fayzullaev., K.K. Juraeva. The transfer function of a traction asynchronous motor controlled by a four-square converter // IOP Conference Series Materials Science and Engineering – Vol.734 – 2020. –P. 012195.
3. Khalikov. A.A., Fayzullayev J.S. The study of the error of the technical means of functional diagnostics of traction induction motors by the method of parametric structural schemes/IV International Multidisciplinary Conference “Recent Scientific Investigation”. Proceedings of the Conference – Shawnee, USA, 2020.-P. 95-103.
4. Патент РУз (UZ) № IAP 04866. Магнитоупругий датчик усилий/Амиров С.Ф., Назирова З.Г., Жураева К.К., Болтаев О.Т., Шарапов Ш.А., Файзуллаев Ж.С.//Расмий ахборотнома, 2014. - №4.
5. Патент РУз (UZ) № IAP 05432. Магнитоупругий датчик усилий/Амиров С.Ф., Турдибеков К.Х., Жураева К.К., Болтаев О.Т., Файзуллаев Ж.С.// 2017г.Расмий ахборотнома, 2017. - №7.
6. Патент РУз (UZ) № 05590. Измерительный преобразователь постоянного тока Амиров С.Ф., Турдибеков К.Х, Рустамов Д.Ш., Атауллаев Н.О., Файзуллаев Ж.С.// Расмий ахборотнома. – 2018. №5.
7. Халиков А.А., Файзуллаев Ж.С. Исследование погрешности технических средств функциональной диагностики тяговых асинхронных двигателей методом параметрических структурных схем/Universum: технические науки: научный журнал – Москва, 2020. № 7(76). – С. 47-51.
8. Жураева К.К., Файзуллаев Ж.С. Математическая модель магнитной цепи новых магнитоупругих датчиков усилий// Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2017. – №2/3. – С. 82-88.
9. Якубов М.С., Мухамедова З.Г., Исроилов У.Ш., Файзуллаев Ж.С. Методологические аспекты непрерывного контроля и диагностики тягового электрооборудования с применением методов спектрального анализа. Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление».- Ташкент, 2018, № 1-2. – С.85-90.
10. Якубов М.С., Файзуллаев Ж.С. Диагностирование эксплуатационного режима тягового трёхфазного асинхронного электродвигателя. Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики».- Ташкент, 2018, № 5. – С.65-71.
11. Якубов М.С., Файзуллаев Ж.С. Информационно-математическая модель диагностирования эксплуатационного режима тягового электродвигателя. Международный научно-технический журнал

«Химическая технология. Контроль и управление».- Ташкент, 2018, № 3. – С. 85-90.

12. Файзуллаев Ж.С., Жураева К.К. Исследование магнитных цепей датчиков для диагностирования оборудований электроподвижного состава. Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление».- Ташкент, 2019, № 1(85). – С.34-40.

13. Файзуллаев Ж.С. Тортувчи асинхрон моторларни функционал диагностика усулларининг қиёсий таҳлили// ТТЙМИ ахборотномаси. – Тошкент, 2019. – №4. – С. 96-101.

14. Авезова Н.Р., Файзуллаев Ж.С. Математические модели тепловых процессов тяговых асинхронных двигателей для диагностики и контроля их технического состояния. Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление».- Ташкент, 2020, № 2(92). – С.28-36.

15. Файзуллаев Ж.С. Трехтельная тепловая модель тяговых асинхронных двигателей для диагностики их технического состояния// Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2020. - №1. – С.83-88.

16. Якубов М.С., Файзуллаев Ж.С. Оптимизация периодичности технической диагностики, обслуживания и ремонта тягового электрооборудования электровозов. Журнал ТашГТУ «Проблемы энерго- и ресурсосбережения». Ташкент, 2020 г. –№1/2. – С.123-129.

17. Якубов М.С., Файзуллаев Ж.С. Передаточная функция тягового асинхронного двигателя, управляемого четырехквadrантным преобразователем, как звена функционального диагностирования //Вестник ТашИИТ. – Ташкент, 2020. – №3. – С. 82-88.

## **II- бўлим (II- часть; II- part)**

18. Файзуллаев Ж.С. О датчиках тока для функциональной диагностики тяговых электродвигателей электровозов// Научные труды IV-й Международной научно-практической конференции 11-12 октября, 2018 г. Гомель – 2018. С. 69-70.

19. Жураева К.К., Файзуллаев Ж.С. О магнитоупругих датчиках усилий для диагностики загруженности колесных пар электроподвижного состава// Научные труды IV-й Международной научно-практической конференции, 2018 г. Часть 1, Республика Беларусь, Гомель, 2018. -С. 29-31.

20. Жураева К.К., Файзуллаев Ж.С. Электромагнитные датчики усилий и тока для функциональной диагностики электрооборудования// Научные труды третьей международной научно-практической конференции «Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики железнодорожного транспорта», 2018 г. Омск – 2018. -С. 68-71.

21. Жураева К.К., Файзуллаев Ж.С. Исследование погрешности разработанных магнитоупругих датчиков усилий методом параметрических структурных схем/Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации/II- *Международная научно-техническая*

*конференция*, посвященная 90-летию со дня рождения профессора Зарипова Мадияра Фахритдиновича. Уфа, УГАТА, 2019. -С. 50-54.

22. Амиров С.Ф., Авезова Н.Р., Файзуллаев Ж.С. Диагностические-математические модели тяговых асинхронных двигателей / Международный научный электронный журнал «Транспорт шёлкового пути» - Ташкент, 2020. - № 2. – С. 195-202.

Автореферат «ТДТУ хабарномаси» илмий-амалий журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнларни ўзаро мослиги текширилди.

---

Қоғоз бичми 84x60-1/16 Ризограф босма усули Times гарнитураси  
Шартли босма табағи: 2,75 б.т. Адади: 100 нусха. Буюртма № 7-19/2020  
Нашрга рухсат этилди: 07.10. 2020 й.

Тошкент давлат транспорт университети босмахонасида чоп этилди.  
100167, Тошкент шаҳри, Темирийўлчилар кўчаси, 1-уй.