

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

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

ХАЛБУТАЕВА АЗИЗА КАМАЛИДДИНОВНА

**СИНХРОН МОТОРНИНГ ЎТКИНЧИ ЖАРАЁНЛАРИГА МАГНИТ
ЎЗАК ТЎЙИНИШИНИНГ ТАЪСИРИНИ ТАҲЛИЛ ҚИЛИШ**

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

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

УЎК 621.313

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

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

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

Халбутаева Азиза Камалиддиновна

Синхрон моторнинг ўткинчи жараёнларига магнит ўзак тўйинишининг таъсирини таҳлил қилиш..... 3

Халбутаева Азиза Камалиддиновна

Анализ влияния насыщения магнитопровода на переходные процессы синхронного двигателя..... 23

Xalbutayeva Aziza Kamaliddinovna

Analysis of the effect of magnetic core saturation on the transient processes of a synchronous motors..... 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 47

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

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

ХАЛБУТАЕВА АЗИЗА КАМАЛИДДИНОВНА

**СИНХРОН МОТОРНИНГ ЎТКИНЧИ ЖАРАЁНЛАРИГА МАГНИТ
ЎЗАК ТЎЙИНИШИНИНГ ТАЪСИРИНИ ТАҲЛИЛ ҚИЛИШ**

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

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

Тошкент – 2025

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг мавзуси Ўзбекистон Республикаси Олий таълим, фан ва инновациялар вазирлиги ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2023.2.PhD/Т922 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) илмий кенгаш веб-саҳифаси (www.tdtu.uz) ҳамда «ZiyoNet» ахборот-таълим порталида (www.ziyo.net.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:	Пирматов Нурали Бердиёрович техника фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	Бобожанов Махсуд Қаландарович техника фанлари доктори, профессор Ишназаров Ойбек Хайрилаевич техника фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	Тошкент давлат транспорт университети

Диссертация ҳимояси Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университети ҳузуридаги DSc.03/10.12.2019.T.03.03 рақамли илмий кенгашнинг 2025 йил “13” декабрь соат 10:30 даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2. Тел.: (99871) 207-07-32; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tsu_info@edu.uz).

Диссертация билан Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (38 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси., 2. Тел.: (99871) 207-14-70).

Диссертация автореферати 2025 йил “25” 11 кун тарқатилди.
(2025 йил “24” 11 даги 9 рақамли реестр баённомаси).



К.Р. Аллаев
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш раиси,
техника фанлари доктори, профессор,
академик

И.У. Рахмонов
Илмий даражалар берувчи
илмий кенгаш илмий котиби,
техника фанлари доктори, профессор

Т.Ш. Гайибов
Илмий даражалар берувчи илмий
кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,
техника фанлари доктори, профессор

КИРИШ (докторлик (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва аҳамияти. Жаҳонда синхрон машиналар барча турдаги электр станцияларида ва саноатда кенг қўлланиладиган электр машиналари қаторига киради ва уларнинг муаммосиз ишлаши ишлаб чиқаришдаги муҳим кўрсаткичлардан бири бўлиб, электр машиналарини лойиҳалаш жараёнида параметрларини тўғри танлаш ва электромеханик ўткинчи жараёнларини ҳисоблаш услубиятини ишлаб чиқиш масалаларига алоҳида аҳамият берилмоқда. Ҳозирги кунда техника ва технологиялари ривожланган мамлакатларда “...синхрон машиналарнинг ўткинчи жараёнларини моделлаштириш бўйича кенг қамровли тадқиқотлар олиб борилмоқда”¹. Бу борада, жумладан, магнит ўзакнинг тўйинишини ҳисобга олган ҳолда ишга тушириш жараёнларини аниқ моделлаштириш усуллари ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда синхрон машинани магнит ўзак тўйинишини ҳисобга олиш ҳамда синхрон машиналарни лойиҳалашда ҳисоб-китоблар аниқлигини ошириш, оғир юкланган машиналарни ишончли ишга туширишни таъминлаш, ҳамда электр машиналар тизимларининг барқарорлигини мустаҳкамлаш ва улардан фойдаланишга қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, жумладан, саноатни рақамлаштириш учун компьютерда моделлаштириш ва электр машиналарининг виртуал моделларини кенг қўллаш бўйича тадқиқотлар устувор ҳисобланмоқда. Шу билан бирга, синхрон моторнинг ишончли виртуал моделини яратиш учун математик модель магнит ўзакнинг ҳақиқий нозик хусусиятларини тўғри акс эттириши, ҳамда синхрон машиналарда энергия ва ресурс тежамкорлиги ва электр машиналарининг ишончлилиги ва энергия самарадорлигини ошириш масалалари долзарб вазифалардан ҳисобланмоқда.

Республикамизда сўнгги йилларда иқтисодийнинг барча тармоқларини жадал ривожлантириш, инвестицион жозибадорлигини ошириш, аҳоли меҳнат фаоллигини ошириш учун қулай шарт-шароитлар яратиш, аҳолининг ижтимоий турмуш даражасини яхшилаш ҳамда ишлаб чиқариш ва хизмат кўрсатиш соҳаларини кенгайтириш, шунингдек, электр энергияси истеъмолчиларини сифатли, узлуксиз ва арзон электр энергияси билан ишончли таъминлаш мақсадида кенг қўламли ислохотлар амалга оширилиб, бир вақтнинг ўзида замон талабларига жавоб берадиган янги технологик ечимларни яратиш, такомиллаштириш ва жорий этиш бўйича кенг қўламли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. Республикамизда иқтисодий тармоқлари кесимида энергия сиғимдорлигини 2030 йилга қадар бир ярим баробарга камайтириш мақсадида янги технологик ечимларни яратиш ва такомиллаштириш ҳамда жорий этишга доир кенг қўламли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. 2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегиясида, жумладан “Иқтисодийни электр

¹Armin Kerperin. Modellierung der Sättigungseinflüsse einer Synchronmaschine: Eine Berechnung transienter Vorgänge der Synchronmaschine mit Berücksichtigung der magnetischen Sättigung Paperback – 3 Aug. Dordmund, 2016.

энергияси билан узлуксиз таъминлаш ҳамда “Яшил иқтисодиёт” технологияларини барча соҳаларга фаол жорий этиш, иқтисодиётнинг энергия самарадорлигини 20 %га ошириш”² бўйича вазифалари белгиланган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда, хусусан, магнит ўзакнинг тўйиниши синхрон моторнинг ўткинчи жараёнларига қандай таъсир кўрсатиши муаммоларини ечишга қаратилган илмий тадқиқотлар олиб бориш долзарб масала ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон “2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида»ги Фармони, Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2019 йил 7 февралдаги ПҚ-4165-сонли “2019-2029 йилларда Ўзбекистон Республикада атом энергетикасини ривожлантириш концепциясини тасдиқлаш тўғрисида”ги қарорини ҳамда 2020-2030 йилларда Ўзбекистон Республикасини электр энергияси билан таъминлаш концепцияси, ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация иши бўйича тадқиқотлар республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. “Энергетика, энерго тежамкорлик ва муқобил энергия манбалари” устувор йўналишига мос келади.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Магнит ўзак тўйинишининг синхрон машиналар ўткинчи жараёнларига таъсирини тадқиқ қилиш йўналишидаги илмий изланишлар кўплаб илмий-тадқиқот муассасалари ва марказларида, жумладан, Иссиқлик физикаси ва электрофизика институти (Россия), Брянск давлат техника университети (Россия), Нью-Йорк технология институти (АҚШ), Милан политехника университети (Италия), Мерсин университети (Туркия), Китами технология институти (Япония), Замонавий технологиялар ва ахборот университети (Миср), Чехия политехника университети (Чехия), Томск политехника университети, Новосибирск давлат техника университети, Урал политехника университети, Бутунроссия электроэнергетика илмий-техника институти (Россия), Тошкент давлат техника университети, Ўзбекистон Республикаси ФА Энергетика муаммолари институти ва бошқаларда олиб борилмоқда.

Синхрон моторларнинг ишга тушириш жараёнлари хоссаларини ўрганиш, усул ва алгоритмларини яратиш муаммоларини ҳал қилишда бир қатор қуйидаги таниқли хорижий олимлар катта ҳисса қўшганлар, жумладан Р.Рихтер, К.Р. Kovach, I. Rats, Armin Kerperin, P.Park, И.М. Постников, А.И. Важнов, И.А. Глебов, Е.А. Казовский, И.П. Копылов, В.А. Мартынов, Г.А. Сипайлов, И.И. Трещев ва бошқалар.

²Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон «2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида»ги Фармони

Ўзбекистоннинг таниқли олимларининг ишлари синхрон моторнинг ишга тушириш режимларининг хусусиятларини ўрганиш билан боғлиқ илмий муаммоларни ҳал қилишга бағишланган. Улар орасида Қ.Р. Аллаев, М.Ғ. Ахматов, Ғ. Одилов, Н.Б. Пирматов, Д.С. Салимов, Л.В.Ковешникова, М.Қ.Бобожанов ва бошқаларнинг ишларини қайд этиш мумкин. Олиб борилган илмий тадқиқотлар натижасида аён қутбли синхрон моторлар учун чизикли тенгламалар синхрон моторларни ишга туширишнинг ўткинчи жараёнлари соҳасидаги масалаларни ҳал қилишда сезиларли натижаларга эришилди.

Сезиларли муваффақиятларга қарамай, аён қутбли синхрон машиналар учун ночизикли тенгламалар усулларини қўллаган ҳолда тўйинган магнит ўзакли ишга туширишнинг ўткинчи жараёнларини ўрганиш билан боғлиқ илмий муаммолар етарлича ўрганилмаган. Ушбу диссертация ишида синхрон моторларни лойиҳалаш ва ишлатишда ҳисоблаш аниқлигини ошириш, оғир юкланган машиналарни ишончли ишга туширишни таъминлаш ва электр машиналари тизимларининг энергия самарадорлиги ва барқарорлигини ошириш учун фойдаланиш мумкин бўлган усуллар ва техник ечимлар таклиф этилган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Мазкур диссертация иши Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университети “Электр машиналари ва юритмалари муҳандислиги” кафедрасининг амалга оширилаётган IL-442105947 ракамли “Шамол ва сув оқими параметрлари ўзгаришида локал энергетика тизимига ўзгармас частотали стабил ўзгармас электр қувватини узатувчи янги автоматик қурилма яратиш” (2022-2024 йй.) мавзусидаги илмий лойиҳаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади магнит ўзак тўйинишининг таъсирини ҳисобга олган ҳолда аён қутбли синхрон моторнинг ўткинчи жараёнларининг математик модели ва ҳисоблаш методикасини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

динамик жараёнларда магнит ўзакнинг тўйинишини ҳисобга олувчи аён қутбли синхрон моторнинг тўлиқ ночизикли математик моделини такомиллаштириш;

ўткинчи жараёнда магнит ўзак тўйинишининг магнит майдон гармоникаларига ва электромагнит моментида таъсирини ҳисоблаш усулини ишлаб чиқиш;

магнит ўзакнинг маҳаллий тўйинганлиги шароитида аён қутбли синхрон моторнинг параметрларини аниқлаш асосида чулғамлардаги дифференциал сочилма индуктивликни аниқлашнинг аналитик боғлиқликни таклиф этиш;

синхрон моторларда магнитланиш характеристикасининг эгилиш нуктасида бўлган номинал кучланиш қийматини таъминлаш мезони асосида аён қутбли синхрон моторни силлиқ ишга тушириш усули ва схемаси такомиллаштириш;

ишлаб чиқилган математик модел ва ҳисоблаш усули учун магнит ўзак тўйинишни ҳисобга олган ҳолда аён кутбли синхрон моторнинг ўткинчи жараёнларини (ишга тушириш) экспериментал тадқиқ қилиш, таклиф этилган ёндашувларнинг ишончлилигини экспериментал тасдиқлаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида аён кутбли синхрон мотор олинган.

Тадқиқотнинг предмети синхрон моторни асинхрон усулда ишга тушириш пайтида параметрлар ва хусусиятларга таъсир қилувчи магнит ўзакнинг тўйинганлигини ҳисобга олган ҳолда синхрон моторнинг ўткинчи жараённи ташкил қилади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида электр машиналари назариясидан, аналитик ёндашувлар ва ANSYS MAXWELL дастурида чекли элементлар усулидан фойдаланган ҳолда рақамли симуляция каби усуллар комбинациясидан фойдаланилди. Натижаларни қайта ишлаш учун вақт функцияларининг гармоник таҳлили ва чизикли бўлмаган характеристикалар учун яқинлашиш усуллари (магнитланиш эгри чизигининг квадратик полином интерполяцияси) ҳисоб-китобларнинг аниқлигини ошириш усуллардан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

аён кутбли синхрон моторни асинхрон усулда ишга туширишнинг математик модели тўйиниш коэффициентини эътиборга олган ҳолда ишга тушириш токи ва электромагнит моментнинг реал динамикасини аниқ тавсифлаш асосида такомиллаштирилган;

ўткинчи жараёнда магнит ўзак тўйинишини ҳисобга олган ҳолда синхрон моторнинг магнит майдон гармоникалари ва электромагнит моментини ҳисоблаш усули ишлаб чиқилган;

чулғамлардаги дифференциал сочилма индуктивликни аниқлашнинг аналитик боғлиқлиги магнит ўзакнинг маҳаллий тўйинганлиги шароитида аён кутбли синхрон моторнинг параметрларини аниқлаш асосида таклиф этилган;

аён кутбли синхрон моторни силлиқ ишга тушириш усули ва схемаси магнитланиш характеристикасининг эгилиш нуқтасида бўлган номинал кучланиш қийматини ҳамда моторнинг барқарор ва силлиқ синхронлашувини таъминлаш мезони асосида такомиллаштирилган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси қуйидагилардан иборат:

таклиф этилган синхрон моторни комплекс моделлаштириш усулини электр машиналарини лойиҳалаш босқичида жорий этиш мумкин;

юқори қувватли синхрон моторлар учун ишга туширишдаги салбий тўйиниш таъсирларини бартараф этувчи тиристорли силлиқ ишга тушириш тизими ишлаб чиқилди;

синхрон машиналарнинг параметрлари ва ишга тушириш характеристикаларини юқори аниқликда ҳисоблаш усули ишлаб чиқилган;

аён кутбли синхрон моторларнинг дифференциал сочилма индуктивликларининг қийматлари ва ўткинчи жараёнларни магнит ўзакнинг тўйинганлиги таъсирини ҳисобга олган ҳолда ҳисобланган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги қуйидагилар билан асосланади: олинган натижаларнинг асослилиги, синовдан ўтган усуллар ва математик моделларнинг қўлланилиши, замонавий электромагнит моделлаштириш дастурий таъминотидан (ANSYS Maxwell) фойдаланилганлиги, ҳамда асосий назарий қоидаларнинг тажриба орқали тасдиқланганлиги. Ҳисобланган маълумотлар физик тажрибалар натижалари ва маълум бўлган назарий боғлиқликлар билан таққосланганда, улар ўртасида яхши мувофиқлик кузатилган. Бу эса диссертация иши хулосаларининг юқори даражада ишончли эканлигини кўрсатади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти электр машиналар назариясини ривожлантириш, магнит тўйинишининг синхрон моторлардаги электромагнит жараёнларга таъсири ҳақидаги илмий тасаввурларни кенгайтириш ҳамда аён қутбли синхрон моторларнинг ҳаво бўшлиғидаги магнит майдонининг математик модели пўлат ўзак магнитланиш эгри чизиғининг нозизиқлигини инобатга олган ҳолда ишлаб чиқилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти таклиф этилган усуллар ва техник ечимлар синхрон мотор (СМ)ларни лойиҳалаш ва эксплуатация қилишда ҳисоблаш аниқлигини ошириш, катта қувватли машиналарни ишончли ишга туширишни таъминлаш ва электр машиналар тизимларининг энергия самарадорлиги, ҳамда барқарорлигини ошириш учун қўлланилиши мумкинлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Синхрон моторнинг ўткинчи жараёнларига магнит ўзак тўйинишининг таъсирини таҳлил қилиш бўйича илмий натижалар асосида:

магнит ўзакнинг тўйиниш даражаси таъсирини ҳисобга олган ҳолда мавжуд иккита усул (бўлак-чизиқли аппроксимация ва кубик полиномлар аппроксимацияси) бўйича ҳисоблаш аниқлигини таққослаш мақсадида асинхрон усулда ишга тушириш жараёнининг математик модели такомиллаштирилди. Натижада, 15 кВт аён қутбли синхрон моторнинг магнит ўзак тўйинганлигини ҳисобга олмаслик дифференциал сочилма индуктивлиги, магнит индукцияси, электромагнит моменти ва қувватини аниқлашда 19,3% хатоликка олиб келиши аниқланди.

аён қутбли синхрон моторни микропроцессорли ишга туширишнинг тавсия этилган схемаси “Навоий ИЭС” АЖга жорий қилинган (“Навоий ИЭС” АЖнинг 2020 йил 14 октябрдаги 13/1963-сон маълумотномаси). Натижада, синхрон моторнинг ишга тушириш тоқини камайтириш ҳисобига синхрон моторнинг таъмирсиз ишлаш даври 2,7 мартага ошириш имконини берган;

аён қутбли синхрон моторни ишга туширишнинг тавсия этилган усули “Навоий ИЭС” АЖга жорий қилинган (“Навоий ИЭС” АЖнинг 2020 йил 14 октябрдаги 13/1963-сон маълумотномаси). Натижада, синхрон моторнинг ишга тушириш жараёнини яхшилаш ва синхрон моторни таъмирлаш

харажатларини камайтириш ҳисобига 161 000 000 (бир юз олтмиш бир миллион) сўмни ташкил этган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 4 та халқаро, 1 та республика илмий-амалий анжуман ва илмий семинарларда муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 16 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг диссертациялар асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 7 та мақола, жумладан, 3 таси хорижий ва 2 таси республика журналларида, шунингдек, 3 та мақола SCOPUS базасига кирувчи тўпламларда нашр этилган ҳамда 1 та ЭҲМ учун яратилган дастурий маҳсулотга гувоҳнома олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми жами 120 бетдан иборат.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурлиги асосланган, тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари, объекти ва предмети белгилаб берилган, Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги аниқланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий этиш, ишнинг апробацияси, нашр этилган ишлар ва диссертациянинг тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **“Аён қутбли синхрон моторлар магнит ўзаги тўйинишининг ўткинчи жараёнларга таъсирини ўрганиш бўйича замонавий тадқиқотлар ҳолатининг таҳлили”** деб номланган биринчи бобида электр машиналар, хусусан, аён қутбли синхрон моторлар (АҚСМ) умумий назариясида магнит ўзаги тўйинганлини эътиборга олиш масалалари замонавий ҳолатининг таҳлили келтирилган.

Ҳозиргача идеаллаштирилган электр машиналар, айниқса АҚСМ тадқиқотлари магнитловчи тавсифлар эгри чизигининг ночизикли эканлиги эътиборга олмасдан бажарилмоқда. Шу асосда, фақат чизикли тизимлар учун мўлжалланган суперпозиция усули қўлланилиб, тенгламалардаги ток, электр юритувчи куч ва магнит майдонлар $d-q$ ўқлари бўйича алоҳида ташкил этувчиларга ажратилади, сўнгра уларнинг йиғиндилари аниқланади.

Ночизикли электр занжирларнинг замонавий назариясида электротехник қурилмаларни лойиҳалаш муаммолари билан боғлиқ бўлган ночизикли занжирларни ҳисоблаш ва таҳлил қилишнинг бир қатор усуллари ишлаб чиқилган, масалан бўлак-чизикли усули, эквивалент ўзгарткичнинг график усули, даврий функциялар тадқиқотининг тақрибий усуллари, хусусан гармоник чизиклилаштириш усуллари кўплаб қўлланилади.

Диссертацияда магнит ўзак тўйинганлиги эътиборга олинган энг

характерли тадқиқотларнинг таҳлили келтирилган.

АҚСМни ишга тушириш ўткинчи жараёнлари тавсифларига таъсир этувчи асосий омиллардан бири - магнит майдоннинг дифференциал сочилма қаршилигидир. Бу қаршилиқ СМ эквивалент алмаштириш схемасининг асосий параметрларидан бири ҳисобланади, электромагнит ва электро-механик жараёнларни ёритувчи тенгламалар тарқибига киради ва электр машиналар ўткинчи жараёнларини ҳисоблашда ёрдам берадиган дастурларнинг бошланғич катталиклар ҳисобланади.

Бажарилган таҳлиллар натижасида қуйидагилар аниқланди:

- магнит ўзак тишли зоналари тўйиниши ночизиклигини эътиборга олинган статор магнит майдон дифференциал сочилма индуктив қаршилигини ҳисоблашнинг мавжуд усуллари идеаллаштирилган электр машиналари назариясида келтирилган соддалаштириш фаразларига асосланган, шу сабабли аниқлиги паст;

- ҳозирги кунга қадар маълум бўлган СМ ҳаво оралиғидаги магнит майдонни ҳисоблашнинг рақамли усуллари мураккаб ва кам қўлланилади;

- АҚСМ математик моделлари идеаллаштирилган электр машиналари асосида курилади, бунда реал уч фазали статор чулғами икки координатали тизимга алмаштирилади.

Юзага келган ҳолат синхрон моторларни асинхрон усулда ишга тушириш жараёнига магнит ўзак тўйинганлик даражасининг таъсири тадқиқотига янгича ёндошувларни ривожлантиришни тақозо этади. Шу билан бирга АҚСМ ўткинчи жараёнлари математик моделини тузишда аналитик ифодаларни соддалаштиришни минималга келтириш, ночизикли магнитловчи эгри чизикларни апроксимациялашда энг аниқ усулларни қўллаш муваффақиятли ҳисобланади.

Диссертациянинг **“Магнит ўзакнинг тўйинишини ҳисобга олган ҳолда ишга туширишнинг ўткинчи жараёнларини ўрганиш учун АҚСМ математик моделлари”** деб номланган иккинчи боби магнит ўзакнинг тўйиниш даражасининг ишга тушириш жараёнига таъсирини ўрганиш бўйича ҳисоблаш тажрибаларини ўтказиш учун АҚСМ асинхрон усулда ишга тушириш жараёнининг математик моделини танлаш ва такомиллаштиришга бағишланган.

АҚСМни асинхрон усулда ишга тушириш жараёнининг математик моделини ишлаб чиқиш учун қуйидаги дифференциал тенгламалардан фойдаланиш зарур: статор чулғамларининг кучланишлари

$$\left. \begin{aligned} u_a &= -d\Psi_a / dt + i_a r_s \\ u_b &= -d\Psi_b / dt + i_b r_s \\ u_c &= -d\Psi_c / dt + i_c r_s \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

$$u_{и.т} = -\frac{d\psi_{и.т}}{dt} + i_{и.т} r_{и.т}, \quad (2)$$

ва қўзғатиш чулғамининг кучланиши

$$u_{кўзғ} = -\frac{d\psi_{кўзғ}}{dt} + i_{кўзғ} r_{кўзғ}, \quad (3)$$

у чулғам ўз қаршилигидан 15÷20 марта катта бўлган ташқи қаршиликка уланади.

Мотор валидаги моментлар мувозанати тенгламаси

$$M_{\text{қарш}} = M_{\text{эм}} + Jd\omega_r/dt, \quad (4)$$

бу ерда Ψ_a, Ψ_b , ва Ψ_c - статорнинг a, b, c фаза чулғамлари билан тўлиқ оқим илашмаси; u_a, u_b, u_c ва i_a, i_b, i_c - статор чулғамлари фаза кучланишлари ва тоқларининг оний қийматлари; r_s - статор фаза чулғамларининг актив қаршилиги; Ψ_B и Ψ_{II} - қўзғатиш ва ишга тушириш чулғамлари билан тўлиқ оқим илашимликлари; $u_{\text{қўзғ}}, u_{\text{и.т}}$ и $i_{\text{қўзғ}}, i_{\text{и.т}}$ - қўзғатиш ва ишга тушириш чулғамлари кучланишлари ва тоқларининг оний қийматлари; $r_{\text{қўзғ}}$ и $r_{\text{и.т}}$ - ишга тушириш қаршилиги билан қўзғатиш ва ишга тушириш чулғамларининг актив қаршиликлари; $M_{\text{қарш}}$ - қаршилик momenti; $M_{\text{эм}}$ - моторнинг электромагнит momenti; J - роторнинг инерция momenti; ω - роторнинг айланиш бурчак тезлиги.

(1) - (3) тенгламаларда биз $\psi_k = r_k$ ($k = a; b; c; B; II$).

Тадқиқотнинг ишончли натижаларини олиш учун ишда статорнинг 3 фазали чулғами учун магнит ўзак тўйинишини ҳисобга олган ҳолда икки координаталар тизимига ўзгартиришларсиз АҚСМ математик модели ва магнит ўзакнинг тўйинган АҚСМ математик модели квазичизиқли дифференциал тенгламалардан фойдаланган ҳолда (2-ўқли координаталар тизими) такомиллаштирилди.

Уларнинг реал объект билан сифат ва миқдорий яқинлашишини баҳолаш мақсадида диссертация ишида синхрон моторнинг ўткинчи жараёнлари математик моделларнинг ушбу икки варианты ёрдамида тадқиқ қилинган, сўнгра ўткинчи жараёнларнинг АҚСМ физик моделида экспериментал тадқиқотлари ўтказилди, олинган натижалар таққосланди ва энг аниқ натижаларга эга бўлган математик модель варианты таклиф қилинди.

Тўйинган магнит ўзакли асинхрон усулда ишга туширишнинг динамик жараёнларининг АҚСМ математик моделини такомиллаштириш.

Бунинг учун (1) - (3) шаклдаги электр занжирининг кучланишлар баланси тенгламалари, роторнинг механик ҳаракати дифференциал шаклдаги тенгламаси (4) бўлиши лозим. Унда математик моделнинг тенгламалар тизими қуйидаги шаклда бўлади

$$\left. \begin{aligned} d\psi_a/dt &= u_a - i_a r_s \\ d\psi_b/dt &= u_b - i_b r_s \\ d\psi_c/dt &= u_c - i_c r_s \\ d\psi_{\text{қўзғ}}/dt &= u_{\text{қўзғ}} - i_{\text{қўзғ}} r_{\text{қўзғ}} \\ d\psi_{\text{и.т}}/dt &= u_{\text{и.т}} - i_{\text{и.т}} r_{\text{и.т}} \\ \psi &= \psi_a + \psi_b + \psi_c \\ M_{\text{эм}} &= p(\psi i_{\text{и.т}} + \psi i_{\text{қўзғ}}) \\ d\omega_r/dt &= (M_{\text{эм}} - M_c)/J \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Математик модель ёрдамида электромагнит момент ва моторни ишга тушириш тавсифларига магнит ўзак тўйинганлик даражасининг таъсирини аниқ ўрганиш учун статорнинг хар бир фаза чулғами магнит майдонлари алгебраик йиғиндисига тенг бўлган натижавий магнит майдонини аниқлаш зарур экан

$$\Psi = \Psi_a + \Psi_b + \Psi_c. \quad (6)$$

Кўзғатиш чулғамида ЭЮК индуктивланади, у мужассам (сосредоточенный) бўлгани учун, чулғамни туташтирганда, унда пульсланувчи ток ва магнит майдон ҳосил бўлади.

Юқорида келтирилган электромагнит момент таърифини эътиборга олиб, унинг аналитик ифодасини ротор чулғамлари тоқларининг статор магнит майдонига кўпайтмаси кўринишида ёзамиз

$$M_{эм} = p(\psi i_{и.т} + \psi i_{кўзғ}). \quad (7)$$

Маълумки, мотор магнит ўзагининг энг кўп тўйинган қисми унинг тиш қисми ҳисобланади. АҚСМ математик моделида магнит ўзак тўйинганлик даражаси ночизиқли тенгламалар тизими билан аниқланади

$$\left. \begin{aligned} i_a &= \Psi_a / L(i_a) \\ i_b &= \Psi_b / L(i_b) \\ i_c &= \Psi_c / L(i_c) \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

бунда $L(i)$ – статор фаза чулғамининг ночизиқли индуктивлиги ва у эксперимент ёрдамида аниқланади.

Математик моделга статор фаза чулғамининг ночизиқли индуктивлиги $L(i)$ ёки магнитловчи тавсиф $\Psi_a = L(i_a)i_a$ график тасвир сифатида киритилади.

Унда тиш зонасидаги магнит майдон индукцияси қуйидагича бўлади

$$B = \frac{\Phi}{S_c} = \frac{\Phi}{\sum_{Z/2p} b_{z_{\min}} \cdot l_M} = \frac{\Phi}{b_{z_{\min}} \cdot Z / (2p) \cdot l_M}. \quad (9)$$

Магнит ўзак магнитловчи тавсифининг АҚСМ ишга тушириш режимидаги таъсирини эътиборга олиш магнитловчи тавсиф $B = f(i)$ ни аппроксимациялаш билан амалга оширилади. Аппроксимациялаш усули 3 бобда келтирилган.

Шундай қилиб, (5), (8), (9) ночизиқли дифференциал тенгламалар тизимининг ечимлари ва демак магнит ўзаги тўйинган АҚСМ математик моделининг ечимлари ток, магнит майдон, айлантирувчи момент ва ротор айланиш тезлигининг аниқланган ўзгарувчилари экан.

Квазичизиқли дифференциал тенгламали АҚСМнинг математик модели. Реал уч фазали статори бўлган электр машинаси идеаллаштирилган икки фазали электр машина билан алмаштирилади. Бунда реал уч фазали машина ҳаво оралиғининг натижавий магнит оқим илашуви $d - q$ ўрнига ортогонал координата ўқларига проекция сифатида магнит илашувнинг икки ташкил этувчилари қабул қилинади. Агар АҚСМ барқарорлик режимида статор ва ротор чулғамлари магнит майдонлари ўзаро кўзғалмас бўлса, ишга

тушиш жараёнида ротор айланиш тезлиги ўзгариши билан ротор чулғамлари статор чулғамларига нисбатан $0 \leq n \leq n_1$ силжиб боради.

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{ad} &= L_{ad} i_d \\ \Psi_{aq} &= L_{aq} i_q \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Шу сабабли математик модель ёрдамида АҚСМни асинхрон ишга тушириш ўткинчи жараёнлари тадқиқоти учун $\alpha - \beta$ ўқли координата тизимини қабул қиламиз.

$$\left. \begin{aligned} u_{s\alpha} &= \left[r_s + \frac{d}{dt} L_{\sigma s}(t) \right] i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} M(t) i_{m\alpha}, \\ u_{s\beta} &= \left[r_s + \frac{d}{dt} L_{\sigma s}(t) \right] i_{s\beta} + \frac{d}{dt} M(t) i_{m\beta}, \\ 0 &= \left[r_{\Pi} + \frac{d}{dt} L_{\sigma \Pi}(t) \right] i_{\Pi\alpha} + \frac{d}{dt} M(t) i_{m\alpha} + \omega_r [L_{\Pi} i_{\Pi\beta} + M(t) i_{m\beta}], \\ 0 &= \left[r_{\Pi} + \frac{d}{dt} L_{\sigma \Pi}(t) \right] i_{\Pi\beta} + \frac{d}{dt} M(t) i_{m\beta} - \omega_r [L_{\Pi} i_{\Pi\alpha} + M(t) i_{m\alpha}], \\ 0 &= \left[r_B + \frac{d}{dt} L_{\sigma B}(t) \right] i_{B\alpha} + \frac{d}{dt} M(t) i_{m\alpha} + \omega_r [L_B i_{B\alpha} + M(t) i_{m\beta}], \\ M_{\Sigma M}(t) &= p M(t) [i_{m\alpha} i_{\Pi\alpha} - i_{m\beta} i_{\Pi\beta} + i_{m\alpha} i_{B\alpha}], \\ \omega_r &= \frac{p}{J} [M_{\Sigma M}(t) - M_c(t)] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

бунда p – машинанинг жуфт кутблари сони; $M_{\Sigma M}$ - электромагнит момент. Унинг ташкил этувчилари қуйидаги ток жуфтликлари билан ўзаро таъсир этиб ҳосил бўладилар: α ва β ўқлари бўйлаб статор чулғами магнитловчи тоқлари ишга тушириш чулғами тоқлари билан ва α ўқи бўйлаб қўзғатиш чулғами тоқи билан.

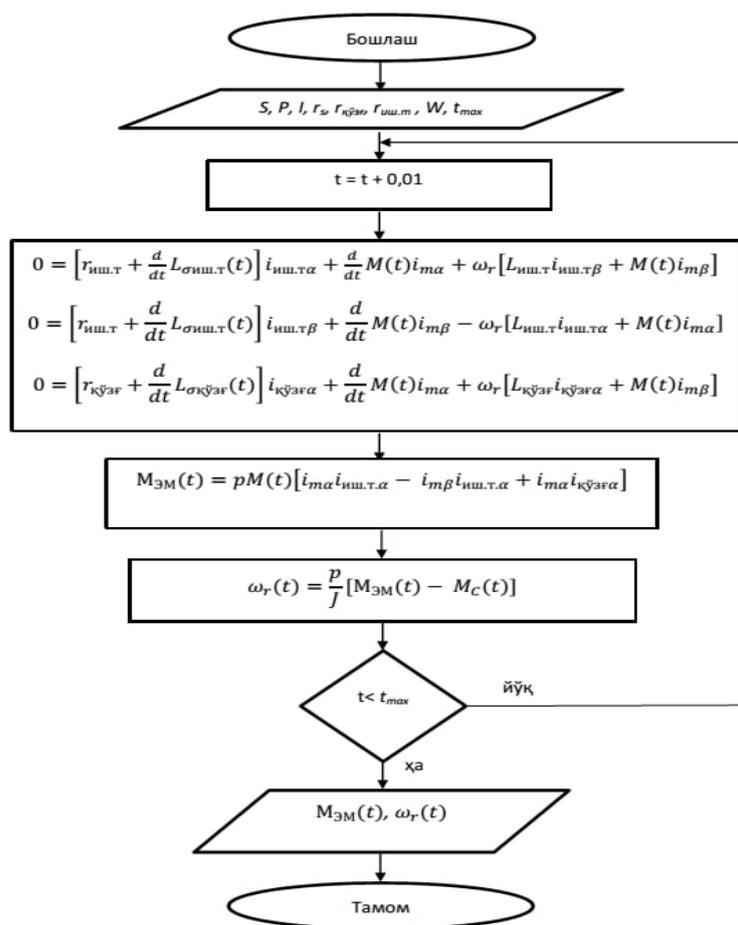
(11) тенгламалар системасидан магнит ўзакнинг тўйиниш таъсирини тўғридан-тўғри ўз ичига олган электромагнит момент ва ЭЮК учун ифодани олиш мумкин.

$$\left. \begin{aligned} M_{\Sigma M} &= \psi_d i_q - \psi_q i_d = E_{\delta q} i_q + E_{\delta d} i_d \\ E_{\delta q} &= k_d (x_{ad} i_d + E_q + \sum_{i=1}^{n_d} E_{rqi}) \\ E_{\delta d} &= -k_q (x_{aq} i_q - \sum_{k=1}^{n_q} E_{rpk}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

(12) формулада магнит ўзакнинг тўйиниши индуктивликлар ва оқимларнинг тоқларга боғлиқлиги орқали ифодаланади.

1-расмда синхрон мотор асинхрон усулда ишга туширилганда электромагнит моментни ва айланиш бурчак тезлиги ҳисоблаш алгоритми келтирилган.

Шундай қилиб, ишлаб чиқилган алгоритм аён кутбни синхрон моторни ишга тушириш характеристикалари бўйича юқори ишончлилиқ билан сонли тажрибалар ўтказиш имконини беради, шунингдек, турли хил юкламалар ёки тўйиниш даражаларида СМни асинхрон усулда ишга туширишни тез ҳисоблаш мумкин.



1-расм. Синхрон мотор асинхрон усулда ишга туширилганда электромагнит моментни ва айланиш бурчак тезлигини ҳисоблаш алгоритми

Диссертациянинг “АҚСМда аппроксимациялаш усуллари ва тўйинишнинг ночизиқликларини ҳисобга олиш усулини такомиллаштириш” деб номланган учинчи бобида АҚСМ магнитланиш характеристикаларини аппроксимациялаш усули, тишли зоналарнинг тўйиниш ночизиқликларини ҳисобга олган ҳолда дифференциал сочилма магнит майдонларини ҳисоблашнинг соддалаштирилган усули, синхрон мотор статор чулғамининг магнит майдонини ҳисоблаш, АҚСМни асинхрон усулда ишга тушириш жараёнини ўрганиш натижалари келтирилган.

Қўйилган вазифаларга магнит ўзак қисмлари магнитловчи тавсифларини аппроксимациялаш билан эришиш мумкин. Бунда ночизиқли машина магнит ўзагининг магнитловчи тавсифи $B = f(H)$ ни аналитик ифодалаш учун кенг тарқалган икки усул: бўлак-чизиқли ёки бўлак-ўзгармас усуллардан бирини қўллаш етарли бўлади.

Масалан, эксперимент ёрдамида олинган тавсиф куйидаги кетма-кетлик нуқталари билан $B_k; H_k$ (бунда $k = 1, 2, 3, \dots, n$) берилган бўлса, бўлак-чизиқли аппроксимация усулидан фойдаланганда, тавсифнинг $H_k - H_{k+1}$ бўлаги учун куйидаги функцияни ғосил қилиш мумкин

$$B = B_k + (B_{k+1} - B_k) / (H_{k+1} - H_k) (H - H_k) \quad (13)$$

ва тавсифнинг берилган нуқталарда синувчи синик чизик шаклида бўлади.

Агар иккинчи усулни қўлласса, тавсифнинг шу $H_k - H_{k+1}$ бўлагида бу функция ўзгармас бўлади

$$H = H_k \text{ ёки} \quad (14)$$

$$H = 0,5(H_k + H_{k+1}), \quad (15)$$

ва ҳисил бўлган тавсиф поғонали функция шаклида бўлади. Аниқки, синиш ва поғоналар сони кўрилатган (13) - (15) ночизикли тавсиф учун экспериментал нуқталарнинг сони “ k ” га боғлиқ бўлади. Бироқ, ушбу ночизикли магнитловчи тавсифларни аппроксимациялаш усуллари аниқлиги паст. Ҳисоблаш аниқлигини оширишнинг ягона шарти - экспериментал нуқталар “ k ” сонини кўпайтиришдир. Бироқ, бизнинг тадқиқотларимизга ушбу шартни қўллаб бўлмайди.

Аппроксимациянинг бу усулига нисбатан, квадрат ва кубик полиномлар бўлаклари мажмуаси ночизикли функцияларни алмаштиришнинг аниқлиги бўйича ажралиб туради. Ҳисоблашнинг нисбатан бир хил ҳажмига эга бўлиши билан бирга, кубик полиномлар юқори аниқлиги билан ажралиб туради ва амалиётда кўпроқ қўлланилмоқда.

Кубик полиномлар ишлатилганда аппроксимация тугунлари ва туташини тугунлари мос келади. Шунинг учун кубик полином коэффициентини аниқлаш учун қуйидаги шартлар бажарилади: сплайннинг $B_k(H_k) = B_k$ тугун орқали ўтиши; ёнма-ён k ва $k+1$ бўлақлар тугунларида биринчи $B'_k(H_k) = B'_{k+1}(H_k)$ ва иккинчи $B''_k(H_k) = B''_{k+1}(H_k)$ ҳосилалар тенглиги. Бундан ташқари, коэффициентнинг ягонасини аниқ ҳисоблаш учун икки чекка шартларни билиш ҳам лозим.

Ҳаво оралиғидаги магнит индукцияси натижавий ва унинг гармоник ташкил этувчиларининг ночизикли боғланишлари аниқланади

$$B_\delta = f(H_{\delta n}). \quad (16)$$

Шунга эътиборни қаратиш зарурки, (16) ифодада магнит ўзак тўйинганлик ночизиклилиги эътиборга олинган.

Дифференциал сочилма магнит майдонни аниқлашда натижавий магнит майдондан ҳаво оралиғи магнит майдоннинг асосий гармоник ташкил этувчисини айириш лозим

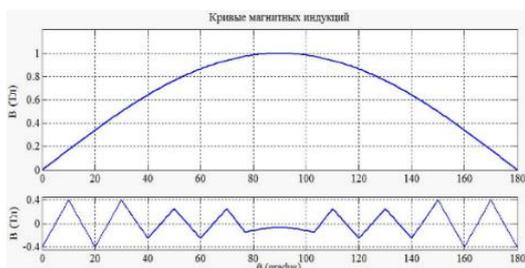
$$B_{\delta\rho q.v} = B_{\delta\rho q.v} - B_{\delta\rho q.1}. \quad (17)$$

Шу асосда, (16), (17) аналитик ифодалар ёрдамида АҚСМ уч фазали икки қатламли статор чулғами учун бир қутб бўлинмаси доирасида статор кесими θ бўйлаб магнит индукциясининг асосий гармоникаси $B_{\delta\rho q1} = f(\theta)$ ва унинг юқори гармоник $B_{\delta\rho q.v} = f(\theta)$ ташкил этувчилари (2-расм) қурилди.

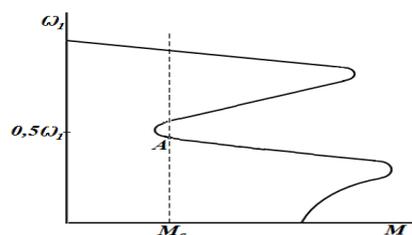
Шуни таъкидлаш лозимки, қўзғатиш чулғамининг тузилиши «бир

фазали» бўлганлиги сабабли, унда индуктивланган ЭЮК ва шу сабаб оқаётган ток бир фазали ва пульсланувчи магнит майдон ҳосил қилади. Бундай магнит майдонни тўғри, тескари ва нол кетма-кетлик ташкил этувчиларини тарқатиб қўйидагиларни англаш мумкин. Учинчи ва унга каррали бўлган гармоник ташкил этувчилар статорнинг айланувчи магнит майдони билан таъсир этиб, қўшимча электромагнит момент ҳосил қилади. Уларни бошқа моментлар билан қўшганда натижавий электромагнит моментнинг камайиши, СМнинг статик механик тавсифнинг баъзи бўлақларида “пасайиш”лар ҳосил бўлади. Бунда, ротор оралиқ тезликларда тормозланиши мумкин (3-расмда А нукта).

АҚСМни асинхрон усулда ишга тушириш жараёнига уларнинг миқдорий ва сифат таъсирини экспериментал тадқиқотлар ёрдамида амалга оширилади.



2-расм. $B_{\delta pq,1}=1,0$ Тл да олинган магнит индукция эгри чизиклари



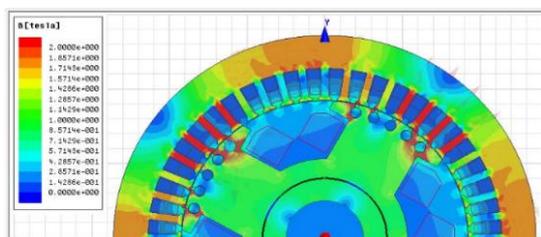
3-расм. АҚСМ статик механик характеристикаси

“Ansys Maxwell” дастурий мажмуаси ёрдамида синхрон моторнинг магнит майдонини моделлаштириш. ANSYS Maxwell дастурий мажмуаси магнит майдонларнинг тақсимланишини, шунингдек, кучлар ва айлантувчи момент, индуктивлик ва бошқа хусусиятларни аниқлашга қодир. Электр машиналарини лойиҳалаш самарадорлигини ошириш учун Максвелл таркибига эквивалент магнит занжирлари асосида ҳисоблашнинг классик усуллари амалга оширувчи RMXprt модули киради.

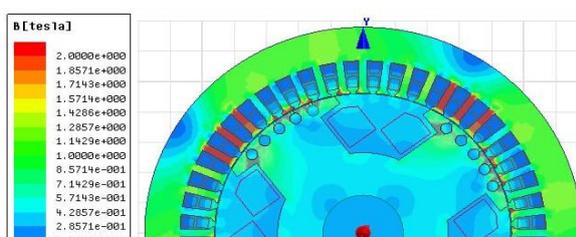
Магнит майдоннинг тақсимланиши ва магнит ўзакнинг тўйиниши. 4 ва 5-расмларда номинал иш жараёнида моторнинг кўндаланг кесимида магнит индукциясининг тарқалиши кўрсатилган.

4-расмда дастурий модуль (ANSYS Maxwell RMXprt) ёрдамида аён қутбли синхрон мотор магнит ўзакнинг тўйинишини ҳисобга олган ҳолда магнит индукциясининг тарқалиш шакли кўрсатилган. 5-расмда дастурий модулдан фойдаланиб, аён қутбли синхрон мотор магнит ўзакнинг тўйинишини ҳисобга олмаган ҳолда магнит индукциясининг тарқалиш шакли кўрсатилган.

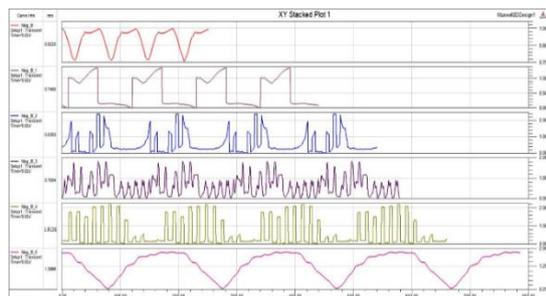
6 ва 7-расмларда аён қутбли синхрон мотор магнит ўзагининг тўйинишини ҳисобга олган ва олмаган ҳолда статор ва ротор бўйлаб магнит индукциясининг тарқалиши кўрсатилган.



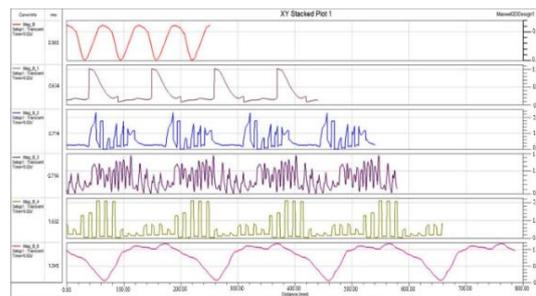
4-расм. АҚСМ нинг магнит ўзак тўйинишини ҳисобга олган ҳолда магнит индукциясининг тарқалиш шакли



5-расм. АҚСМ нинг магнит ўзак тўйини-шини ҳисобга олмаган ҳолда магнит индукциясининг тарқалиш шакли

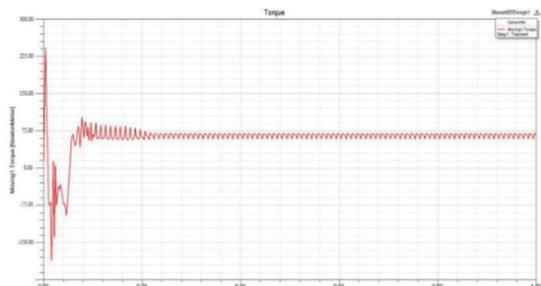


6-расм. Магнит ўзакнинг ҳисобга олган ҳолда статор ва ротор бўйлаб магнит индукциясининг тарқалиши

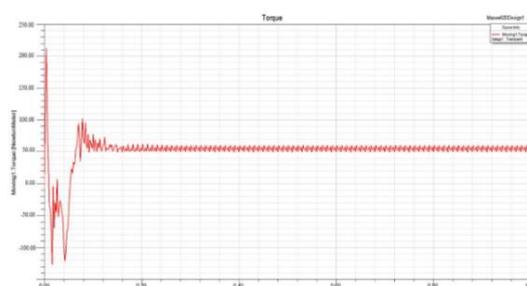


7-расм Магнит ўзакнинг ҳисобга олмаган ҳолда статор ва ротор бўйлаб магнит индукциясининг тарқалиши

Шунингдек, 8 ва 9-расмларда магнит ўзакнинг тўйинишини ҳисобга олган ва олмаган ҳолда АҚСМ ишга тушириш пайтидаги электромагнит момент ва тезликнинг осциллограммалари кўрсатилган.



8-расм АҚСМ магнит ўзакнинг ҳисобга олган ҳолда электромагнит момент осциллограммаси



9-расм АҚСМ магнит ўзакнинг ҳисобга олмаган ҳолда электромагнит момент осциллограммаси

Хусусан, магнит ўзак тўйинишини ҳисобга олган ва олмаган моделларнинг қиёсий таҳлили шуни кўрсатдики, тўйинишни ҳисобга олган ҳолда машинанинг алоҳида қисмларида магнит индукцияси тўйинишсиз чизиқли ҳолатга қараганда тахминан 14,4% га юқори. Бу эса, ҳисоблаш аниқлигини ошириш учун тўйиниш эффектини ҳисобга олиш муҳимлигини таъкидлайди.

АҚСМ статор чулғамининг дифференциал сочилма индуктивлигини ҳисоблаш методикаси. Замонавий юқори даражада қўлланиладиган аён кутбли синхрон моторларда дифференциал сочилма индуктивлиги ва статор чулғамининг асосий индуктивлиги ҳаво оралиғининг электромагнит майдони

туфайли вужудга келади ва улар машинанинг асосий параметрлари ҳисобланади. Ушбу индуктивликка таъсир қилувчи омилларни инобатга олиш имконини берувчи дифференциал сочилма индуктивлигини ҳисоблаш услубиятини белгилаймиз.

Дифференциал сочилиш индуктивлиги

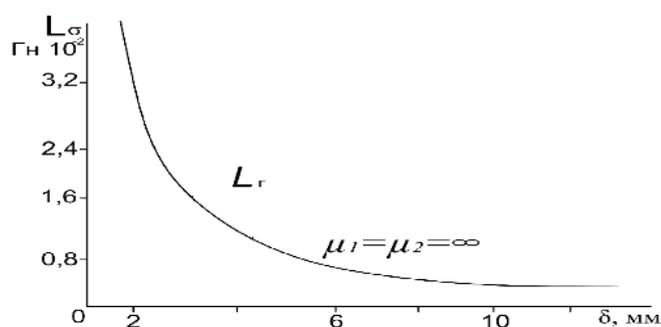
$$L_{\sigma} = L - L_{ac} , \quad (18)$$

бу ерда, L – чулғамнинг индуктивлиги; L_{ac} - чулғамнинг асосий индуктивлиги. У майдоннинг электромагнит энергияси билан қуйидаги ифода орқали боғланган

$$L_{ac} = \frac{2}{i^2} W , \quad (19)$$

бу ерда W – моторнинг ҳаво оралиғидаги майдоннинг электромагнит энергияси.

10-расмда дифференциал сочилма индуктивликнинг ҳаво оралиғига боғлиқлиги кўрсатилган.



10-расм. Дифференциал сочилма индуктивликнинг ҳаво оралиғига боғлиқлиги

Мотор статор чулғамининг бош индуктивлиги

$$L_{ac} = \frac{2}{i^2} W_{ac} , \quad (20)$$

бу ерда W_{ac} – асосий электромагнит энергия.

Уч фазали ток билан таъминланганда уч фазали чулғамнинг битта фазасига тегишли дифференциал сочилма индуктивлиги

$$L_{\sigma,уч} = L_{уч} - L_{ac,уч} = \frac{4}{3i^2} (W_{уч} - W_{ac,уч}) , \quad (21)$$

бу ерда $W_{уч}$ - уч фазали чулғам ҳақиқий майдонининг электромагнит энергияси.

Бир ва уч фазали чулғамларга (21) аналитик ифодаларни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$W_{уч} = \frac{\mu_0 \ell \delta \delta (b+c)}{4} \int_0^{2\pi} H_{уч}^2 d\varphi \quad (22)$$

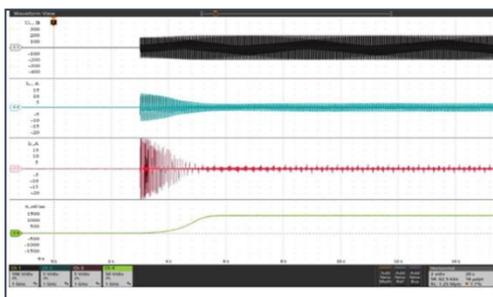
$$W_{ac,уч} = \frac{\mu_0 \ell \delta \delta (b+c)}{4} \int_0^{2\pi} H_{ac,уч}^2 d\varphi \quad (23)$$

Диссертациянинг “Магнит ўзак тўйинишининг АҚСМни ишга тушириш жараёнига таъсирини ҳисобга олган ҳолда ўтказилган тажрибалар” деб номланган тўртинчи бобида назарий ишланмаларни, таклиф этилган ҳисоблаш усулларини тасдиқлаш бўйича тадқиқотлар ўтказилган. Магнит ўзак тўйинишининг ҳаво оралиғи магнит майдонининг юқори гармоник ташкил этувчиларига ва АҚСМни асинхрон усулда ишга тушириш жараёни табиатига таъсир даражасини аниқлаш бўйича ҳисоблаш тажрибаси ўтказилди.

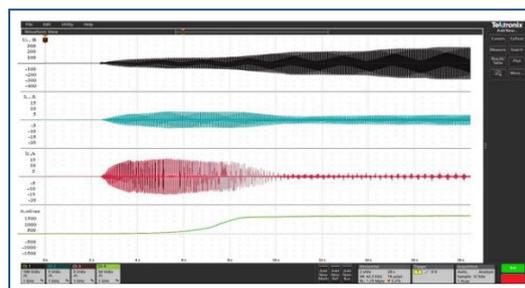
Қуйида СМ ларни тўғридан-тўғри ва силлиқ ишга туширишда қуввати 2,2 кВт, кучланиши 220 В ва роторининг айланиш тезлиги 1500 айл/мин, ҳамда қуввати 8000 кВт, кучланиши 6 кВ бўлган мотоорларда тажриба тадқиқотлари ўтказилган.

- машина кучланишининг номинал қийматини сақлаб туришни таъминлайдиган АҚСМни силлиқ ишга тушириш схемасини ишлаб чиқиш.

11 ва 12 – расмларда тажриба тадқиқотларни бажаришда вақт бўйича график боғланишларни ўлчаш учун Textronix фирмасининг MSO-64 рақамли осциллографидан фойдаланилди, у синхрон моторнинг токини, кучланиш ва айланиш тезлигини кузатиш имконини беради.



11-расм. 2,2 кВт ли СМни асинхрон усулда ишга тушириш осциллограммаси (тўғридан тўғри ишга тушириш)

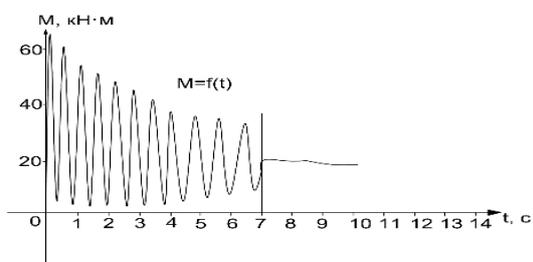


12-расм. 2,2 кВт ли СМни асинхрон усулда ишга тушириш осциллограммаси (силлиқ ишга тушириш)

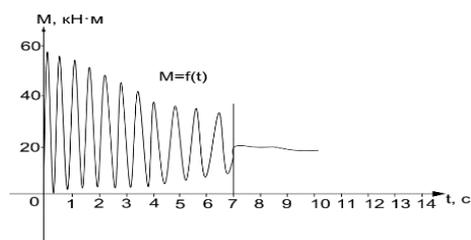
Шундай қилиб, тажрибада тўғридан-тўғри ишга туширишда ишга тушириш токи номинал қийматдан 5 марта ошиши аниқланди, унинг вақти 2 сонияни ташкил этади. Силлиқ ишга туширишда ишга тушириш токи номинал қийматдан 2 марта ортади, унинг вақти 7 секундни ташкил этади.

Ишчи тезликка тез чиқиш катта электромагнит юкламалар билан бирга келади ва тўйинганликни ҳисобга олган ҳолда модел тезланишга таъсир қилувчи момент ва токнинг ҳақиқий чўққиларини акс эттиришга қодир, шунингдек, тўйинганлик ишга туширишга таъсир қилади ва ишга тушириш пайтида зарбий тоқларини камайтириш зарурлигини кўрсатади.

13 ва 14 расмларда АҚСМ-8000 кВт ли синхрон моторни тўғридан тўғри ишга туширганда магнит ўзакни тўйинишини ҳисобга олган ва олмаган ҳолатидаги моментнинг ўзгариши келтирилган.

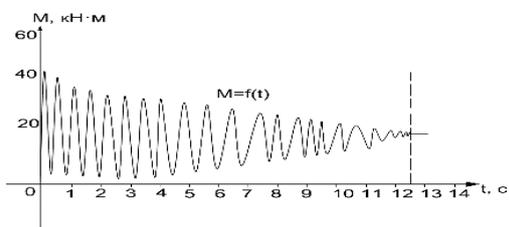


13-расм. АҚСМ-8000 кВт ли синхрон моторни тўғридан тўғри ишга туширганда моментнинг ўзгариши (магнит ўзакни тўйинишини ҳисобга олганда)

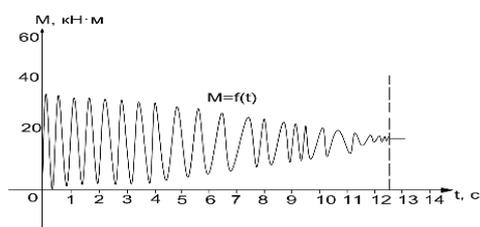


14-расм. АҚСМ-8000 кВт ли синхрон моторни тўғридан тўғри ишга туширганда моментнинг ўзгариши (магнит ўзакни тўйинишини ҳисобга олмаганда)

15 ва 16 расмларда АҚСМ-8000 кВт ли синхрон моторни силлик ишга туширганда магнит ўзакни тўйинишини ҳисобга олган ва олмаган ҳолатидаги моментнинг ўзгариши келтирилган.

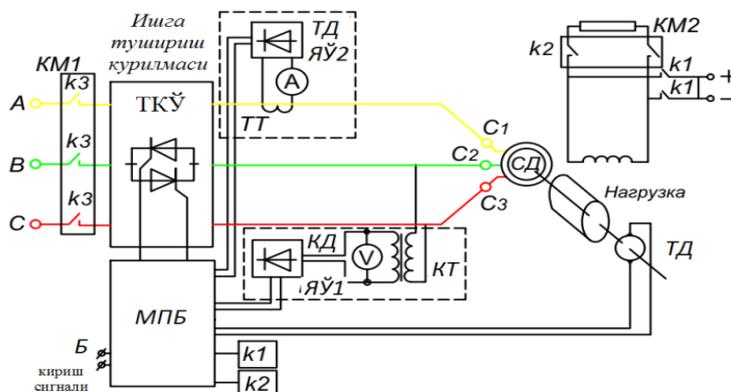


15-расм. АҚСМ-8000 кВт ли синхрон моторни силлик ишга туширганда моментнинг ўзгариши (магнит ўзакни тўйинишини ҳисобга олганда)



16-расм. АҚСМ-8000 кВт ли синхрон моторни силлик ишга туширганда моментнинг ўзгариши (магнит ўзакни тўйинишини ҳисобга олмаганда)

Ушбу ишда синхрон моторни ишга туширишда микропроцессорли бошқариладиган “Тиристорли кучланиш ўзгартиргичи – СМ” (ТКЎ-СМ) тизимидан фойдаланиш таклиф этилган.



17-расм. Тиристорли кучланиш ростлагичли АҚСМни силлик ишга тушириш қурилмасининг принципал структуравий схемаси

17-расмда тиристорли кучланиш ростлагичли АҚСМ силлик ишга тушириш қурилмасининг принципал структуравий схемаси келтирилган.

“ТКЎ-СМ” деб номланган ушбу тизим қуйидаги асосий таркибий қисмларни ўз ичига олади: СМ - синхрон мотор; ТКЎ - тиристорли кучланиш ўзгартиргичи; МПБ - микропроцессорли бошқарув; ТД - ток датчиги; ТТ - ток трансформатори; ЯЎ2 - яримўтказгичли ўзгартиргич; А - амперметр; КД - кучланиш датчиги; КТ - кучланиш трансформатори; ЯЎ1 - яримўтказгичли ўзгартиргич; В - вольтметр; ТД - тезлик датчиги; к1, к2, к3 - ишга тушириш аппаратларининг калитлари; Р - резистор.

Шуни таъкидлаш керакки, такомиллаштирилган тиристорли кучланиш ростлагичли ишга тушириш схемаси СМ ни силлиқ ишга тушириш имконини беради.

ХУЛОСА

“Синхрон моторнинг ўткинчи жараёнларига магнит ўзак тўйинишининг таъсирини таҳлил қилиш” мавзусидаги фалсафа доктори (PhD) диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилади:

1. Магнит ўзакнинг тўйиниш даражаси таъсирини ҳисобга олган ҳолда мавжуд иккита усул (бўлак-чизиқли аппроксимация ва кубик полиномлар аппроксимацияси) бўйича ҳисоблаш аниқлигини таққослаш мақсадида асинхрон усулда ишга тушириш жараёнининг математик модели такомиллаштирилди. Натижада, 15 кВт АҚСМнинг магнит ўзак тўйинганлигини ҳисобга олмаслик дифференциал сочилма индуктивлиги, магнит индукцияси, электромагнит моменти ва қувватини аниқлашда 19,3% хатоликка олиб келиши аниқланди.

2. Қуввати 15 кВт бўлган АҚСМ статор чулғамининг магнит майдони ва унинг гармоник ташкил этувчилари AnsysMaxwell дастури ёрдамида СМни ишга тушириш режими магнит ўзакнинг тўйинганлигини ҳисобга олган ҳолда ҳисоблаб чиқилди. Натижада, тўйинганликни ҳисобга олмаслик 14,4% хатоликка олиб келиши аниқланди.

3. Магнит ўзакнинг локал тўйиниши шароитида чулғамлар дифференциал сочилма индуктивлигини аниқлаш учун аналитик боғланишлар олинди ва асосланди. Натижада, улар АҚСМ чулғам параметрларини ҳисоблашда тишли зоналар тўйинишининг таъсирини аниқроқ ҳисобга олиш имконини беради.

4. Машина кучланишининг номинал қийматини сақлаб туришни таъминловчи АҚСМни силлиқ ишга тушириш схемаси такомиллаштирилди. Натижада ТКЎ-СМ тизими паст ишга тушириш тоқларида кучланишни силлиқ ўзгартириш (ошириш) билан СМни ишга тушириш имконини беради, микропроцессорли бошқариш эса механик характеристикада носозликлар мавжуд бўлган участкалардан нисбатан тез ўтиш имконини беради.

5. Таклиф этилган ишга тушириш усули “Навоий ИЭС” АЖнинг қуввати 8 МВт бўлган синхрон мотор газ сиқиш компрессор станциясида тавсия этилди ва жорий этиш учун қабул қилинди. Натижада, қутилаётган иқтисодий самара 161 млн. сўмни ташкил этган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
ДОКТОРА НАУК DSc.03/10.12.2019. Т.03.03 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

ХАЛБУТАЕВА АЗИЗА КАМАЛИДДИНОВНА

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТОПРОВОДА НА
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

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

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

Ташкент – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за В2023.2.PhD/Г922

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова.

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

Научный руководитель:

Пирматов Нурали Бердиёрович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Бобожанов Махсуд Қаландарович
доктор технических наук, профессор

Ишназаров Ойбек Хайрилаевич
доктор технических наук, профессор

Ведущая организация:

**Ташкентский государственный
транспортный университет**

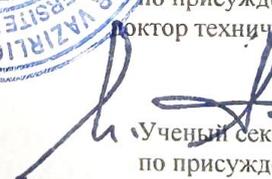
Защита диссертации состоится «13» декабрь 2025 г. в 10:30 часов на заседании научного совета DSc.03/10.12.2019. Т.03.03 при Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова. Адрес: 100095, г Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 207-07-32; факс: (99871) 227-10-32, e-mail: tstu_info@tdtu.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова (регистрационный номер - 58). Адрес: 100095, Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 207-14-70.

Автореферат диссертации разослан «25» 11 2025 года.
(протокол рассылки № «9» от «24» 11 2025 года).




К.Р.Аллаев
Председатель научного совета
по присуждению ученых степеней,
доктор технических наук, профессор,
академик


И.У.Рахмонов
Ученый секретарь научного совета
по присуждению ученых степеней,
доктор технических наук, профессор


Т.Ш. Гайибов
Председатель научного семинара при
научном совете по присуждению
ученых степеней, доктор технических наук, профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире синхронные машины являются одними из наиболее распространённых и мощных электрических машин, применяемых на всех видах электростанций и в промышленности, а их безаварийная эксплуатация является одним из важных вопросов в производстве, во многом определяемая корректностью выбора и расчётом их параметров при проектировании. В настоящее время в странах с развитой техникой и технологиями «...проводятся масштабные исследования по моделированию переходных процессов синхронных машин»¹. В связи с этим особое внимание уделяется разработке методов точного моделирования пусковых процессов с учётом насыщения магнитопровода.

В мире проводятся научные исследования, направленные на проектирование и эксплуатацию синхронных машин двигателей для повышения точности расчётов, обеспечения надёжного пуска тяжело нагруженных машин и повышения энергоэффективности, а также подкрепления устойчивости систем электрических машин. При этом, широкое применение компьютерного моделирования и виртуальных моделей электрических машин в промышленности является приоритетным для цифровизации. Для достоверного виртуального моделирования синхронного двигателя необходимо, чтобы математическая модель адекватно отражала реальные нелинейные свойства стали магнитопровода, в противном случае имитационное моделирование не сможет заменить натурные испытания, замедляя внедрение инноваций. Помимо того, особое внимание уделяется надёжности и энергоэффективности электрических машин.

В нашей Республике в последние годы были проведены необходимые на сегодняшний день реформы в целях ускоренного развития всех отраслей экономики, повышения инвестиционной привлекательности, создания благоприятных условий для повышения трудовой активности населения, улучшения социального уровня жизни населения и расширения сферы производства и услуг, а также для надёжного обеспечения населения качественной, бесперебойной электроэнергией по доступным ценам. Одновременно принимаются усиленные меры по созданию, совершенствованию и внедрению новых технологических решений, отвечающих требованиям современности. В Республике проводятся также широкомасштабные мероприятия по созданию, совершенствованию и внедрению новых технологических решений с целью снижения энергоёмкости в полтора раза к 2030 году по отраслям экономики. В Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы, в том числе отмечены важные задачи, такие как «обеспечение экономики «непрерывной электроэнергией» и внедрение технологий «Зеленой экономики» во всех

¹Armin Kerperin. Modellierung der Sättigungseinflüsse einer Synchronmaschine: Eine Berechnung transients Vorgänge der Synchronmaschine mit Berücksichtigung der magnetischen Sättigung Paperback – 3 Aug. Dordmund, 2016.

отраслях, сокращение потерь электроэнергии в электросетях на территориях Республики, тем самым повышая энергоэффективность экономики...».² Для решения этих задач актуальным является проведение научных исследований, направленных на решение проблем влияния насыщения магнитопровода на переходные процессы синхронного двигателя.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в ряде Указов и Постановлений Президента страны, в том числе в Указе Президента Республики Узбекистан №УП-60 от 28 января 2022 года "О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы," Постановлении Президента Республики Узбекистан №ПП-4165 от 7 февраля 2019 года "Об утверждении Концепции развития атомной энергетики в Республике Узбекистан на 2019-2029 годы," Концепции обеспечения Республики Узбекистан электрической энергией на 2020-2030 годы, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики: II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Научные исследования по влиянию насыщения магнитопровода на переходные процессы синхронных машин проводятся во многих научно-исследовательских учреждениях и центрах, в таких как Институт теплофизики и электрофизики (Россия), Брянский государственный технический университет (Россия), Нью-Йоркский технологический институт (США), Миланский политехнический университет (Италия), Университет Мерсина (Турция), Технологический институт Китами (Япония), Современный университет технологий и информации (Египет), Чешский политехнический университет (Чехия), Томский политехнический университет, Новосибирский государственный технический университет, Уральский политехнический университет, Всероссийский научный и технический институт электроэнергетики (Россия), Ташкентский государственный технический университет, Институт проблем энергетики АН Республики Узбекистан и другие.

В решении проблем создания методов и алгоритмов, а также в изучении свойств пусковых режимов синхронных двигателей внесли большой вклад такие известные зарубежные ученые как Р.Рихтер, К.Р. Kovach, I. Rats, Armin Kerperin, P.Park, И.М. Постников, А.И. Важнов, И.А. Глебов, Е.А. Казовский, И.П. Копылов, В.А. Мартынов, Г.А. Сипайлов, И.И. Трещев и другие.

²Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январь, ПФ-60-сон “2022- 2026 йилларга мўлжалланган янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида”ги Фармони
26

Решению научных проблем, связанных с изучением свойств пусковых режимов синхронных двигателей, посвящены работы ведущих ученых Узбекистана. Среди них можно отметить труды К.Р. Аллаева, М.Г. Ахматова, Г. Одилова, Н.Б. Пирматова, Д.С. Салимова, Л.В.Ковешниковой, М.Қ.Бобожанова и других. В результате проведенных научных исследований достигнуты значительные результаты в решении вопросов в области переходных процессов пуска синхронных двигателей линеаризованных уравнений для явнополюсных синхронных двигателей.

Несмотря на значительные успехи, научные проблемы, связанные с исследованием в области переходных процессов пуска с насыщенным магнитопроводом с применением методов нелинеаризованных уравнений для явнополюсных синхронных машин, изучены не достаточно.

В этой диссертационной работе предлагаются методики и технические решения, которые могут быть использованы при проектировании и эксплуатации синхронных двигателей для повышения точности расчётов, обеспечения надёжного пуска тяжело нагруженных машин, снижения негативных эффектов насыщения и повышения энергоэффективности и устойчивости систем электрических машин.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научного проекта № ПЛ-442105947 “Создание нового автоматического устройства для передачи стабильной электрической мощности постоянной частоты в локальную энергетическую систему при изменении параметров ветра и водного потока” (2022-2024 гг.), реализуемого кафедрой «Инженерия электрических машин и приводов» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова.

Цель исследования заключается в разработке математической модели и методики расчёта переходных процессов явнополюсного синхронного двигателя с учётом влияния насыщения магнитопровода.

Задачи исследования:

усовершенствовать полную нелинейную математическую модель явнополюсного синхронного двигателя, учитывающую насыщение магнитопровода в динамических режимах;

разработать методику насыщения магнитопровода на гармонический состав магнитного поля и электромагнитного момента в переходных процессах;

предложить аналитическую зависимость для определения дифференциальной индуктивности рассеяния в обмотках на основе определения параметров явнополюсного синхронного двигателя в условиях локального насыщения магнитной системы;

усовершенствовать метод и схему плавного пуска ЯПСД, обеспечивающих поддержку номинальной величины напряжения, при котором СД постоянно находится в насыщении, т.е. в колене характеристики намагничивания;

провести экспериментальные исследования переходных процессов (пуска) явнополюсного синхронного двигателя с учётом насыщения для разработанных математических моделей и вычислительных методов, экспериментально подтвердить достоверность предложенных подходов.

Объектом исследования является явнополюсный синхронный двигатель.

Предметом исследования являются переходные процессы синхронного двигателя с учетом насыщения магнитопровода, влияющие на параметры и характеристики при асинхронном пуске ЯПСД.

Методы исследования. В работе применён комплекс методов, включающий аналитические методы теории электрических машин, численное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS Maxwell. Для обработки результатов использованы методы гармонического анализа временных функций и методы аппроксимации нелинейных характеристик.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

усовершенствована математическая модель асинхронного пуска явнополюсного синхронного двигателя с учётом влияния насыщения магнитопровода принимая во внимание на основе точного описания реальной динамики пускового тока и электромагнитного момента;

разработана методика насыщения магнитопровода на гармонический состав магнитного поля и электромагнитного момента в переходных процессах;

предложена аналитическая зависимость для определения дифференциальной индуктивности рассеяния в обмотках на основе определения параметров явнополюсного синхронного двигателя в условиях локального насыщения магнитной системы;

усовершенствованы метод и схема плавного пуска ЯПСД на основе критерия обеспечения номинального значения напряжения в точке перегиба характеристики намагничивания и стабильной плавной синхронизации двигателя.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

предложенная методика комплексного моделирования синхронного двигателя может быть внедрена на стадии проектирования электрических машин;

разработана система тиристорного плавного пуска для высокомоментных синхронных двигателей, устраняющая негативные эффекты насыщения при пуске;

разработан метод расчета параметров и пусковых характеристик синхронных машин с высокой точностью;

рассчитаны значения дифференциальных индуктивностей рассеяния явнополюсных синхронных двигателей и переходные процессы с учетом влияния насыщения магнитопровода.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов исследования заключается в обоснованности полученных

результатов, которые подтверждаются применением проверенных методик и математических моделей, использованием современного программного обеспечения для электромагнитного моделирования (ANSYS Maxwell), а также экспериментальной верификацией основных теоретических положений. Расчётные данные сопоставлены с результатами физических экспериментов и известными теоретическими зависимостями, показывая хорошее совпадение, что свидетельствует о высокой степени надежности выводов диссертационной работы.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в развитии теории электрических машин, расширении научных представлений влияния насыщения магнитопровода на электромагнитные процессы в синхронных двигателях, а также в разработке математической модели магнитного поля в воздушном зазоре явнополюсных синхронных двигателей с учетом насыщения магнитопровода.

Практическая значимость результатов исследований объясняется тем, что предложенные методики и технические решения могут быть использованы при проектировании и эксплуатации синхронных двигателей для повышения точности расчётов, обеспечения надёжного пуска тяжело нагруженных машин и повышения энергоэффективности, а также для устойчивости систем электрических машин.

Внедрение результатов исследования. На основании результатов по анализу влияния насыщения магнитопровода на переходные процессы синхронного двигателя:

усовершенствована математическая модель переходных процессов асинхронного пуска, в целях сравнения точности расчётов по учёту влияния степени насыщения магнитопровода по существующим двум методам. В результате выявлено, что неучёт насыщения ЯПСД-15 кВт приводит к большим погрешностям при определении индуктивности дифференциального рассеяния, магнитной индукции, электромагнитного момента и мощности, достигающей до 19,3%;

рекомендованная схема микропроцессорного пуска ЯПСД внедрена в АО «Навоийская ТЭС» (справка №13/1963 АО «Навоийская ТЭС» от 14 октября 2020 г.). В результате за счет снижения пускового тока синхронного двигателя безремонтный период работы синхронного двигателя увеличился в 2,7 раза;

рекомендованный способ пуска ЯПСД внедрен в АО «Навоийская ТЭС» (справка №13/1963 АО «Навоийская ТЭС» от 14 октября 2020 г.). В результате за счет улучшения пускового режима синхронного двигателя и сокращения затрат на ремонт СД достигнут экономический эффект в размере 161 000 000 (сто шестьдесят один миллион) сумов.

Апробация работы. Результаты исследований обсуждались на 4 международных, 1 республиканской научно-практических конференциях и научных семинарах.

Опубликованность результатов исследования. Всего по теме исследований опубликовано 16 научных работ, из них 7 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан, в том числе в 3 зарубежных и 2 республиканских в журналах, а также 3 статьи в сборниках, входящих в базу SCOPUS и получено 1 свидетельство на программный продукт для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 120 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цели и задачи, выявлены объект и предмет исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан. Изложены научная новизна и практические результаты исследований, обоснована достоверность полученных результатов, приведены сведения о внедрении в практику результатов исследования, апробации результатов работы, сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Анализ современного состояния исследований влияния насыщения магнитопровода явнополюсных синхронных двигателей на переходные процессы»** приведен анализ современного состояния вопросов общей теории электрических машин, в частности, явнополюсных синхронных двигателей по учету насыщения магнитопровода.

До сих пор исследования идеализированных электрических машин, особенно ЯПСД, проводятся без учета нелинейной зависимости кривых намагничивания. На этой основе, используя метод наложения, предназначенный только для линейных систем, и токи, электродвижущие силы и магнитные поля в уравнениях разлагаются на отдельные составляющие по осям d - q , затем определяются их суммарные значения.

В современной теории нелинейных электрических цепей разработан целый ряд методов расчета и анализа нелинейных цепей, связанных с проблемами проектирования электротехнических устройств, например кусочно-линейный метод анализа; графический метод эквивалентного преобразования; приближенные аналитические методы исследования периодических функций, в частности, метод гармонической линеаризации.

По результатам большинства исследований ЯПСД с учетом насыщения магнитопровода проводился подробный аналитический обзор.

Одним из основных факторов, влияющих на характеристики переходных процессов пуска ЯПСД, являются магнитные поля пазового рассеяния или сопротивления дифференциального рассеяния. Хотя размером они значительно отличаются от других сопротивлений, но являются одними из основных параметров эквивалентной схемы замещения ЯПСД, входят в состав уравнений, которые описывают статические и динамические

электромагнитные и электромеханические процессы, и являются исходными величинами при использовании программ расчёта переходных процессов электрической машины.

По результатам проделанной работы установлено:

- существующие методы расчета магнитных полей дифференциального рассеяния статора с учетом нелинейностей насыщения зубцовых зон магнитопровода основаны на использовании упрощений, изложенных в теории идеализированных электрических машин, поэтому считаются менее точными;

- существующие к настоящему времени численные методы расчёта электромагнитных полей в воздушном зазоре СД являются громоздкими и менее наглядными;

- математические модели ЯПСД строятся на основе идеализированной электрической машины, причем реальная трехфазная обмотка статора преобразовывается в систему двухосных координат.

Сложившееся положение требует развития новых подходов к проблеме исследования влияния степени насыщения магнитопровода на переходные процессы асинхронного пуска явнополюсных синхронных двигателей. Удачным в этой связи видится математическое моделирование переходных процессов ЯПСД с минимальными упрощениями аналитических выражений с учетом нелинейностей кривых намагничивания с использованием наиболее точных методов аппроксимации кривых. Отмеченные обстоятельства указывают на необходимость создания методов проведения вычислительных экспериментов на математической модели.

Вторая глава диссертации «**Математические модели ЯПСД для исследования переходных процессов пуска с учетом насыщения магнитопровода**» посвящена выбору и совершенствованию математических моделей переходных процессов асинхронного пуска ЯПСД для проведения вычислительных экспериментов по исследованию влияния степени насыщения магнитопровода на процесс пуска.

Для разработки математической модели переходных процессов асинхронного пуска ЯПСД необходимо использовать дифференциальные уравнения: напряжений обмоток статора

$$\left. \begin{aligned} u_a &= -d\Psi_a / dt + i_a r_s \\ u_b &= -d\Psi_b / dt + i_b r_s \\ u_c &= -d\Psi_c / dt + i_c r_s \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

$$u_{II} = -d\Psi_{II} / dt + i_{II} r_{II}, \quad (2)$$

и обмотки возбуждения

$$u_B = -d\Psi_B / dt + i_B r_B, \quad (3)$$

которая замыкается на внешнее сопротивление, величиной в $15 \div 20$ раз больше сопротивления самой обмотки;

и равновесия моментов на валу двигателя

$$M_c = M_{эм} + Jd\omega_r / dt, \quad (4)$$

где $\Psi_a, \Psi_b,$ и Ψ_c - полные потокосцепления с фазными обмотками a, b, c статора; u_a, u_b, u_c и i_a, i_b, i_c - мгновенные значения фазных напряжений и токов обмоток статора; r_s - активное сопротивление фазных обмоток статора; Ψ_B и Ψ_{II} - полные потокосцепления с обмотками возбуждения и пусковой обмотки; u_B, u_{II} и i_B, i_{II} - мгновенные значения напряжений и токов обмоток возбуждения и пусковой обмотки; r_B и r_{II} - активные сопротивления обмотки возбуждения и пусковой обмотки с пусковым сопротивлением; M_c - момент сопротивления производственного механизма; $M_{эм}$ - электромагнитный момент двигателя; J - момент инерции ротора; ω - угловая скорость вращения ротора.

В уравнениях (1) - (3) считаем, что $\psi_k = r_k$ ($k = a; b; c; B; II$).

Для получения достоверных результатов исследований в работе усовершенствована математическая модель ЯПСД с учетом насыщения частей магнитопровода для 3-х фазной обмотки статора без преобразований в двухкоординатную систему, а также математическая модель ЯПСД с насыщенной сталью магнитопровода с использованием квазилинейных дифференциальных уравнений (2-х осную координатную систему).

В целях оценки их качественной и количественной сходимости с реальным объектом в работе проводятся исследования переходных процессов синхронного двигателя с помощью этих двух вариантов математических моделей, затем - экспериментальные исследования переходных процессов на физической модели ЯПСД, далее сравниваются полученные результаты и предлагается вариант математической модели с наиболее точными результатами.

Усовершенствование математической модели ЯПСД динамических процессов асинхронного пуска с насыщенным магнитопроводом. Для этого требуется наличие баланса напряжений электрических цепей в виде уравнений (1) - (3), а также механического движения ротора в дифференциальной форме (4). Тогда система уравнений для математической модели будет выглядеть как

$$\left. \begin{aligned} d\Psi_a / dt &= u_a - i_a r_s \\ d\Psi_b / dt &= u_b - i_b r_s \\ d\Psi_c / dt &= u_c - i_c r_s \\ d\Psi_B / dt &= u_B - i_B r_B \\ d\Psi_{II} / dt &= u_{II} - i_{II} r_{II} \\ \Psi &= \Psi_a + \Psi_b + \Psi_c \\ M_{эм} &= p(\Psi \cdot i_{II} + \Psi \cdot i_B) \\ d\omega_r / dt &= (M_{эм} - M_c) / J \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для достоверного изучения влияния степени насыщения магнитопровода на электромагнитный момент и пусковые характеристики двигателя с помощью математической модели необходимо оперировать результирующим магнитным полем статора машины, равным алгебраической сумме магнитных полей каждой из фазных обмоток

$$\Psi = \Psi_a + \Psi_b + \Psi_c. \quad (6)$$

В обмотке возбуждения индуцируется ЭДС, так как она является сосредоточенной, при ее замыкании в ней создаются пульсирующие ток и магнитный поток.

Принимая определение электромагнитного момента, приведенного выше, запишем его аналитическое выражение как произведение тока обмоток ротора и магнитного поля статора

$$M_{\text{эм}} = p(\Psi \cdot i_{\text{r}} + \Psi \cdot i_{\text{b}}). \quad (7)$$

Известно, что наиболее насыщенной зоной магнитопровода двигателя являются ее зубцовые части. Степень насыщения магнитопровода в математической модели ЯПСД выражается нелинейной системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} i_a &= \Psi_a / L(i_a) \\ i_b &= \Psi_b / L(i_b) \\ i_c &= \Psi_c / L(i_c) \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где $L(i)$ – нелинейная индуктивность фазы обмотки статора, которая определяется экспериментально.

В математическую модель нелинейная индуктивность фазы обмотки статора $L(i)$ или характеристика намагничивания $\Psi_a = L(i_a)i_a$ вводятся с помощью их графического изображения.

Тогда индукция магнитного потока в зубцовой зоне необходимо определять

$$B = \frac{\Phi}{S_c} = \frac{\Phi}{\sum_{Z/2p} b_{Z_{\min}} \cdot l_M} = \frac{\Phi}{b_{Z_{\min}} \cdot Z / (2p) \cdot l_M}. \quad (9)$$

Учет степени влияния характеристики намагничивания магнитопровода в режиме пуска ЯПСД осуществляется путем аппроксимации кривых намагничивания $B = f(i)$. Методика аппроксимации приводится в 3 главе.

Таким образом, решением системы нелинейных дифференциальных уравнений (5), (8), (9), следовательно, решением математической модели ЯПСД с насыщенным магнитопроводом являются найденные переменные тока, магнитного потока, вращающего момента и скорости вращения ротора.

Математическая модель ЯПСД с квазилинейными дифференциальными уравнениями. Вместо реальной электрической машины с трехфазной обмоткой статора принимается идеализированная двухфазная электрическая машина, где реальное результирующее потокосцепление в воздушном зазоре трехфазной машины заменяется двумя составляющими потокосцеплений, взятыми как проекции на ортогональные оси координат $d - q$

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{ad} &= L_{ad} i_d \\ \Psi_{aq} &= L_{aq} i_q \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Если в установившемся режиме ЯПСД магнитные потоки обмоток статора и ротора неподвижны, то в переходном режиме роторные обмотки перемещаются относительно статорных обмоток при изменении скорости вращения ротора в пределах $0 \leq n \leq n_1$. Поэтому для исследования переходных процессов асинхронного пуска в ход ЯПСД с помощью математической модели принимаем систему координатных осей $\alpha - \beta$

$$\left. \begin{aligned} u_{s\alpha} &= \left[r_s + \frac{d}{dt} L_{\sigma s}(t) \right] i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} M(t) i_{m\alpha}, \\ u_{s\beta} &= \left[r_s + \frac{d}{dt} L_{\sigma s}(t) \right] i_{s\beta} + \frac{d}{dt} M(t) i_{m\beta}, \\ 0 &= \left[r_{\Pi} + \frac{d}{dt} L_{\sigma \Pi}(t) \right] i_{\Pi\alpha} + \frac{d}{dt} M(t) i_{m\alpha} + \omega_r [L_{\Pi} i_{\Pi\beta} + M(t) i_{m\beta}], \\ 0 &= \left[r_{\Pi} + \frac{d}{dt} L_{\sigma \Pi}(t) \right] i_{\Pi\beta} + \frac{d}{dt} M(t) i_{m\beta} - \omega_r [L_{\Pi} i_{\Pi\alpha} + M(t) i_{m\alpha}], \\ 0 &= \left[r_B + \frac{d}{dt} L_{\sigma B}(t) \right] i_{B\alpha} + \frac{d}{dt} M(t) i_{m\alpha} + \omega_r [L_B i_{B\alpha} + M(t) i_{m\beta}], \\ M_{\text{ЭМ}}(t) &= pM(t)[i_{m\alpha} i_{\Pi\alpha} - i_{m\beta} i_{\Pi\alpha} + i_{m\alpha} i_{B\alpha}], \\ \omega_r &= \frac{p}{J} [M_{\text{ЭМ}}(t) - M_c(t)] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где p - число пар полюсов машины; $M_{\text{ЭМ}}$ - электромагнитный момент с составляющими, которые создаются взаимодействием токов следующих пар: намагничивающий ток обмотки статора по осям α и β с токами пусковой обмотки и обмотки возбуждения по оси α .

Из системы уравнений (11) можно получить выражение для электромагнитного момента и ЭДС, которые прямо включают влияние насыщения магнитопровода

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{ЭМ}} &= \psi_a i_q - \psi_q i_d = E_{\delta q} i_q + E_{\delta d} i_d \\ E_{\delta q} &= k_d (x_{ad} i_d + E_q + \sum_{i=1}^{n_d} E_{rqi}) \\ E_{\delta d} &= -k_q (x_{aq} i_q - \sum_{k=1}^{n_q} E_{rqi}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Для решения системы уравнений (12) разработан алгоритм вычисления электромагнитного момента и угловой скорости вращения ротора при асинхронном пуске синхронного двигателя.

На рис. 1 представлен алгоритм расчёта электромагнитного момента и угловой скорости вращения при асинхронном пуске СД.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет проводить численные эксперименты по пусковым характеристикам явнополюсного синхронного двигателя с высокой достоверностью, а также можно быстро просчитать асинхронный пуск СД при различных нагрузках или степенях насыщения.

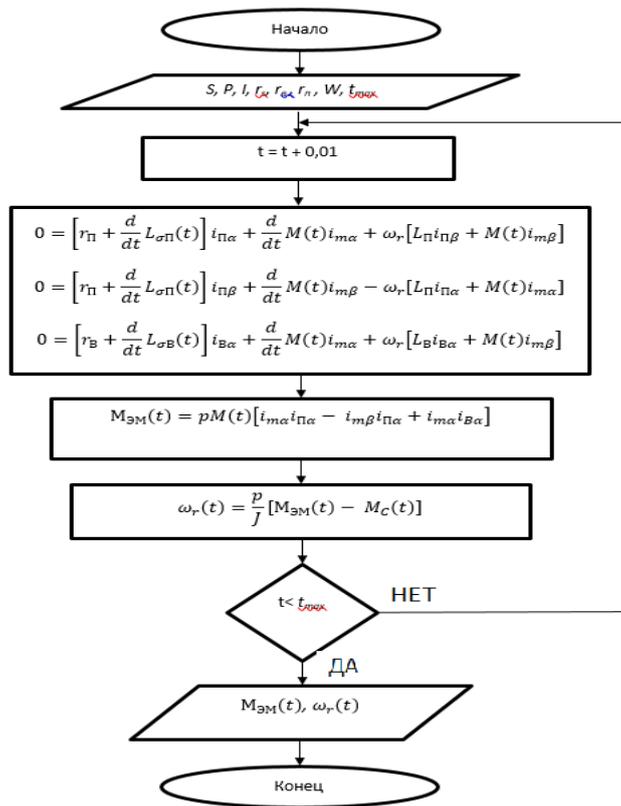


Рис. 1. Алгоритм расчёта электромагнитного момента и угловой скорости вращения при асинхронном пуске синхронного двигателя

В третьей главе диссертации «Усовершенствование методов аппроксимации и учета нелинейностей насыщения ЯПСД» рассматриваются методика аппроксимации характеристик намагничивания ЯПСД, упрощенная методика расчета магнитных полей дифференциального рассеяния с учетом нелинейностей насыщения зубцовых зон, расчет магнитного поля статорной обмотки синхронного двигателя, а также приводятся результаты исследования переходных процессов пуска ЯПСД.

Выполнения поставленной задачи можно добиться путем аппроксимации характеристик намагничивания частей магнитопровода. При этом для аналитического представления нелинейной характеристики намагничивания $B = f(H)$ частей магнитопровода машины достаточно использовать одним из двух методов: кусочно-линейную аппроксимацию или кусочно-постоянные функции.

Например, для экспериментальной характеристики, которая задана следующей последовательностью точек $B_k; H_k$ (где $k = 1, 2, 3, \dots, n$), при использовании метода кусочно-линейной аппроксимации на участке $H_k - H_{k+1}$ полученная функция

$$B = B_k + (B_{k+1} - B_k) / (H_{k+1} - H_k) (H - H_k) \quad (13)$$

будет иметь вид ломаной линии с изломом в заданной точке характеристики.

Если использовать второй метод, на этом же участке $H_k - H_{k+1}$ то данная функция постоянна, например:

$$H = H_k \text{ или} \quad (14)$$

$$H = 0,5(H_k + H_{k+1}), \quad (15)$$

и полученная характеристика представляет собой ступенчатую функцию. Разумеется, количество изломов и ступеней (13) - (15) для рассматриваемой нелинейной характеристики зависит от количества экспериментальных точек « k ». Однако эти методы аппроксимации нелинейных характеристик намагничивания являются менее точными. Единственное условие для повышения точности расчетов это - увеличение экспериментальных точек k . Поэтому, оно будет неприемлемым для настоящего случая.

По сравнению с этими методами аппроксимации, с более точным описанием нелинейных кривых является аппроксимация совокупности отрезков квадратичных или кубических полиномов - сплайнов. Обладая сравнительно одинаковыми объемами вычислений, кубические сплайны отличаются большей точностью и получают большее применение на практике.

При использовании кубических сплайнов узлы аппроксимации и узлы сопряжения совпадают. Поэтому для определения коэффициентов кубических сплайнов используют следующие условия: прохождение сплайна через узлы $B_k(H_k) = B_k$; равенство в узлах первых $B'_k(H_k) = B'_{k+1}(H_k)$ и вторых $B''_k(H_k) = B''_{k+1}(H_k)$ производных соседних отрезков k и $k+1$. Кроме этого, для однозначного определения коэффициентов необходимо также знать два крайних условия.

Определяются нелинейные зависимости результирующей магнитной индукции в воздушном зазоре и ее гармонических составляющих

$$B_\delta = f(H_{\delta n}). \quad (16)$$

Необходимо отметить, что формула (16) была определена для идеализированного двигателя с учетом нелинейности насыщения магнитопровода.

При определении магнитного поля дифференциального рассеяния предлагается использовать разность результирующего магнитного поля и основной гармоники поля в воздушном зазоре

$$B_{\delta pq.v} = B_{\delta pq.v} - B_{\delta pq.1}. \quad (17)$$

На этой основе, с помощью аналитических выражений (16), (17), были построены кривые (рис.2) основных гармонических составляющих магнитных индукций $B_{\delta pq1} = f(\theta)$ и их высших гармонических $B_{\delta pq.v} = f(\theta)$, составляющих по окружности расточки статора θ в пределах одного полюсного деления для трехфазной двухслойной обмотки статора ЯПСД.

Необходимо отметить, что из-за «однофазного» строения конструкции обмотки возбуждения, индуктированная в ней ЭДС и наведенные токи будут создавать однофазное и пульсирующее магнитное поле. Разложив такое магнитное поле в составляющие прямого, обратного и

нулевого следования фаз, можно заметить следующее. Взаимодействие третьей и кратной ей гармонических составляющих с вращающимся магнитным полем статора образует дополнительные электромагнитные моменты, при сложении которых с другими моментами получаются провалы результирующего электромагнитного вращающего момента в некоторых участках статической механической характеристики ЯПСД. При этом ротор может застревать на промежуточной скорости (точка *A* на рис.3).

Исследование их количественного и качественного влияния на переходных процессах пуска ЯПСД предстоит определить путем экспериментальных исследований.

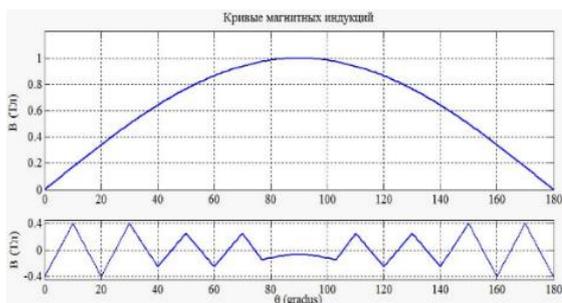


Рис.2. Кривые магнитных индукций, снятые при $B_{\delta pq.1}=1,0$ Тл.

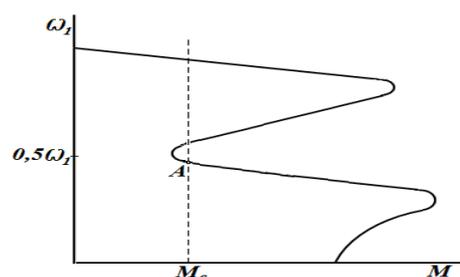


Рис.3. Статическая механическая характеристика ЯПСД

Моделирование магнитного поля синхронного двигателя с использованием программного комплекса “Ansys Maxwell”. ANSYS Maxwell - программный комплекс - способен определять распределение магнитных полей, а также интегральные характеристики - силы и вращающего момента, индуктивности и др. Для повышения эффективности проектирования электрических машин в состав Maxwell входит модуль RMXprt, реализующий классические методы расчета на основе эквивалентных магнитных цепей.

Распределение магнитного поля и насыщение магнитопровода. На рис. 4 и 5 показаны поля распределения магнитной индукции в поперечном сечении двигателя при номинальном режиме работы.

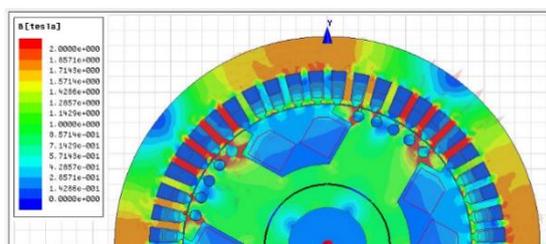


Рис.4. Форма распределения магнитной индукции с учётом насыщения магнитопровода ЯПСД

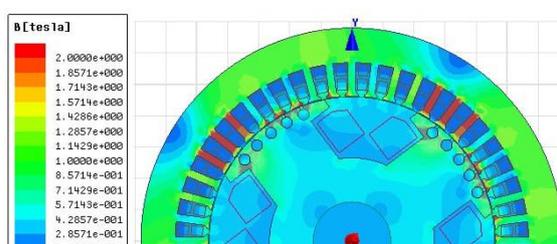


Рис.5. Форма распределения магнитной индукции без учёта насыщения магнитопровода ЯПСД

На рис. 4 приведена форма распределения магнитной индукции с

учётом насыщения магнитопровода явнополюсного синхронного двигателя, с использованием программного модуля (ANSYS Maxwell RMxprt). На рис.5 приведена форма распределения магнитной индукции без учёта насыщения магнитопровода явнополюсного синхронного двигателя, с использованием программного модуля.

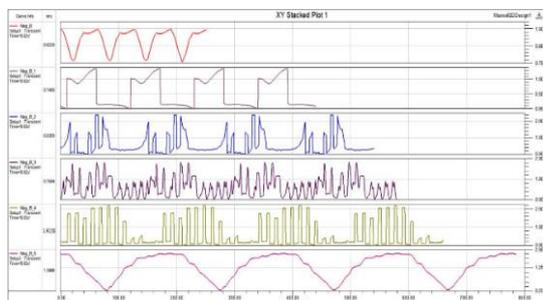


Рис. 6. Распределение магнитной индукции по статору и ротору с учётом насыщения магнитопровода

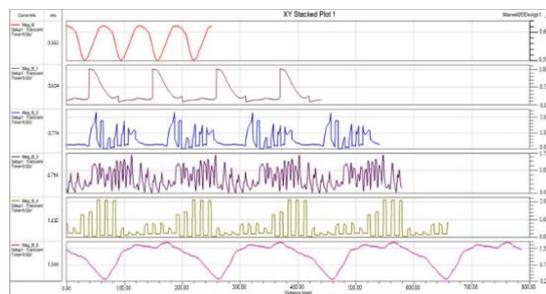


Рис.7. Распределение магнитной индукции по статору и ротору без учёта насыщения магнитопровода

На рис. 6 и 7 представлено распределение магнитной индукции по статору и ротору с учётом и без учёта насыщения магнитопровода явнополюсного синхронного двигателя.

А также на рис. 8 и 9 представлены осциллограммы электромагнитного момента во время пуска явнополюсного синхронного двигателя с учётом и без учёта насыщения магнитопровода.

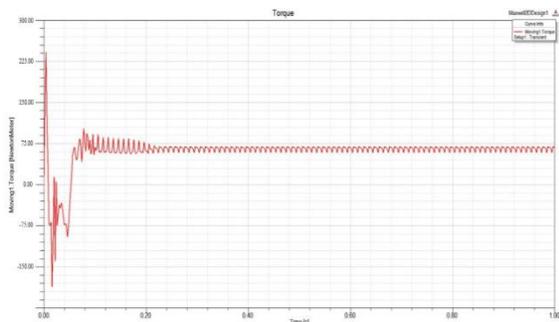


Рис. 8. Осциллограмма электромагнитного момента ЯПСД с учётом насыщения магнитопровода

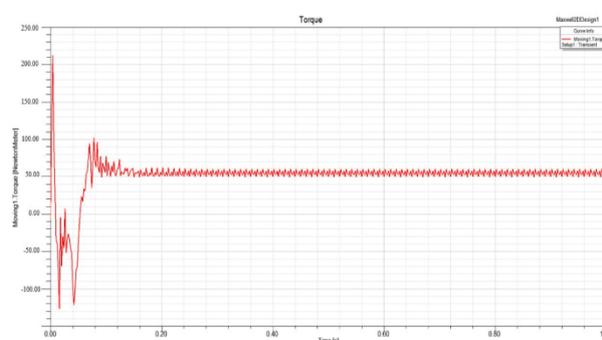


Рис. 9. Осциллограмма электромагнитного момента ЯПСД без учёта насыщения магнитопровода

В частности, сравнительный анализ моделей с учётом и без учёта магнитного насыщения показал, что магнитная индукция в отдельных частях машины при учёте насыщения примерно на 14,4% выше, чем в линейном случае без насыщения. Это подчёркивает важность учёта эффекта насыщения для повышения точности расчётов.

Методика расчета индуктивностей дифференциального рассеяния статорной обмотки ЯПСД. В современных высоко используемых явнополюсных синхронных двигателях индуктивности дифференциального рассеяния, как и главная индуктивность статорной обмотки, обусловленные

электромагнитным полем воздушного зазора, являются основными параметрами машины. Определим методику расчета индуктивности дифференциального рассеяния, которая позволяет учитывать факторы, влияющие на данную индуктивность.

Индуктивность дифференциального рассеяния

$$L_{\sigma} = L - L_{\Gamma} \quad (18)$$

где L – индуктивность обмотки, обусловленная действительным полем в зазоре; L_{Γ} – главная индуктивность обмотки. Она связана с электромагнитной энергией поля следующим выражением

$$L = \frac{2}{i^2} W, \quad (19)$$

где W – электромагнитная энергия поля в воздушном зазоре двигателя.

На рис. 10 приведена зависимость индуктивности дифференциального рассеяния от величины воздушного зазора

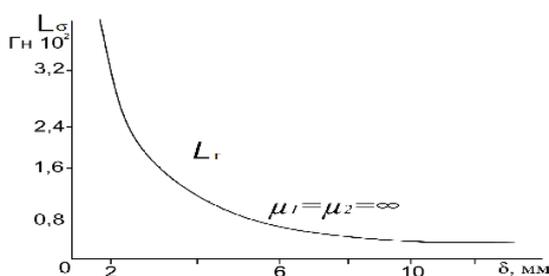


Рис. 10. Зависимость индуктивности дифференциального рассеяния от величины воздушного зазора

Тогда главная индуктивность обмотки статора двигателя будет определена как

$$L_{\Gamma} = \frac{2}{i^2} W_{\Gamma}, \quad (20)$$

где W_{Γ} – электромагнитная энергия основного рабочего поля в зазоре.

Индуктивность дифференциального рассеяния одной фазы трехфазной обмотки при питании ее трехфазным током

$$L_{\sigma.T} = L_{\Gamma} - L_{\Gamma.T} = \frac{4}{3i^2} (W_T - W_{\Gamma T}), \quad (21)$$

где W_T – электромагнитная энергия действительного поля трехфазной обмотки.

Применительно к однофазной и трехфазной обмоткам аналитические выражения (21) можно записать

$$W_T = \frac{\mu_0 l_{\delta} \delta (b+c)}{4} \int_0^{2\pi} H_T^2 d\varphi, \quad (22)$$

$$W_{\Gamma.T} = \frac{\mu_0 l_{\delta} \delta (b+c)}{4} \int_0^{2\pi} H_{\Gamma T}^2 d\varphi, \quad (23)$$

В четвертой главе «Экспериментальные исследования учета влияния

нелинейностей насыщения магнитопровода на переходные процессы пуска ЯПСД» описываются исследования по подтверждению теоретических разработок и предложенных методов расчета. Выполняется вычислительный эксперимент по определению степени влияния насыщения магнитопровода на высшие гармонические составляющие магнитного поля воздушного зазора и на характер протекания переходных процессов асинхронного пуска ЯПСД.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований прямого и плавного пуска синхронных машин на установке ЯПСД мощностью 2,2 кВт, напряжением 220 В и скоростью вращения ротора 1500 об/мин, а также на ЯПСД мощностью 8000 кВт, напряжением 6 кВ, скоростью вращения 3000 об/мин.;

- разработка схемы плавного пуска ЯПСД, обеспечивающая поддержание номинальной величины напряжений машины.

При выполнении экспериментальных исследований для измерения графических зависимостей по времени был использован цифровой осциллограф MSO-64 фирмы Tektronix, позволяющий следить за током синхронного двигателя, на качество переходных напряжением и скоростью вращения ротора.

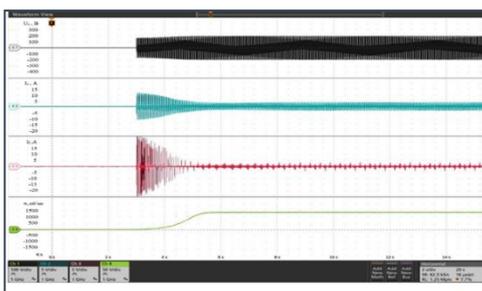


Рис. 11. Осциллограмма асинхронного пуска СД мощностью 2,2 кВт (прямой пуск)

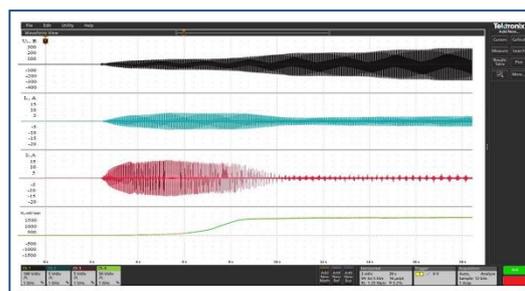


Рис. 12. Осциллограмма асинхронного пуска СД мощностью 2,2 кВт (плавный пуск)

Таким образом, при эксперименте выявлено, что при прямом пуске пусковой ток в 5 раз увеличивается от номинального значения, время которого составляет 2 секунды. При плавном пуске пусковой ток в 2 раза увеличивается от номинального значения, время которого составляет 7 секунд.

Быстрый выход на рабочую скорость сопровождается большими электромагнитными нагрузками, и модель с учётом насыщения способна отразить реальные пики момента и тока, влияющие на ускорение, а также насыщение влияет на пуск и показывает необходимость для снижения ударных нагрузок при пуске.

На 13 и 14 рис. приведено изменение момента прямого пуска ЯПСД-8000 кВт с учётом и без учёта насыщения магнитопровода.

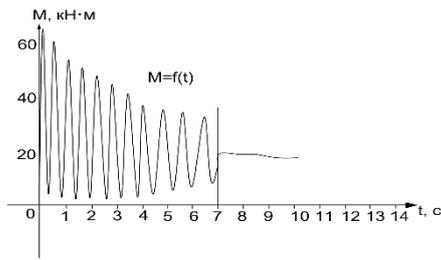


Рис.13. Изменение момента прямого пуска двигателя ЯПСД-8000 кВт (с учётом насыщения магнитопровода)

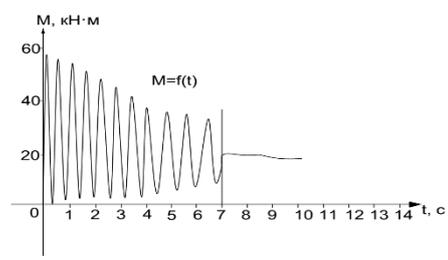


Рис.14. Изменение момента прямого пуска двигателя ЯПСД-8000 кВт (без учёта насыщения магнитопровода)

На 15 и 16 рис. приведено изменение момента плавного пуска ЯПСД-8000 кВт с учётом и без учёта насыщения магнитопровода.

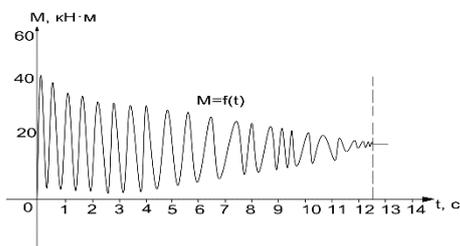


Рис.15. Изменение момента плавного пуска двигателя ЯПСД-8000 кВт (с учётом насыщения магнитопровода)

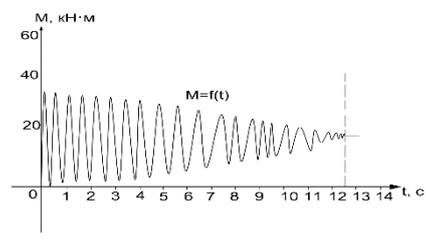


Рис.16. Изменение момента плавного пуска двигателя ЯПСД-8000 кВт (без учёта насыщения магнитопровода)

В данной работе предлагается использовать при пуске двигателей систему «Тиристорный преобразователь напряжения – СД» (ТПН-СД) с микропроцессорным управлением.

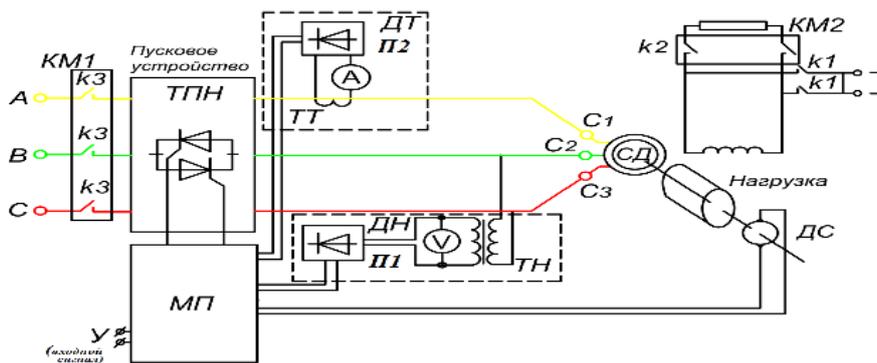


Рис. 17. Принципиальная структурная схема устройства плавного пуска явнополюсного синхронного двигателя (ЯПСД) с тиристорным регулятором напряжения

На рис. 17 представлена принципиальная структурная схема устройства плавного пуска явнополюсного синхронного двигателя (ЯПСД) с тиристорным регулятором напряжения. Данная система, обозначаемая как «ТПН-СД», включает следующие основные компоненты: СД - синхронный

двигатель; ТПН - тиристорный преобразователь напряжения; МП - микропроцессорное управление; ДТ - датчик тока; ТТ - трансформатор тока; П2 - полупроводниковый преобразователь; А - амперметр; ДН - датчик напряжения; ТН - трансформатор напряжения; П1 - полупроводниковый преобразователь; V - вольтметр; ДС - датчик скорости; k1, k2, k3 - ключи пусковых аппаратов; R - резистор.

Следует отметить, что усовершенствованная схема с тиристорным регулятором напряжения позволяет реализовать плавный пуск синхронного двигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) на тему «Анализ влияния насыщения магнитопровода на переходные процессы синхронного двигателя» представлены следующие выводы:

1. Усовершенствована математическая модель переходных процессов асинхронного пуска, в целях сравнения точности расчётов по влиянию степени насыщения магнитопровода по существующим двум методам (кусочно-линейная аппроксимация и метод кубических полиномов). В результате выявлено, что неучёт насыщения ЯПСД-15 кВт приводит к большим погрешностям при определении индуктивности дифференциального рассеяния, магнитной индукции, электромагнитного момента и мощности, достигающей до 19,3%

2. Проведён расчёт с помощью программы AnsysMaxwell магнитного поля и его гармонических составляющих обмотки статора явнополюсного синхронного двигателя мощностью 15 кВт с учётом насыщения магнитопровода в режиме пуска. В результате выявлено, что неучёт насыщения приводит к большим погрешностям, достигающим до 14,4%

3. Получены и обоснованы аналитические зависимости для определения дифференциальных индуктивностей рассеяния обмоток в условиях локального насыщения магнитопровода, которые позволяют более точно учитывать влияние насыщения зубцовых зон при расчёте параметров явнополюсного синхронного двигателя.

4. Разработана схема плавного пуска ЯПСД, обеспечивающая поддержание номинальной величины напряжения машины. В результате система ТПН-СД позволяет осуществлять пуск СД плавным изменением (увеличением) напряжения при низких пусковых токах, а микропроцессорное управление позволяет относительно быстро пройти участки с провалами в механической характеристике.

5. Предложенный метод пуска рекомендован и принят к внедрению на газодожимной компрессорной станции с синхронными двигателями АО «Навоийская ТЭС» мощностью 8 МВт. В результате ожидаемый экономический эффект оценён в размере 161 миллион сумов.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
DSC.03/10.12.2019.T.03.03 AT TASHKENT STATE TECHNICAL
UNIVERSITY NAMED AFTER ISLAM KARIMOV**

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY
NAMED AFTER ISLAM KARIMOV**

XALBUTAYEVA AZIZA KAMALIDDINOVNA

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF MAGNETIC CORE SATURATION ON
THE TRANSIENT PROCESSES OF A SYNCHRONOUS MOTORS**

05.05.02 - Electrical Engineering. Power plants, systems. Electrical Complexes and Devices

**ABSTRACT OF THE DISSERTATION FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF
PHILOSOPHY (PhD) IN TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent – 2025

The topic of the dissertation for the degree of doctor of philosophy (PhD) in technical sciences has been registered with the number B2023.2.PhD/T922 in the supreme attestation commission under the Ministry of Higher education, science and innovations.

The dissertation was conducted at Tashkent state technical university named after Islam Karimov. The abstract of the dissertation is published in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) on the website of the scientific council (www.tdtu.uz) and on the "ZiyoNet" Informational and Educational Portal (www.ziynet.uz).

Scientific Supervisor: **Pirmatov Nurali Berdiyrovich**
Doctor of technical sciences, Professor

Official opponents: **Bobojanov Maxsud Qalandarovich**
Doctor of technical sciences, Professor

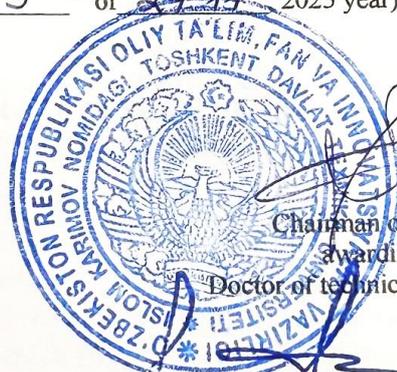
Ishnazarov Oybek Xayrilaevich
Doctor of technical sciences, Professor

Leading organization: **Tashkent State Transport University**

The defense of the dissertation will take place at the meeting of the scientific council with the number DSc.03/10.12.2019.T.03.03 at Tashkent state technical university named after Islam Karimov on the year 2025, on the "13" day of December at 10:30 o'clock. (Address: 100095, Tashkent city, Universitet Street, 2. Tel./fax: (99871) 207-07-32; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

The dissertation can be reviewed at the Information resource center of Tashkent state technical university named after Islam Karimov (registered under number 58). Address: 100095, Tashkent city, Universitet street, 2. Telephone: (99871) 207-14-70.

The abstract of the dissertation was distributed on the "25" of 11, 2025 year.
(The registry statement number dated "9" of 24.11, 2025 year).



K.R. Allayev
Chairman of scientific council on
Awarding Scientific Degrees,
Doctor of technical sciences, professor,
academic

I.U. Rakhmonov
Scientific secretary of scientific council
on awarding scientific degrees,
Doctor of technical sciences, professor

T.Sh. Gayibov
Chairman of scientific seminar on
awarding scientific degrees,
Doctor of Technical sciences, professor

INTRODUCTION (Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in technical sciences)

The relevance and necessity of the dissertation topic. In the world, synchronous machines are among the most widespread and powerful electrical machines used in all types of power plants and in industry, and their faultless operation is one of the important issues in production, as well as largely determined by the correctness of the selection and calculation of their parameters during design. Currently, large-scale research is being conducted in countries with developed technology and technology to model the transient processes of synchronous machines. In this regard, special attention is paid to the development of methods for accurate modeling of starting processes, taking into account the saturation of magnetic cores.

The aim of the research development of a mathematical model and methodology for calculating transient processes of a synchronous motor with a visible pole, taking into account the influence of saturation of the magnetic core.

The tasks of the research are as follows:

to improve the complete nonlinear mathematical model of an explicitly polarized synchronous motor, taking into account the saturation of the magnetic core in dynamic modes;

develop a method for saturation of the magnetic core with the harmonic composition of the magnetic field and electromagnetic moment in transient processes;

propose an analytical dependence for determining the differential scattering inductance in the windings based on determining the parameters of an apparently polar synchronous motor under local saturation conditions of the magnetic system;

to improve the method and scheme of smooth starting of the apparently pole synchronous motor (APSM), ensuring the maintenance of the nominal value of the voltage, at which the APSM is constantly in saturation, i.e., in the magnetization characteristic crank;

conduct experimental studies of transient processes (starting) of an explicitly polar synchronous motor, taking into account saturation for the developed mathematical models and computational methods, experimentally confirm the reliability of the proposed approaches.

The object of the research is an apparently polar synchronous motor.

The subject of the research is the transient processes of the synchronous motor, taking into account the saturation of the magnetic core, influencing the parameters and characteristics of the synchronous motor during the asynchronous start of the synchronous motor.

The methods of the research encompass the application of a comprehensive set of techniques, including analytical methods from the theory of electrical machines and numerical modeling using the finite element method in the ANSYS Maxwell software package. To process the results, harmonic analysis of time functions and approximation methods for nonlinear characteristics were employed.

The scientific novelties of the research include:

the mathematical model of asynchronous starting of an explicitly polar synchronous motor has been improved, taking into account the influence of magnetic core saturation, based on an accurate description of the real dynamics of the starting current and electromagnetic torque;

a methodology has been developed for analyzing the effect of magnetic core saturation on the harmonic composition of the magnetic field and electromagnetic torque in transient processes;

an analytical dependence for determining the differential scattering inductance in the windings based on the determination of the parameters of an explicitly polar synchronous motor under local saturation conditions of the magnetic system has been proposed;

the scheme and method of smooth starting of the APSM were improved based on the criterion for ensuring the nominal value of the voltage at the bending point of the magnetization characteristic and stable smooth synchronization of the motor.

Approbation of research results. The research results were discussed at 4 international and 1 republican scientific-practical conferences and scientific seminars.

Publication of research results. A total of 16 scientific works have been published on the research topic, including 7 articles in journals recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan, including 3 foreign and 2 republican journals, as well as 3 articles in collections included in the SCOPUS database and 1 certificate for a software product for computers.

Volume and structure of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of literature and appendixes. The volume of the dissertation is 120 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. N.B. Pirmatov, K. Alimkhodjaev, A. Holbutaeva, M.O. Khalikova. Method of calculating leakage flux taking into account nonlinear saturation of the magnetic circuit // Europaishe Fachhochschule. European Applied Sciences. № 12. 2015. P. 30-32 (05.00.00; №3).
2. Пирматов Н.Б., Халбутаева А.К. Методика учета нелинейностей насыщения магнитопровода в расчете дифференциального рассеяния обмотки якоря синхронных машин // “Проблемы энерго-и ресурсосбережения” - Ташкент, 2016. - №1-2. С. 32-35. (05.00.00; №21).
3. Toirov O.Z., Khalbutaeva A.K. Analysis of the Method for Calculation of Differential Scattering Reactivities of Synchronous Machines with According to Saturation Effects // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. India. 2022. - Vol. 9, Issue 3, March 2022. ISSN: 2350-0328. PP. 19149-19152 (05.00.00; №8).
4. Toirov O.Z., Khalbutaeva A.K. Method for accounting for saturation nonlinearities of a magnetic core of a bare-pole synchronous machine using a mathematical model // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. India. 2022. - Vol. 9, Issue 8, August 2022. ISSN: 2350-0328. PP. 19595-19599 (05.00.00; №8).
5. Халбутаева А.К. Обзор современных подходов к моделированию переходных процессов в явнополюсных синхронных машинах с учётом насыщения магнитопровода // Научно-технический журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2025. -№1 с. 64-85 (05.00.00; №5).
6. Туйчиев Ф.Н., Халбутаева А.К. Моделирование магнитного поля синхронного двигателя с использованием программного комплекса “Ansys Maxwell”. // «Проблемы энерго- и ресурсосбережения». Специальный выпуск №88. Ташкент, 2025. С.176-187 (05.00.00; №21).
7. Халбутаева А.К. Анализ методов определения сопротивлений дифференциального рассеяния синхронных машин с учётом насыщения магнитопровода. // Вестник ТашИИТ №2. Тошкент, 2019. с.188-192 (05.00.00; №11).
8. Халбутаева А.К., Хамзаев А. Методы определения сопротивлений дифференциального рассеяния крупных двигателей переменного тока с учётом насыщения магнитопровода // Композиционные материалы №4, 2019, стр.92-95 (05.00.00; №13).

II бўлим (Часть II; PartII)

9. Пирматов Н.Б., Халбутаева А.К. Программа расчёта пусковых характеристик синхронных двигателей с учётом насыщения магнитопровода // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU №18396 04.08.2022.

10. O. Toirov, N. Pirmatov, A. Khalbutaeva, D. Jumaeva, A. Khamzaev. Method of calculation of the magnetic induction of the stator winding of a spiritual synchronous motor // E3S Web of Conferences 401, 04033 (2023) (CONMECHYDRO 2023). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340104033>.

11. O. Toirov, A. Khalbutaeva, Z. Toirov. Calculation of the magnetic flux with considering nonlinearities of saturation of the magnetic circuit of synchronous motors // III International Scientific and Technical Conference “Actual Issues of Power supply systems” (ICAIPSS2023). P.1-4.

12. O.Toirov, K. Alimkhodjaev, N. Pirmatov, A. Kholbutaeva. Mathematical model to take into account the influence of saturation of the magnetic circuit on the starting characteristics of a synchronous motor // E3S Web of Conferences 216, 01119 (2020), RSES 2020.

13. Пирматов Н.Б., Халбутаева А.К. Математическая модель для учёта влияния насыщения магнитопровода на пусковые характеристики синхронного двигателя // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики: Вып. 70. Методические и практические проблемы надёжности систем энергетики. В 2-х книгах. // Книга 2 отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2019, с. 375-384 .

14. Халбутаева А.К. Методика расчёта реактивных сопротивлений дифференциального рассеяния синхронных машин с учётом влияния насыщения магнитопровода // Материалы республиканской научно-технической конференции «Электротехника, электромеханика, электротехнологии и материалы электротехники» Андижан, 2022. с.290-299.

15. Халбутаева А.К. Метод учета нелинейностей насыщения магнитопровода явнополюсной синхронной машины с использованием математической модели // Тезисы для XX Международной научно-практической конференции, Белорусский национальный технический университет, 2022. С.175-177.

16. Toirov O.Z., Pirmatov N.B., Khalbutaeva A.K., T.E. Rashidov. Calculation of the magnetic field of differential scattering of the stator synchronous motors // «Эффективная энергетика будущего: проблемы и решения» Материалы Международной научно-технической конференции часть 1, Фергана. 14-15 декабрь 2023, с.77-85.

