

**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**

БЕКИШЕВ АЛЛАБЕРГЕН ЕРГАШЕВИЧ

**ИККИ ЎҚ БЎЙИЧА ҚЎЗГАТИЛАДИГАН СИНХРОН
ГЕНЕРАТОРНИНГ ЎЗ-ЎЗИДАН ЧАЙҚАЛИШ ЖАРАЁНИДА
ИШЛАШ ҚОБИЛИЯТИНИ ОШИРИШ**

05.05.01 – Энергетика тизимлари ва мажмуалари

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

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

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

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

Бекишев Аллаберген Ергашевич

Икки ўқ бўйича кўзгатиладиган синхрон генераторнинг ўз-ўзидан
чайқалиш жараёнида ишлаш қобилиятини ошириш..... 3

Бекишев Аллаберген Ергашевич

Повышение живучести синхронного генератора с двухосным
возбуждением при самораскачивании..... 23

Bekishev Allabergen Ergashevich

Increasing the survivability of a synchronous generator with biaxial excitation
during self-oscillation..... 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**

БЕКИШЕВ АЛЛАБЕРГЕН ЕРГАШЕВИЧ

**ИККИ ЎҚ БЎЙИЧА ҚЎЗГАТИЛАДИГАН СИНХРОН
ГЕНЕРАТОРНИНГ ЎЗ-ЎЗИДАН ЧАЙҚАЛИШ ЖАРАЁНИДА
ИШЛАШ ҚОБИЛИЯТИНИ ОШИРИШ**

05.05.01 – Энергетика тизимлари ва мажмуалари

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

КИРИШ (докторлик (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда электр энергетикаси соҳасини ривожлантиришнинг ҳозирги замон талаби истеъмолчиларни электр энергияси билан узлуксиз таъминлаш, энергетика тизимининг ишлаш қобилиятини ошириш мақсадида икки ўқ бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторларнинг электромеханик ўткинчи иш режимларини ҳисоблаш услубиятини ишлаб чиқиш масалаларига алоҳида аҳамият берилмоқда. Ҳозирги кунда ривожланган давлатларда “...икки ўқ бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторларнинг кўзғатиш тоқларини мустақил равишда ростлаш орқали ўткинчи жараёнларни бошқариш бўйича кенг кўламли тадқиқотлар олиб борилмоқда”¹. Бу борада, жумладан икки ўқ бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторларнинг статик ва динамик турғунлигини оширишга эътибор берилиб, қурилманинг ишончлилиги ва ишлаш қобилиятини оширишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда электр энергетикаси тизимларида юз берадиган электромагнит ва электромеханик ўткинчи жараёнларни ўрганиш орқали, тизим барқарорлигини сақлаб қолишга қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, жумладан, синхрон генераторлар тузилишини такомиллаштириш билан, яъни роторида иккита кўзғатиш чулғами бўлган синхрон генераторларнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнларини ўрганиш бўйича тадқиқотлар устивор ҳисобланмоқда. Шу билан бирга электр станцияларидаги генераторларнинг электромагнит ва электромеханик ўткинчи жараёнлари вақтида ишлаш қобилиятини ошириш, истеъмолчиларини узлуксиз сифатли электр энергия билан таъминлаш, айни вақтда долзарб вазифалардан ҳисобланмоқда.

Республикамызда иқтисодиётнинг стратегик муҳим соҳаларидан бири бўлган энергетика соҳасидаги синхрон генераторларни ўткинчи электромеханик жараёнлар пайтида бошқариш муаммолари, бунда биринчи навбатда генераторларнинг шикастланишларсиз электр энергия ишлаб чиқариш самарадорлигини ошириш бўйича илмий изланишлар ва уларни амалиётга жорий этиш масалалари кўриб чиқилмоқда. 2022 - 2026 йилларга мўлжалланган янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегиясида, жумладан 24 мақсадда: “Иқтисодиётни электр энергияси билан узлуксиз таъминлаш ҳамда Ўзбекистон энергетика тизимининг қўшни давлатлар энергетика тизимлари билан барқарор ишлашини таъминлаш”² вазифалари белгиланган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда, хусусан, Ўзбекистон электр энергетикаси тизимида ишлатилаётган синхрон генераторларнинг электромеханик ўткинчи иш режимларида ишлаш қобилиятини ошириш, икки ўқ бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторларнинг статик ва динамик турғунлигини кўзғатиш чулғамларидаги тоқларни тўғри ростлаш орқали ошириш, электр энергетикаси тизимининг барқарор ишлашини таъминлаш

¹<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235248472301243X?via%3Dihub>

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

масалаларини ечишга қаратилган илмий-тадқиқот ишларини олиб бориш муҳим ҳисобланади.

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 ушбу йўналишга тегишли барча меъёрий ҳужжатларда келтирилган мақсад ва вазифаларни бажаришда ҳамда юқоридаги муаммоларни ечишда, роторига бўйлама ва кўндаланг кўзғатиш чулғамлари жойлаштирилган, икки ўқ бўйича кўзғатиладиган синхрон генератор ва унинг кўзғатиш тоқларини, икки ўқ бўйича кўзғатиш тизими ёрдамида ростлаш орқали амалга ошириш имкониятини кўзда тутувчи ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Электр энергиясини ишлаб чиқарувчи станциялардаги генераторларнинг ўз-ўзидан чайқалиш ўткинчи электромеханик жараёнларида юз берадиган авария ҳолатларини олдини олиш учун бажарилаётган илмий ишлардан бири, икки ўқ бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнларини ўрганишга қаратилган илмий-тадқиқотлар дунёнинг етакчи илмий марказларида ва олий таълим муассасаларида, жумладан California Institute of Technology (АҚШ), Tokyo technology institute (Япония), University of Waterloo (Канада), Polytechnic University of Milan (Италия), School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University (Пекин, Хитой), Harbin Electric Machinery Company Limited (Харбин, Хитой), Electrical Engineering Department, Visvesvaraya National Institute of Technology (Нагпур, Ҳиндистон), Electrical Engineering Department, UIET Babasaheb Bhimrao Ambedkar University (Лакноу, Ҳиндистон), Ягона энергетик тизими ИТМ (НТЦ, Россия), Бутун Россия электр энергетика илмий-тадқиқот институти (ВНИИЭ, Россия), Москва энергетика институти (МЭИ, Россия) ва Тошкент давлат техника университети (ТДТУ, Ўзбекистон) илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Роторида бир биридан ярим кутб бўлинмаси масофасида силжитилган иккита кўзғатиш чулғамли синхрон машина яратиш ва уларни бошқариш каби масалаларни ҳал қилишда бир қатор куйидаги таниқли хорижий олимлар катта ҳисса қўшганлар, жумладан А.А.Горев, Н.Н.Шедрин, М.М.Ботвинник, Ю.Г.Шакарян, Н.Н.Блоцкий, Д.А.Городский, Н.И.Соколов, Ю.Н.Гараев, Е.К.Лоханин, Е.Л.Россовский, И.А.Лабунец, П.В.Сокур, Н.Д.Пинчук, И.А.Кади - Оғлы, А.Г.Логинов, О.Ҳ.Zaipuna, О.Р.Malik, Mohamad Abd El-Raheim Badr, Trung-Kien Hoang, Guorui Xu, Zhenzhen Wang,

Bingchen Liu, Yang Zhan, Haisen Zhao, Ajaysekhar Agaralaa, Sunil S. Bhata, Ishan Srivastava va бошқалар.

Икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон машиналарнинг электромагнит ва электромеханик ўткинчи жараёнлари тадқиқоти каби илмий муаммоларни ҳал қилишга Ўзбекистоннинг таниқли олимларининг илмий ишлари бағишланган. Булардан: Х.Ф.Фазылов, Қ.Р.Аллаев, Т.У.Насыров, М.Г.Ахматов, О.Г.Одилов, Н.Б.Пирматов, Ж.С.Салимов, Л.В.Ковешникова, М.Қ.Бобожанов. Олиб борилган илмий тадқиқотлар натижасида икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон машиналарнинг статик ва динамик турғунлигини ошириш масалаларини ечишда салмоқли натижаларга эришилди.

Сезиларли муваффақиятларга қарамай, электр энергетика тизимининг электромеханик ўткинчи жараёни барқарорлигини белгиловчи ўз-ўзидан чайқалиш ҳодисалари икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларда ўрганилмаган. Мазкур диссертация ишида икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларнинг ўз-ўзидан чайқалишидаги электромеханик ўткинчи жараёнларини ўрганиш учун физик модел яратилган ва математик модел ишлаб чиқилган ҳамда ўз-ўзидан чайқалиш жараёнлари атрофлича ўрганилиб, тегишли 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 университетида амалга оширилаётган ІЛ-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 икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг ўз-ўзидан чайқалишини сўндириш орқали ишлаш қобилиятини оширишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

синхрон генераторларнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнларини сўндириш орқали ишлаш қобилиятини оширишнинг мавжуд усулларини таҳлил қилиш; икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг демпферлаш коэффициентини аниқлаш, электромеханик ўткинчи жараёнини ҳисоблаш усулини такомиллаштириш ва ўз-ўзидан чайқалишининг математик модели ва алгоритминини ишлаб чиқиш;

икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг ўз-ўзидан чайқалишини сўндириш учун қўзғатиш чулғамларидаги токни бошқариш имконини берувчи электр схемани ишлаб чиқиш;

икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнида ишлай олиш қобилиятини тажриба йўли билан текшириш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генератор олинган.

Тадқиқотнинг предмети икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёни ташкил қилади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларнинг электромеханик ўткинчи жараёнлари назарияси, математик аппроксимация, 2-3 даражали дифференциал тенгламаларни ечишнинг Рунге-Кутта усули, ўз-ўзидан чайқалиш жараёнларини MatLab Simulink дастурида моделлаштириш, олинган натижаларни таққослаш ва қайта ишлашда математик статистика усулларида фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг алмаштириш схемаси асосида бўйлама ва кўндаланг ўқлари бўйича эквивалент қаршиликларини эътиборга олган ҳолда демпферлаш коэффициенти аниқланган;

икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларнинг электромеханик ўткинчи жараёнларини ҳисоблаш усули генератор тенгламаларини тармоқ тенгламаларига мувофиқлигини таъминлаш асосида қўзғатиш даражасини ҳисобга олган ҳолда такомиллаштирилган;

икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг ўз-ўзидан чайқалишининг математик модели ва ҳисоблаш алгоритми синхрон генератор ва тармоқ тенгламалари асосида магнит тўйинишни ҳамда тармоқ параметрларини эътиборга олган ҳолда ишлаб чиқилган;

икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг ротор сирпанишини эътиборга олган ҳолда, қўзғатиш тоқларини ростлаш асосида ротор чайқалишини сўндирувчи демпферлаш моментини бошқариш усули такомиллаштирилган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси қуйидагилардан иборат:

тармоқ параметрлари ва магнит тўйинишни эътиборга олувчи, икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнлари математик модели ва уни ҳисоблашнинг алгоритми ишлаб чиқилди;

икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнларини тўлиқ компенсациялаш орқали ишлаш қобилияти оширилди;

икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнларини тадқиқ қилиш учун физик ва Matlab Simulink моделлари яратилди.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнларининг физик, математик тенгламалар ва MatLab Simulink дастури моделлари орқали олинган маълумотлар ҳамда уларнинг ўзаро мутаносиблиги, ишлаб чиқаришда фойдаланишга қабул қилиниши орқали асосланганлиги, кўп сонли назарий маълумотларнинг тажриба йўли билан олинган маълумотларга мос келиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот

натижаларининг илмий аҳамияти икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторлар учун демпферлаш коэффициентининг аниқланганлиги, электромеханик ўткинчи жараёнларини ҳисоблаш усулининг такомиллаштирилганлиги ҳамда ўз-ўзидан чайқалиш жараёни математик моделининг ишлаб чиқилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти тадқиқот натижалари иссиқлик электр станцияларида ишлатилаётган синхрон генераторнинг демпферлаш моментини қўзғатиш тоқларини бошқариш асосида ростлайдиган реверсив тиристор ўзгарткичли қўзғатиш тизими электр схемасининг жорий этилиши натижасида ўз-ўзидан чайқалиш жараёни вақти 40% га камайишига ва синхронизмга кириш қобилияти ошишининг эвазига икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг электромагнит ва электромеханик ўткинчи жараёнларда барқарор ишлаш қобилиятининг ортишига эришилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларнинг ўз-ўзидан чайқалишини сўндириш усуллари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг электромеханик ўткинчи жараёнларини ҳисоблаш усули “Иссиқлик электр станциялари” АЖ тасарруфидаги “Тошкент ИЭС”да жорий қилинган (“Иссиқлик электр станциялари” АЖнинг 2023 йил 26-сентябрдаги 04-20/1180-сонли маълумотномаси). Натижада электромеханик ўткинчи жараёнларда синхрон генераторнинг авариявий ўчишининг бартараф этилиши уни тармоққа қайта улаш вақтида сарфланадиган 36000 м³ табиий газни иқтисод қилиш имконини берган;

икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг ўз-ўзидан чайқалишининг математик модели ва алгоритми “Иссиқлик электр станциялари” АЖ тасарруфидаги “Тошкент ИЭС”да жорий этилган (“Иссиқлик электр станциялари” АЖнинг 2023 йил 26-сентябрдаги 04-20/1180-сон маълумотномаси). Натижада синхрон генераторнинг демпферлаш коэффициентини ошириш эвазига электромеханик ўткинчи жараённинг ўтиш вақтини 40% га камайтириш имконинияти яратилган;

қўзғатиш тоқларини ростлаш асосида, ротор чайқалишини сўндирувчи демпферлаш моментини бошқариш усули “Иссиқлик электр станциялари” АЖ тасарруфидаги “Тошкент ИЭС”нинг электр сеҳидаги қуввати 165 МВтли турбогенераторнинг электромеханик ўткинчи жараёнларда ишлаш қобилиятини ошириш масаласини ечишда жорий этилган (“Иссиқлик электр станциялари” АЖнинг 2023 йил 26-сентябрдаги 04-20/1180-сон маълумотномаси). Натижада синхрон генератор синхронизмга тезда киришиб, электромагнит ва электромеханик ўткинчи жараёнларда барқарор ишлаш қобилиятининг ошиши эвазига қутиладиган иқтисодий самарадорлик 157 590 000 (бир юз эллик етти миллион беш юз тўқсон минг) сўмни ташкил этган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 10 та илмий-амалий анжуманлар ва семинарларда, шу жумладан, 8 та халқаро ва 2 та республика анжуманларида ҳамда семинарларида апробациядан ўтди.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 20 та илмий иш, шу жумладан, хорижий журналларда 2 та мақола (Scopus маълумотлар базасига киритилган конференцияларда 4 та мақола), ОАК томонидан докторлик Диссертациялари (PhD)нинг асосий илмий натижаларини нашр этиш учун тавсия этилган республика ва хорижий журналларда 8 та мақола, 1 та ЭҲМ дастурлари учун гувоҳнома, илмий анжуманлар тўпламларида 10 та тезис мавжуд.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми жами 119 бетдан иборат.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари, объекти ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён этилган, олинган натижаларнинг илмий-амалий аҳамияти ва ишончлилиги ёритилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий этилганлиги, ишнинг апробация натижалари, эълон қилинган ишлар ва диссертациянинг тузилиши ва ҳажми бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **“Синхрон машиналарнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнларини сўндириш орқали ишлаш қобилиятини ошириш бўйича тадқиқот ишларининг ҳозирги ҳолати”** деб номланган биринчи бобида синхрон генераторларнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнларини келтириб чиқарувчи омиллар таҳлили ҳамда ўз-ўзидан чайқалиш жараёнларини бартараф этишнинг мавжуд усуллари тўғрисида маълумотлар келтирилган. Бундан ташқари икки ўқ бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторнинг (ИЎБҚСГ) алмаштириш схемаси асосида демпферлаш коэффициенти аниқланган.

Синхрон генераторларнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнларини ўрганиш доирасидаги адабиётлар таҳлили шуни кўрсатадики, ИЎБҚСГларнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнлари ўрганилмаган. Маълумки, синхрон машиналарда $\gamma^2 \gg \alpha_c^2$ шарт асосан бажарилганлиги туфайли, синхрон генераторларнинг параметрлари бир режимдан, иккинчи режимга ўтишда тебраниш қонуни бўйича ўзгаради, яъни синхрон машиналар ҳар доим тебранишларга мойил бўлади. Таҳлилий тадқиқотлар шуни кўрсатадики, бўйлама демпфер чулғами параметрларини ўзгартириш ёки бўйлама кўзғатиш чулғамидаги токни ошириш генераторнинг ўз-ўзидан чайқалишини бартараф эта олмайди. Синхрон генератор ўз-ўзидан чайқалиш чегарасида ишлаш пайтида бўйлама ўқ бўйича жойлашган чулғамдан ўтаётган ток тескари демпферлаш моментини ҳосил қилса, унга перпендикуляр бўлган

ўқдаги кўндаланг чулғамдан ўтаётган ток мусбат демпферлаш моментини ҳосил қилади. Синхрон генераторнинг ўз-ўзидан чайқалишини бартараф этишда кўндаланг кўзғатиш чулғами ёки кўндаланг демпферлаш чулғамининг ахамияти катта ҳисобланади.

Ўз-ўзидан чайқалиш электромеханик ўткинчи жараён бўлиб, уни қуйидаги тенглама асосида таҳлил қилиш мумкин:

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} + P_d \frac{d\delta}{dt} = P_T - P_{эм} \quad (1)$$

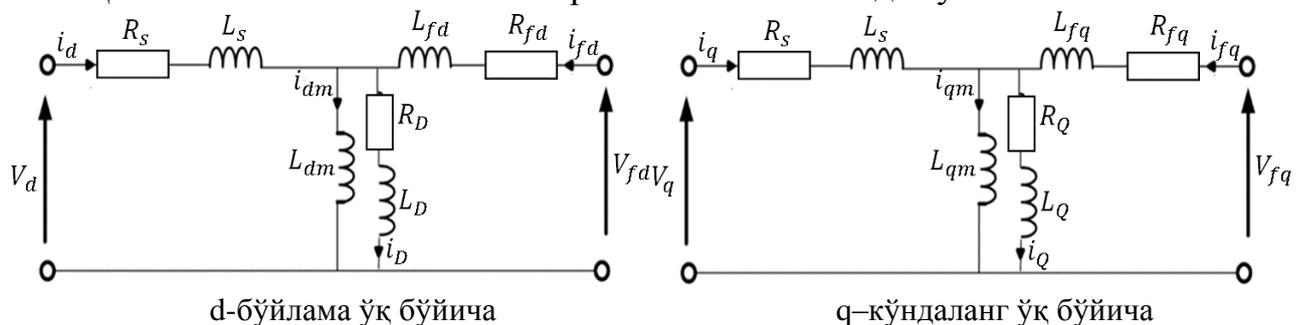
бу ерда $P_d = P_{Гd} + P_{Td}$ -синхрон генераторнинг демпфер занжирлари ва ташқи электр тармоғининг генератор ротори ҳаракатига таъсирини ҳисобга оладиган демпферлаш коэффициентидир. $P_{Гd}$ -генератор ва унинг кўзғатишни автоматик ростлаш (ҚАР) қурилмасини ҳисобга олувчи демпферлаш коэффициенти, $P_{Td} = \frac{dP_T}{d\omega}$ - турбинани ҳисобга олувчи демпферлаш коэффициентининг ташкил этувчиси ҳисобланади. ИЎБҚСГ нинг динамик эквивалент алмаштириш схемасидаги эквивалент актив ва реактив қаршиликларни эътиборга олган ҳолдаги $P_{Гd}$ демпферлаш коэффициенти ташкил этувчиси қуйидагича ифодаланади: $P_{Гd} = P_{Гd1} + P_{Гd2}$,

$$\text{бу ерда } P_{Гd1} = U^2 \left[\frac{r_{q\gamma}^2}{(x_{q\gamma}^2 \omega_\gamma^2 + r_{q\gamma}^2)^2} \cdot \cos^2 \delta_0 + \frac{r_{d\gamma}^2}{(x_{d\gamma}^2 \omega_\gamma^2 + r_{d\gamma}^2)^2} \sin^2 \delta_0 \right] \quad (2)$$

ИЎБҚСГ нинг $P_{Гd2}$ ташкил этувчиси эса алмаштириш схемасидаги бўйлама ва кўндаланг кўзғатиш чулғамининг кўзғатилиш даражасига ва статор чулғамининг актив қаршилигини эътиборга олган ҳолда қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$P_{Гd2} = P'_{Гd2} + P''_{Гd2} = - \left[\frac{(I_d - I_q)^2}{2} r_s + \left(\frac{E_d}{x_d} \right)^2 \left(1 - \frac{r_s^2}{x_d^2} \right) r_s - \left(\frac{E_q}{x_q} \right)^2 \left(1 + \frac{r_s^2}{x_q^2} \right) r_s \right] \quad (3)$$

Юқоридаги (2, 3) тенгламалар қуйидаги 1-расмда келтирилган ИЎБҚСГнинг эквивалент алмаштириш схемаси асосида тузилган.

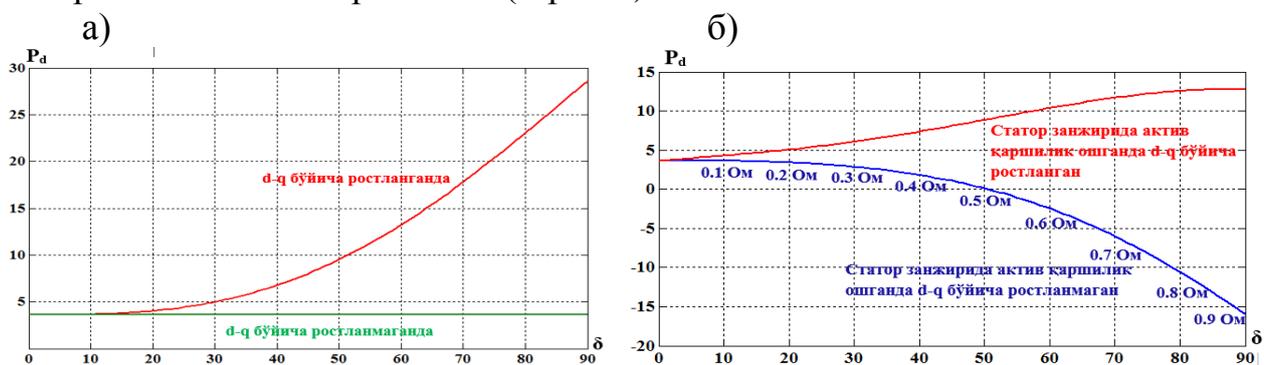


1-расм. ИЎБҚСГнинг эквивалент алмаштириш схемаси

(2) тенгламага кўра, синхрон генераторлар кам юклама билан ишлаганда ёки юксиз ишлаш режимида, $\cos^2 \delta_0 \rightarrow 1$, $\sin^2 \delta_0 \rightarrow 0$ бўлади. Бу шуни англатадики, ушбу ҳолатда демпферлаш фақат кўндаланг контур томонидан амалга оширилади ва бўйлама контурнинг таъсири кам ёки умуман

бўлмайди. Бу эса кам юкламаларда кўндаланг кўзғатиш чулғамининг параметрлари демпферлаш коэффициентига таъсири юқори эканлигини англатади. (3) тенгламага кўра, статорнинг актив қаршилиги ва бўйлама d ўқи бўйича кўзғатиш даражасининг ошиши тескари демпферлаш коэффициентини ортишига сабаб бўлса, кўндаланг q ўқи бўйича кўзғатиш даражасининг ошиши тескари демпферлаш моментини камайишига сабаб бўлади. Демак ИЎБҚСГларда d ва q ўқлари бўйича кўзғатишни тўғри ростлаш орқали демпферлаш коэффициентини ошириш имконияти мавжуд.

(2) ва (3) тенгламалар ҳамда 1-расмдаги эквивалент алмаштириш схемаси асосида бўйлама ва кўндаланг ўқлари бўйича актив ва реактив эквивалент қаршиликларни эътиборга олган ҳолда, кўзғатиш чулғами тоқларини тўғри ростлаш орқали демпферлаш коэффициентини 7,8 карра ошириш имконияти яратилган (2-расм.).



2-расм. Кўзғатиш тоқлари ростланган ва ростланмаган ҳолдаги ИЎБҚСГнинг статор занжирдаги актив қаршилик эътиборга олмаган (а) ва олган (б) ҳолдаги демпферлаш коэффициентининг ўзгариши

Диссертациянинг “Синхрон машиналарнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнларини моделлаштириш” деб номланган иккинчи бобида ИЎБҚСГнинг электромеханик ўткинчи жараёнларини ҳисоблаш усули генератор тенгламаларини тармоқ тенгламаларига мослаштириш асосида такомиллаштирилган, ИЎБҚСГнинг ўз-ўзидан чайқалишининг математик модели ва алгоритми синхрон генератор ва тармоқ тенгламалари асосида магнит тўйинишни ҳамда тармоқ параметрларини эътиборга олган ҳолда ишлаб чиқилган, ИЎБҚСГнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнларини акс эттирувчи Matlab Simulink иммитацион модели яратилган.

Диссертациянинг ушбу бобида ИЎБҚСГнинг дифференциал тенгламаларини ёзишда генератор тенгламалари тармоқнинг матрицали тенгламалари билан мос тутатиши кўзда тутилган. Бунинг учун синхрон генераторнинг дифференциал тенгламаларини ЭЮК кўринишига ўтказиш усули кўриб чиқилган. Бунда аввало учта контурни ҳисобга олиб, оқим илашимлиги ёзилади (q, d индексларсиз):

$$\psi = \frac{U_f \frac{x_a}{r_f} g' + i(x - x_3')}{1 + pT_0'} + \frac{U_f \frac{x_a}{r_f} g'' + i(x_3' - x_3'')}{1 + pT_0''} + \frac{U_f \frac{x_a}{r_f} g''' + i(x_3'' - x_3^{(z)})}{1 + pT_0'''} x^{(z)} \quad (4)$$

Синхрон генераторнинг кўзғатиш ЭЮКси:

$$E_e = U_f \frac{x_a}{r_f} \quad (5)$$

Ўткинчи ва ўта ўткинчи ЭЮКлар:

$$\left. \begin{aligned} E' &= \frac{E_e g' + i(x - x_3')}{1 + pT_0'} \\ E'' &= \frac{E_e g'' + i(x_3' - x_3'')}{1 + pT_0''} \\ E^{(z)} &= E''' = \psi - x^{(z)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ИЎБҚСГнинг тенгламаларини тармоқнинг матрицали тенгламаларига мослаштириш учун E_{Td} ва E_{Tq} ЭЮКлари қуйидагича киритилади:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= E_{Tq} + x_d^{(z)} i_d \omega_s - r i_q \\ u_q &= E_{Td} + x_q^{(z)} i_q \omega_s - r i_d \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(6) тенгламадан ψ ни топиб, ИЎБҚСГнинг оператор кўринишидаги Парк-Горев тенгламаларига қўйиб, қуйидаги тенгламалар тизими ёзилади:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -p(E_d^{(z)} + x_q^{(z)} i_q) + \omega_s (1 - s)(E_q^{(z)} + x_d^{(z)} i_d) - r i_q \\ u_q &= p(E_q^{(z)} + x_d^{(z)} i_d) - \omega_s (1 - s)(E_d^{(z)} + x_q^{(z)} i_q) - r i_d \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Генератор тенгламалари тармоқнинг матрицали тенгламалари билан мос тутатиши учун ишлатиладиган E_{Td} ва E_{Tq} аълоқа ЭЮКлари қуйидагича топилади:

$$\left. \begin{aligned} E_{Tq} &= E_q^{(z)} \omega_s - s \omega_s (E_q^{(z)} + x_d^{(z)} i_d) - p(E_d^{(z)} + x_q^{(z)} i_q) \\ E_{Td} &= -E_d^{(z)} \omega_s + s \omega_s (E_d^{(z)} + x_q^{(z)} i_q) + p(E_q^{(z)} + x_d^{(z)} i_d) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

(5) ва (6) тенгламалар асосида магнит тўйинишни эътиборга олган ҳолда ИЎБҚСГнинг электромеханик ўткинчи жараёнларини тадқиқ қилиш мумкин бўлган қуйидаги математик тенгламалар тизими ёзилади:

$$\left. \begin{aligned} pE' K_T &= \frac{1}{T_0'} [E_e g' + i(x - x_3') - E'] \\ pE'' K_T &= \frac{1}{T_0''} [E_e g'' + i(x_3' - x_3'') - E''] \\ p(E^{(z)} - E' - E'') K_T &= \frac{1}{T_0'''} [E_e g''' + i(x_3'' - x^{(z)}) - (E^{(z)} - E' - E'')] \\ p\omega_p T_J &= \frac{P_{Тнью} \mu_T P_s}{1 + s} - \frac{E_q^{(z)} i_d + E_d^{(z)} i_q + (x_d^{(z)} - x_q^{(z)}) i_d i_q}{1 + s_u} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

бу ерда икки ўқ бўйича йўналган асосий оқимларни эътиборга олувчи,

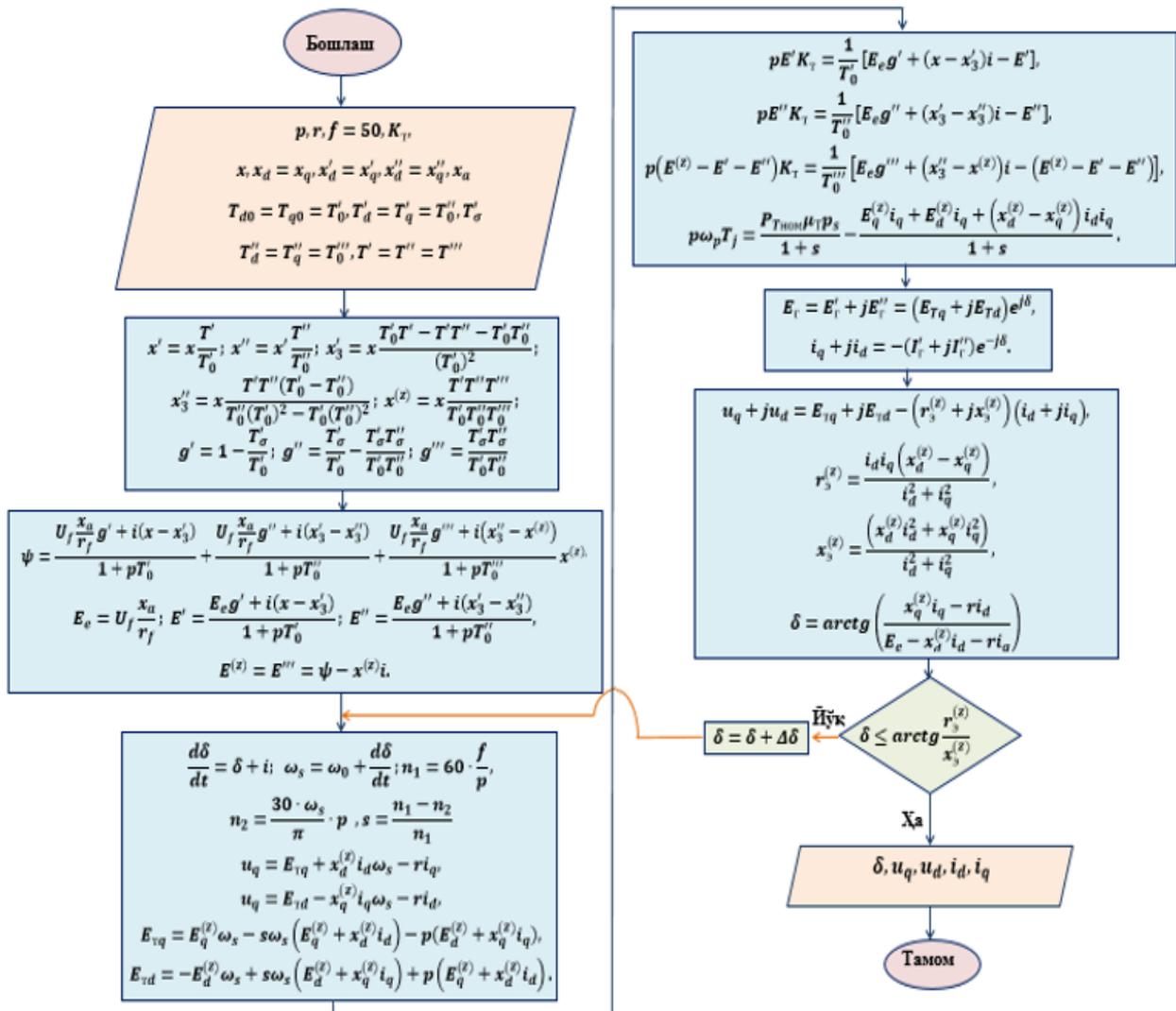
$K_T(K_{Td}, K_{Tq})$ ночизик тўйиниш коэффициентларидир.

ИЎБҚСГ статор занжири тенгламаларини электр тармоғи тенгламаларига боғлаш учун $x_d^{(z)}$ ва $x_q^{(z)}$ индуктив қаршиликларни $z_{\mathcal{E}}^{(z)} = r_{\mathcal{E}}^{(z)} + jx_{\mathcal{E}}^{(z)}$ эквивалент комплекс шаклидаги қаршиликларга алмаштирилади. Натижада генератор статор занжирининг тармоқ занжири билан мослашган қуйидаги тенграмаси келиб чиқади:

$$u_q + ju_d = E_{Tq} + jE_{Td} - (r_{\mathcal{E}}^{(z)} + jx_{\mathcal{E}}^{(z)})(i_d + ji_q) \quad (11)$$

(11) тенгламага $E_{Tq} - u_q$ ва $E_{Td} - u_d$ қийматларини қўйиб, қуйидаги эквивалент комплекс қаршиликлар аниқланади:

$$\left. \begin{aligned} r_{\mathcal{E}}^{(z)} &= \frac{i_d i_q (x_d^{(z)} - x_q^{(z)})}{i_d^2 + i_q^2} \\ x_{\mathcal{E}}^{(z)} &= \frac{(x_d^{(z)} i_d^2 - x_q^{(z)} i_q^2)}{i_d^2 + i_q^2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$



3-расм. Тармоқ параметрларини ва магнит тўйинишни ҳисобга олган ҳолда ИЎБҚСГнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнини ҳисоблаш алгоритми

Юқоридаги ўзгартиришлар шуни кўрсатадики, ИЎБҚСГнинг статор занжири тенгламаларини тармоқ занжири тенгламаларига мослашни аёлоқа ЭЮКси $E_T = E_{Tq} + jE_{Td}$ орқали амалга оширилади.

Синхрон генераторларнинг тенгламаларини ҳисоблагандан сўнг E_{Td} , E_{Tq} ЭЮКларини (q, jd) координата тизимидан, электр тармоғининг (i, j) координаталар тизимига қуйидагича ўтказилади:

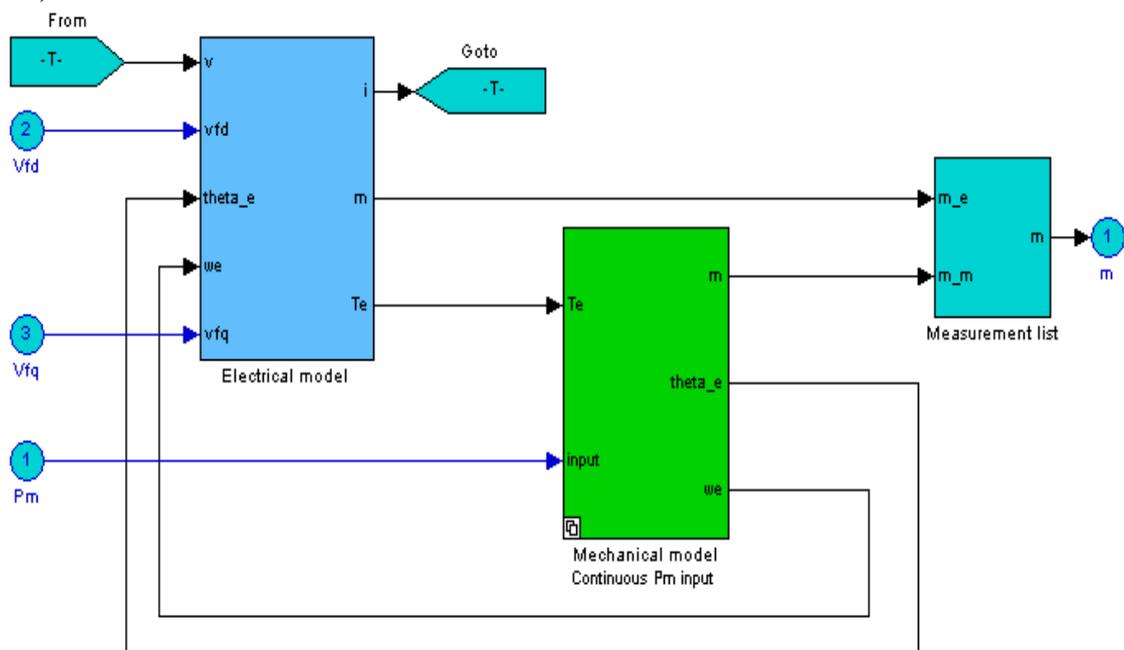
$$E_T = E'_T + jE''_T = (E_{Tq} + jE_{Td})e^{j\delta} \quad (13)$$

Электр тармоғининг тенгламаларини ҳисоблашдан сўнг синхрон генераторнинг I'_T ва I''_T тоқларини электр тармоғининг (i, j) координаталар тизимидан синхрон генераторнинг (q, jd) координата тизимига қуйидагича қайта ўтказилади:

$$i_q + ji_d = -(I'_T + jI''_T)e^{-j\delta} \quad (14)$$

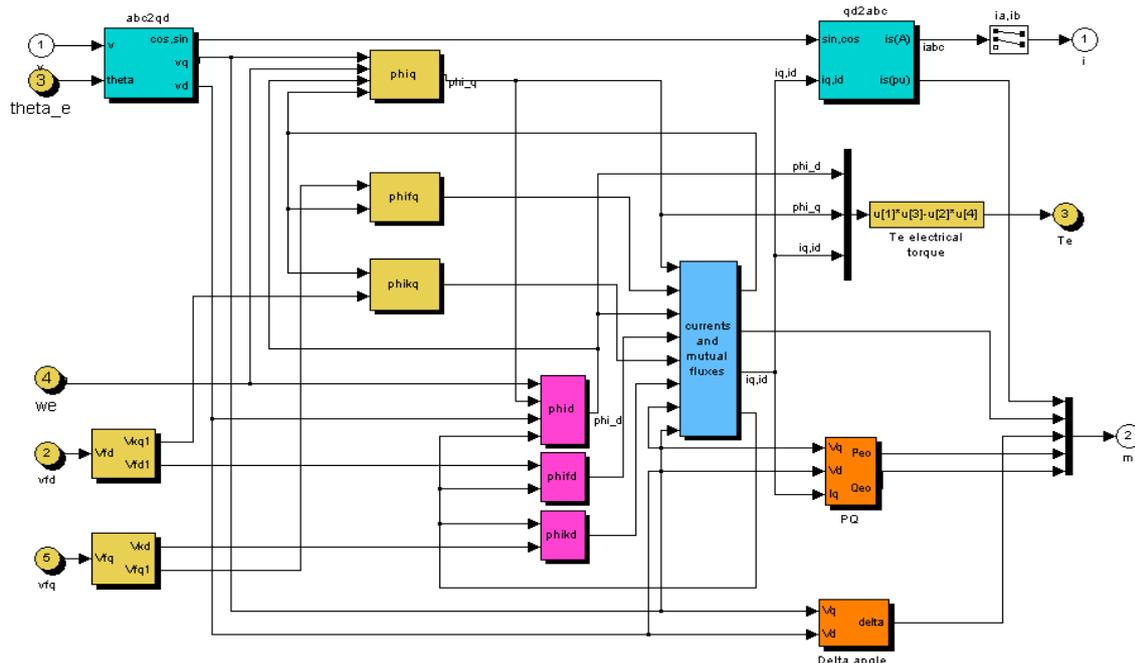
Юқоридаги 3-расмда келтирилган ИЎБҚСГнинг электромеханик ўткинчи жараёни бўлган ўз-ўзидан чайқалишини ҳисоблашнинг алгоритми (4÷14) тенгламалар асосида ишлаб чиқилган.

Юқоридаги (10) дифференциал тенгламалар тизими асосий икки қисмдан иборат бўлиб, у электр катталиклар қисми ва механик катталиклар қисмдан ташкил топган. (10) дифференциал тенгламалар тизимининг аввалги 3 та ташкил этувчиси электромагнит жараёнларни ифодаловчи дифференциал тенгламалардир ва тенгламалар тизимининг охириги 4 чи ташкил этувчиси синхрон генератор роторининг механик ҳаракат тенгламаси ҳисобланади. Шунинг учун ушбу диссертация ишида Matlab Simulink моделини яратиш учун иккита асосий қисм кўриб чиқилган. Бунинг учун электр ва механик қисмдан иборат Matlab Simulink нимтизимлари яратилди (4-расм.).



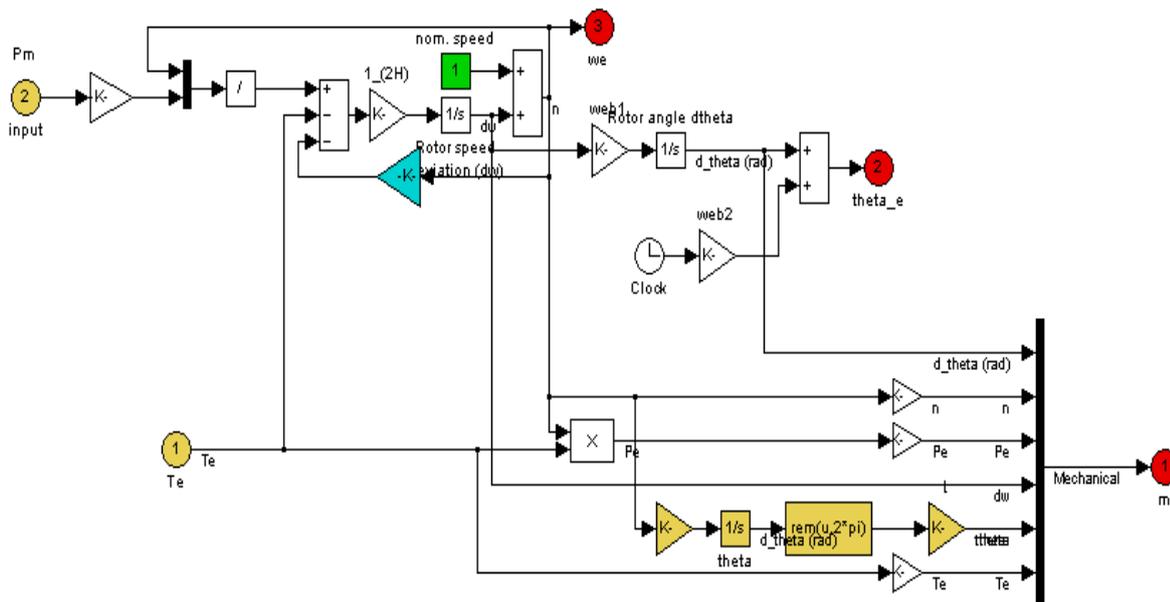
4-расм. ИЎБҚСГнинг электр ва механик қисмларидан иборат Matlab Simulink нимтизими

Синхрон генераторнинг электр қисми Matlab Simulink моделини яратишда тоқлар ва оқим илашимликларини ҳисобловчи нимтизимлар тузилди (5-расм.).



5-расм. ИЎБҚСГнинг электр қисми учун Matlab Simulink нимтизими

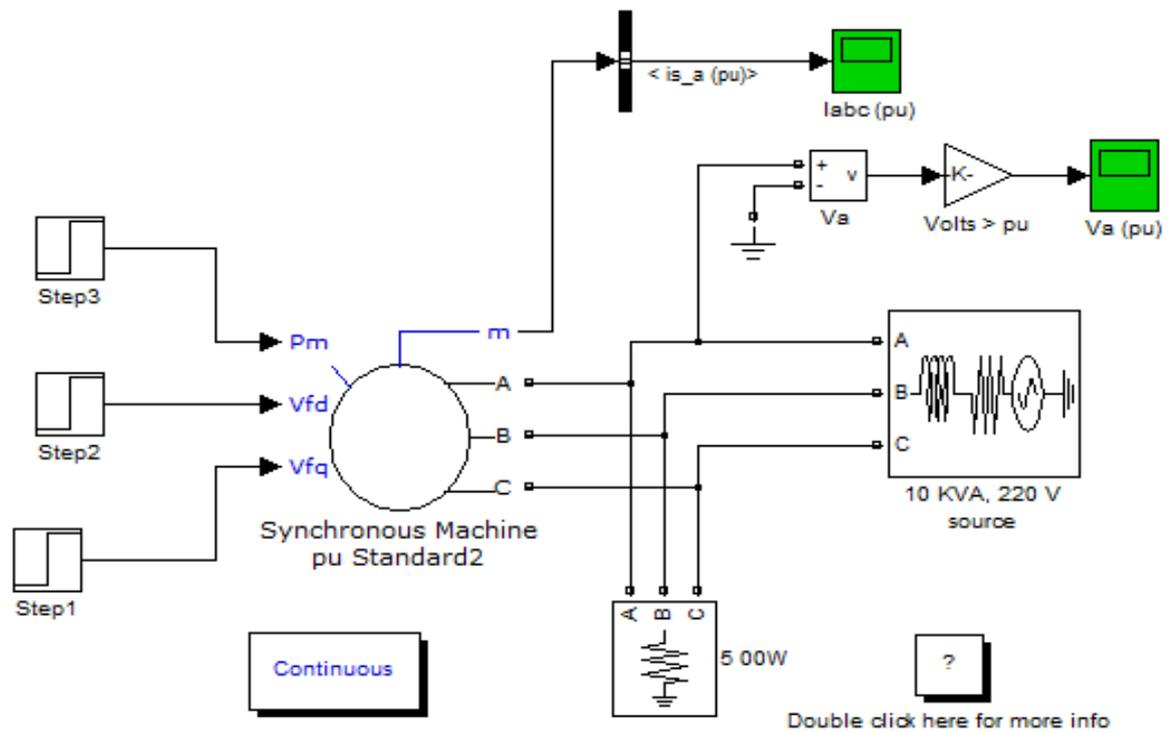
(9) дифференциал тенгламалар тизимининг охириги 4-ташқил этувчиси синхрон генератор роторининг механик ҳаракат тенгламаси бўлиб, унинг Matlab Simulink нимтизими яратилди (6-расм.).



6-расм. ИЎБҚСГ роторининг механик ҳаракат модели нимтизими

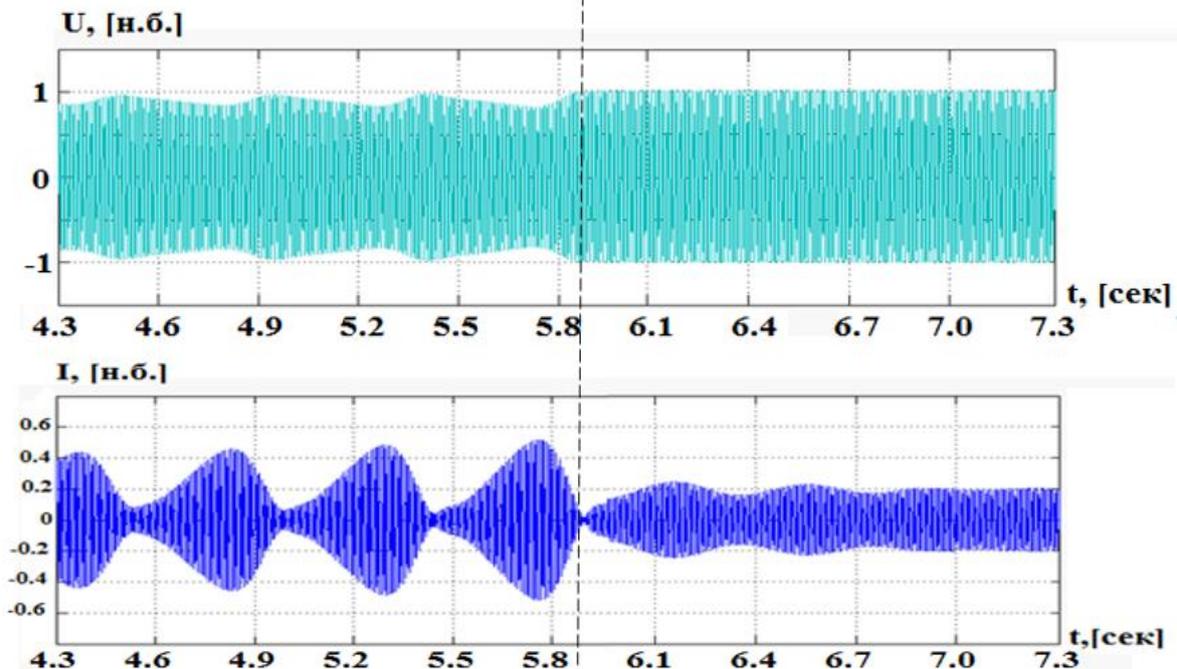
Юқоридаги нимтизимларни ўзаро бирлаштириб, ИЎБҚСГнинг Matlab Simulink имитацион модели яратилди (7-расм.).

Ушбу Matlab Simulink моделдан фойдаланиб унга ИЎБҚСГнинг параметрларини киритиб, ўз-ўзидан чайқалишнинг электромеханик ўткинчи жараёнини моделлаштириб тегишли натижалар олинди (8-расм.).



7-расм. Қуввати 2,2 кВт бўлган ИЎБҚСГнинг Matlab Simulink модели

8-расмдаги осциллограммаларга кўра, шуни хулоса қилиш мумкин, ИЎБҚСГнинг кўзғатиш тоқларини тўғри ростлаш асосида унинг демпферлаш моментини ошириб, ўткинчи жараёнлар вақтини 40% га камайтириш орқали генераторни тезда синхронизимга киритиш имконияти яратилган.



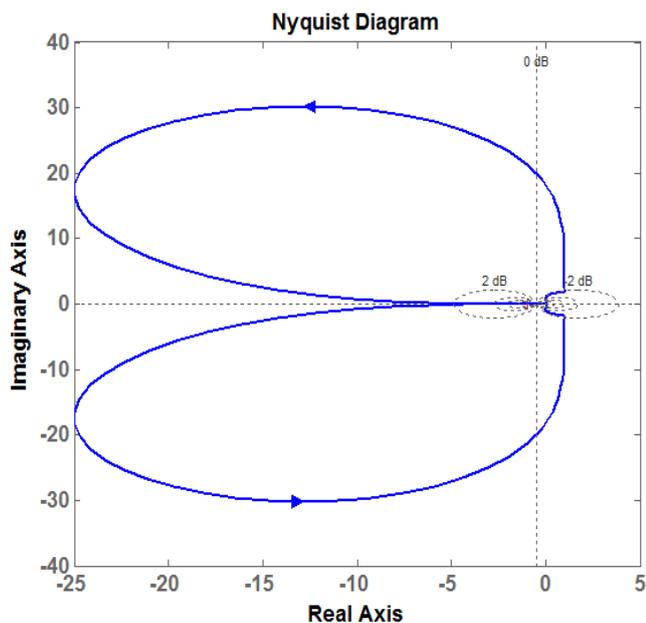
ИЎБҚСГнинг d-q ўқлари бўйича кўзғатиши ростланмаган ҳолда

ИЎБҚСГнинг d-q ўқлари бўйича кўзғатиши ростланган ҳолда

8-расм. Matlab Simulink модели ёрдамида олинган ИЎБҚСГ роторининг ўз-ўзидан чайқалишидаги статор кучланиши ва тоқи осциллограммалари

Синхрон генератор ўз-ўзидан чайқалиш пайтида роторининг айланиш тезлиги бир магнит майдон тезлигидан олдинга ўтиб, бир орқада қолиб $0,5 \div 2,5$ Гц тебраниш билан айланади. Бунда ротор тезлиги магнит майдони тезлигидан бир оз кўпайса, асинхрон генератор режимига, камайганда эса, асинхрон мотор режимига ўтади. Юқоридаги 9-расмда келтирилган схема ёрдамида кўзғатиш чулғамидаги токни тўғри ростлаш орқали ўз-ўзидан чайқалишни тезда сўндириш имконияти мавжуд. Бунда ИЎБҚСГнинг демпферлошчи моментини ошириш, ўз-ўзидан чайқалиш пайтида ротор тезлиги статор магнит майдони тезлигидан ошган ҳолда асинхрон генератор режимига бир вақтнинг ўзида d ўқидаги кўзғатиш чулғами токни камайтириш ва q ўқидаги кўзғатиш чулғами токни ошириш орқали аксинча эса, асинхрон мотор режимига d ўқидаги кўзғатиш чулғами токни ошириш ва q ўқидаги кўзғатиш чулғами токни камайтириш орқали амалга оширилади.

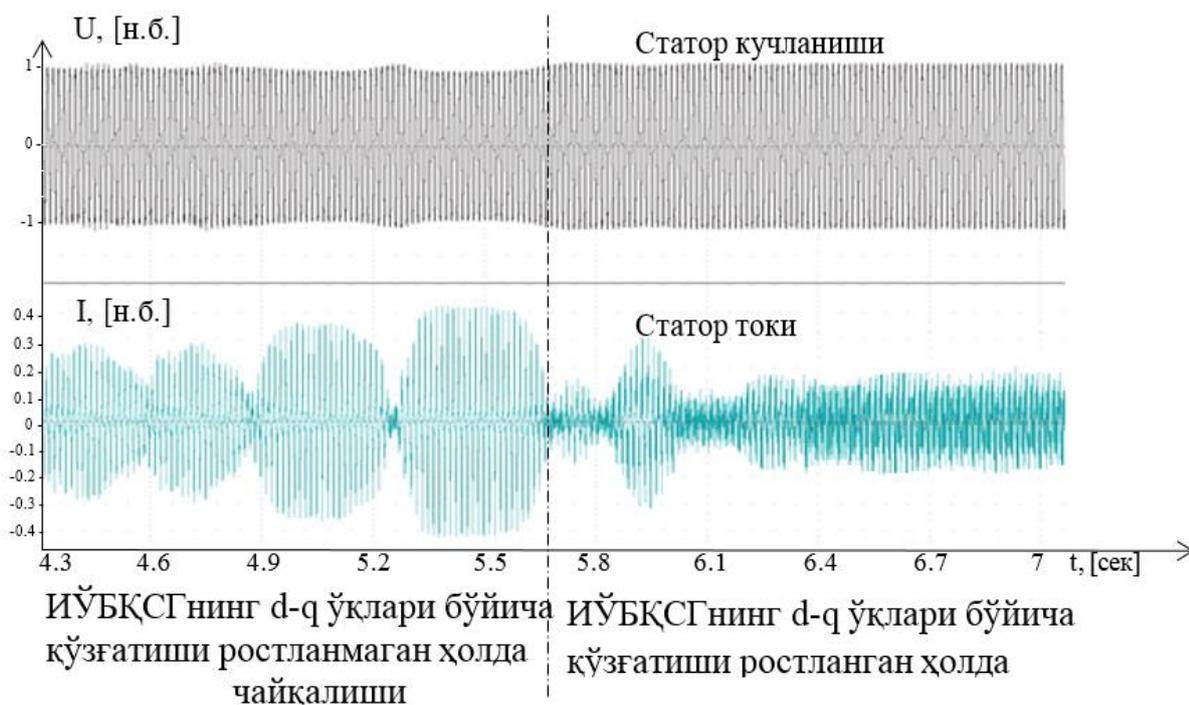
10-расмда ИЎБҚСГ кўзғатиш тизими электр схемасининг тескари боғланишга эга бўлган эквивалент узатиш схемаси асосида аниқланган $W_{\Sigma}(p)$ узатиш функциясининг Matlab дастурида ҳисобланган частотавий годографи келтирилган.



10-расм. $W_{\Sigma}(p)$ -узатиш функциясининг частотавий годографи

Диссертациянинг “Икки ўқ бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторда ўтказилган тажрибалар” деб номланган тўртинчи бобида ИЎБҚСГнинг статор кичик юклардаги ўз-ўзидан чайқалиш жараёнларига ҳамда кўзғатишсиз асинхрон иш режимлари тажрибаларига бағишланган.

Қуйидаги 11-расмда ўз-ўзидан чайқалиб турган ИЎБҚСГнинг кўндаланг кўзғатиш чулғамидаги токни ошириш тажрибаси орқали ўз-ўзидан чайқалиш жараёнини самарали тўлиқ сўндириш ақс этирилган статор кучланиши ва токи осциллограммалари келтирилган.



11-расм. ИЎБҚСГнинг кичик юкларда ўз-ўзидан чайқалишини кўндаланг қўзғатиш чулғами токини ростлаш ёрдамида сўндириш

ИЎБҚСГларда кичик юкларда тадқиқот объекти ва матлаб иммитацион моделида олинган 11-расмдаги ва 8-расмдаги тадқиқот натижалари осциллограммаларини солиштириш қуйидаги натижаларни берган (1-жадвал).

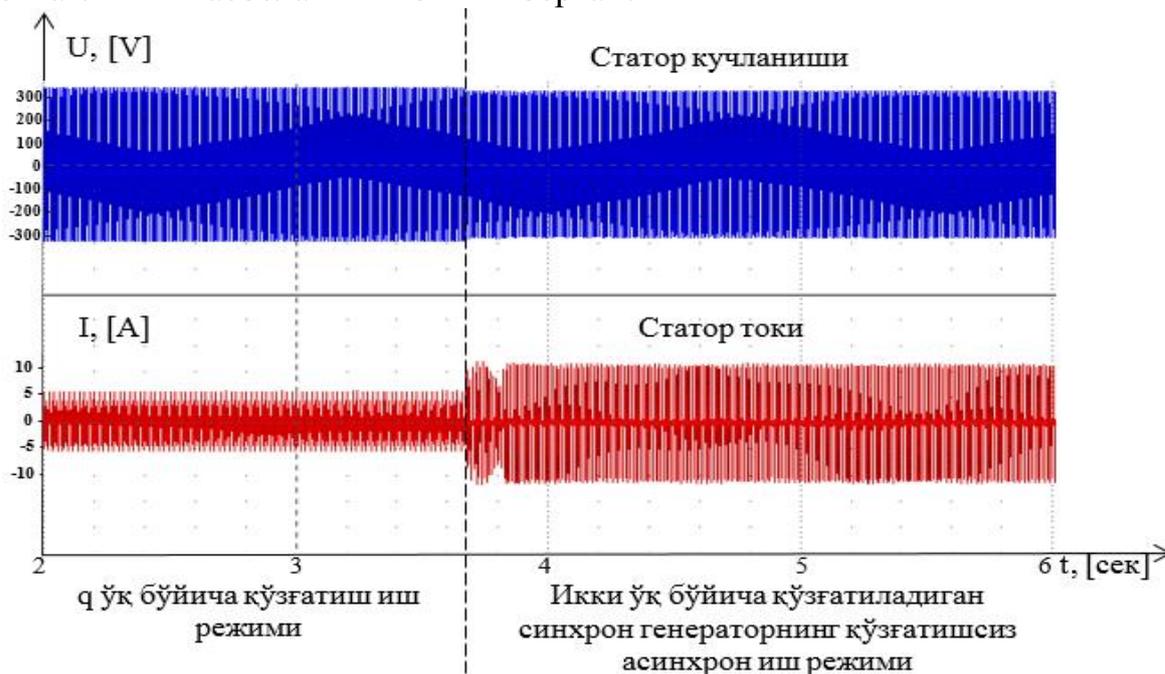
1-жадвал

Кичик юкларда ўз-ўзидан чайқалишдаги қўзғатиш токи ростланмаган ва ростланган ҳолат учун статор тоқларини таққослаш

Тажриба тури	Статор чулғами фаза токи				Матлаб модели ва тадқиқот объектида олинган натижаларнинг фарқи
	Берилган		Тоқнинг амплитуда қиймати		
	А	н.б.	А	н.б.	
Тадқиқот объектида (қўзғатиш ростланмаган) статор тоқининг амплитуда қиймати	7,0	1,0	3,15	0,45	5,4 %
Matlab Simulink моделида (қўзғатиш ростланмаган) статор тоқининг амплитуда қиймати	7,0	1,0	3,33	0,47	
Тадқиқот объектида (қўзғатиш ростланган) статор тоқининг амплитуда қиймати	7,0	1,0	1,33	0,19	5 %
Matlab Simulink моделида (қўзғатиш ростланган) статор тоқининг амплитуда қиймати	7,0	1,0	1,4	0,2	

Юқорида 1-жадвалдаги таққослаш натижаларига кўра: ИЎБҚСГнинг қўзғатиши ростланмаган ҳамда ростланган ҳолда статор тоқининг амплитуда

қийматининг экспериментал ҳамда имитацион моделларида олинган қийматлари таққосланганда ўртача 5 % фарқланиб, имитацион моделнинг адекватлигини асослаш имконини берган.



12-расм. ИЎБҚСГнинг қўзғатишсиз асинхрон иш режимида ўтгандаги кучланиш ва ток осциллограммалари

12-расмдаги осциллограммаларга кўра, ИЎБҚСГнинг статор токи ва кучланиши, қўзғатишсиз асинхрон иш режимида тебранишлар кузатилмайди. Сабаби ушбу генераторнинг ротори магнит ва электр симметрик бўлганлигидан биркутблилик эффекти вужудга келмайди. Бунинг оқибатида ушбу генератор асинхрон иш режимида параметрлари тебранмасдан узоқ муддат ишлай олади. Бунда статор токининг ортиши, ушбу генератор тармоқдан реактив энергия олганлиги туфайли, статор токининг реактив ташкил этувчисининг ортиши билан изоҳланади.

ХУЛОСА

“Икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнида ишлаш қобилиятини ошириш” мавзусидаги фалсафа доктори (PhD) диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилади:

1. Электр энергетикаси тизимида ишлаётган синхрон генераторларнинг электромеханик ўткинчи иш режимларида ишлай олиш қобилиятини ошириш масалалари тадқиқ этилган. Тадқиқот натижасида тармоқ билан параллел ишлаётган икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг параметрлари ва тармоқ параметрларини ҳисобга олиш имкониятига эга бўлган усулни такомиллаштириш ҳамда электромеханик ўткинчи жараёнининг математик модели ва алгоритмининг яратиш зарурати асосланган.

2. Икки ўқ бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг демпферлаш коэффициентини алмаштириш схемасидаги қўндаланг қўзғатиш чулғами

параметрларини эътиборга олган ҳолда аниқланган. Натижада икки ўқ бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторнинг кўзғатишини тўғри ростлаш орқали демпферлаш коэффицентини 7,8 карра ошириш имконияти яратилган.

3. Икки ўқ бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнларининг имитацион модели яратилган. Натижада кўзғатиш ростланмаган ҳамда ростланган ҳолда статор токининг амплитуда қийматининг экспериментал ҳамда имитацион моделда олинган қийматлари таққосланганда ўртача 5 % фарқланиб, имитацион моделнинг адекватлигини асослаш имконини берган.

4. Иссиқлик электр станциялари технологик жараёни хусусиятидан келиб чиқиб, синхрон генераторнинг электромеханик ўткинчи жараёнларини ҳисоблаш усули ишлаб чиқилган. Натижада ҳисоблаш усулининг “Иссиқлик электр станциялари” АЖ тасарруфидаги “Тошкент ИЭС” да жорий этилиши, синхрон генераторнинг ўз-ўзидан чайқалиш жараёнида авариявий узилишларининг бартараф этилиб генераторни қайта тармоққа улаш учун сарфланадиган 36000 м³ куб табиий газни иқтисод қилиш имконини берган.

5. Икки ўқ бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторнинг демпферлаш моментини кўзғатиш тоқларини бошқариш асосида ростлайдиган реверсив тиристор ўзгарткичли кўзғатиш тизимининг электр схемаси ва уни бошқариш усули ишлаб чиқилган. Натижада ишлаб чиқилган электр схема ва уни бошқариш усули “Иссиқлик электр станциялари” АЖ тасарруфидаги “Тошкент ИЭС” да жорий этилиши синхрон генераторнинг демпферлаш коэффицентини ошириш эвазига электромеханик ўткинчи жараённинг ўтиш вақтини 40% га камайтириш имконинияти яратилган.

6. Тадқиқот натижалари “Тошкент ИЭС” да қабул қилинган бўлиб, илмий-тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий этилиши натижасида синхрон генератор синхронизмга тезда киришиб, электромагнит ва электромеханик ўткинчи жараёнларда барқарор ишлаш қобилиятининг ошиши эвазига кутилаётган иқтисодий самарадорлик 157 590 000 (бир юз эллик етти миллион беш юз тўқсон минг) 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**

БЕКИШЕВ АЛЛАБЕРГЕН ЕРГАШЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЖИВУЧЕСТИ СИНХРОННОГО
ГЕНЕРАТОРА С ДВУХОСНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ
ПРИ САМОРАСКАЧИВАНИИ**

05.05.01 – Энергетические системы и комплексы

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

Ташкент – 2024

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве Высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за B2022.4.PhD/T3317

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) и Информационно-образовательном портале «Ziyo Net» (www.ziyounet.uz).

Научный руководитель:

Пирматов Нурали Бкрдиёрович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Бобожанов Махсут Қаландарович
доктор технических наук, профессор

Бердиев Усан Турдиевич
кандидат технических наук, профессор

Ведущая организация:

Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»

Защита диссертации состоится «30» марта 2024 г. в 11⁰⁰ часов на заседании научного совета DSc.03/10.12.2019. T.03.03 при Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова. Адрес: 100095, г Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32, e-mail: tstu_info@tdtu.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова (регистрационный номер - 347) Адрес: 100095, Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 207-14-70.

Автореферат диссертации разослан «15» марта 2024 года.
(протокол рассылки № «1» от «14» марта 2024 года).



К.Р.Аллаев
член 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 существует большая потребность в развитии электроэнергетики в области повышения живучести энергосистемы для непрерывного снабжения потребителей электроэнергией, в которой особое значение придается разработке методики расчета электромеханических переходных режимов синхронных генераторов с двухосным возбуждением. Сегодня в развитых странах «...проводятся масштабные исследования по управлению переходными процессами путем независимой регулировки токов возбуждения синхронных генераторов с двухосным возбуждением»³. В связи с этим, уделяется внимание повышению статической и динамической устойчивости двухосных синхронных генераторов, а именно повышению надежности и живучести этих устройств.

В мире проводятся научные исследования, направленные на поддержание устойчивости системы путем изучения электромагнитных и электромеханических переходных процессов, происходящих в электроэнергетических системах. При этом, вопросы совершенствования конструкции синхронных генераторов являются приоритетным, которые ориентированы на изучение процессов самораскачивания синхронных генераторов с двумя обмотками возбуждения на роторе. Помимо того, еще одной актуальной задачей, изучаемой в настоящее время, является повышение живучести генераторов электростанций, работающих при электромагнитных и электромеханических переходных процессах, обеспечивающих при этом потребителей непрерывной и качественной электрической энергией.

В Республике также ведутся научные исследования и их последующая реализация, направленные на повышение эффективности выработки электроэнергии без ущерба для работы энергосистем, в которых, прежде всего, исследуются проблемы управления синхронными генераторами в переходных электромеханических процессах в энергетике, результаты данных работ являются стратегически важными для всех отраслей экономики. В новой Стратегии развития Узбекистана на 2022-2026 годы включены 24 цели, в которых определены задачи: «Непрерывное обеспечение экономики электроэнергией и стабильная работа энергосистемы Узбекистана с энергосистемами соседних стран»⁴. При реализации этих задач, в частности, важно проведение научно-исследовательской работы, направленной на решение вопросов повышения живучести синхронных генераторов, используемых в электроэнергетической системе Узбекистана, их работа в электромеханических переходных режимах и обеспечение потребителей бесперебойным электроснабжением, а также повышение

³<https://www.dissercat.com/content/issledovanie-parallelnoi-raboty-sinkhronnykh-i-asinkhronizirovannykh-turbogeneratorov-na-ter>

⁴Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январь, ПФ-60-сон “2022- 2026 йилларга мўлжалланган янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида”ги Фармони

статической и динамической устойчивости двухосных синхронных генераторов за счет правильной регулировки токов в обмотках возбуждения с обеспечением стабильной работы электроэнергетической системы.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению поставленных задач, предусмотренных в Решении Президента Республики Узбекистан от 7 февраля 2019 года № РП-4165 «Об утверждении Концепции развития атомной энергетики в Республике Узбекистан на 2019-2029 годы» и Концепции обеспечения электроэнергией Республики Узбекистан в 2020-2030 годах, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной области, в которых предусмотрена возможность регулирования двухосного синхронного генератора и токов его возбуждения посредством двухосной системы возбуждения.

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

Степень изученности проблемы. Одно из ведущих научных направлений ориентированно на предотвращение аварий, возникающих при развитии переходных электромеханических процессов самораскачивания генераторов на электростанциях, а именно-процессов самораскачивания двухосного синхронного генератора. изучаемых мировыми научными центрами и высшими учебными заведениями: California Institute of Technology (АКШ), Tokyo technology institute (Япония), University of Waterloo (Канада), Polytechnic University of Milan (Италия), School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University (Пекин, Китай), Harbin Electric Machinery Company Limited (Харбин, Китай), Electrical Engineering Department, Visvesvaraya National Institute of Technology (Нагпур, Индия), Electrical Engineering Department, UIET Babasaheb Bhimrao Ambedkar University (Лакноу Индия), ИТМ Единой энергетической системы (НТЦ, Россия), Всероссийским научно-исследовательским институтом электроэнергетики (ВНИИЭ, Россия), Московским энергетическим институтом (МЭИ, Россия) и Ташкентским государственным техническим университетом (ТГТУ, Узбекистан) в которых выполняются научно-исследовательские работы.

В решении научных задач по созданию и управлению синхронной машиной с двумя катушками возбуждения, смещенными друг от друга на полуполюсное деление в роторе, большой вклад внесли следующие известные зарубежные учёные: А.А. Горев и Н.Н. Щедрин, М.М. Ботвинник, Ю.Г. Шакарян, Н.Н. Блоцкий, Д.А. Городский, Соколов Ю.В. Н. Гараев, Э. К. Лоханин, Е. Л. Россовский, И.А. Лабунец, П.В. Сокур, Н.Д. Пинчук, И.А. Кэдди-Оглы, А.Г. Логинов, О.У. Zairuna, О.Р. Malik, Mohamad Abd El-Raheim Badr, Trung-Kien Hoang, Guorui Xu, Zhenzhen Wang, Bingchen Liu, Yang Zhan, Haisen Zhao, Ajaysekhar Agaralaa, Sunil S. Bhata, Ishan Srivastava и другие.

Известные ученые Узбекистана также посвятили свои научные труды решению таких задач, как исследование электромагнитных и электромеханических переходных процессов синхронных машин с двухосным возбуждением. среди них: Х.Ф. Фазылов, К.Р. Аллаев, Т.Ю. Насыров, М.Г. Ахматов, О.Г. Одилов, Н.Б. Пирматов, Я.С. Салимов, Л.В. Ковешникова, М.К. Бобожанов. В результате проведенных научных исследований были достигнуты значительные результаты в решении задач повышения статической и динамической устойчивости двухосных синхронных машин.

Несмотря на значительные успехи, в двухосных синхронных генераторах не изучены остались вопросы явления самораскачивания, определяющие устойчивость электромеханического переходного процесса энергосистемы. В данной диссертационной работе создана физическая и разработана математическая модель для исследования электромеханических переходных процессов самораскачивания двухосных синхронных генераторов, а также детально изучены процессы самораскачивания и предложены соответствующие решения.

Связь темы диссертации с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Данная диссертационная работа выполнена в рамках научного проекта №ИЛ-442105947 «Создание нового автоматического устройства, передающего в местную энергосистему стабильную постоянную электрическую мощность постоянной частоты при изменении параметров ветра и водного потока». (2022-2024 гг.), который реализуется в Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова.

Целью исследования является повышение живучести двухосного синхронного генератора за счет гашения самораскачивания.

Задачи исследования:

анализ существующих методов повышения живучести синхронных генераторов за счет гашения процессов самораскачивания;

определить коэффициент демпфирования двухосного синхронного генератора, усовершенствовать метод расчета электромеханического переходного процесса, разработать математическую модель и алгоритм процесса самораскачивания;

разработать электрическую схему, позволяющую управлять током в обмотках возбуждения для гашения самораскачивания двухосного синхронного генератора;

провести экспериментальную проверку живучести двухосных синхронных генераторов в процессе самораскачивания.

Объектом исследования является двухосный синхронный генератор.

Предметом исследования является процесс самораскачивания синхронных генераторов с двухосным возбуждением.

Методы исследования. В ходе проводимого исследования были использованы теория электромеханических переходных процессов

двухосных синхронных генераторов, математическая аппроксимация, методы Рунге-Кутты решения дифференциальных уравнений 2-3 степени, моделирование процессов самораскачивания в программе MatLab Simulink, методы математической статистики для сравнения и обработки полученных результатов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

определен коэффициент демпфирования с учетом эквивалентных сопротивлений по продольной и поперечной осям, исходя из схемы замещения синхронного генератора с двухосным возбуждением;

усовершенствован метод расчета электромеханических переходных процессов синхронных генераторов с двухосным возбуждением, с учетом уровня возбуждения на основе обеспечения совместимости уравнений генератора с уравнениями сети;

разработаны математическая модель и алгоритм расчета самораскачивания двухосного синхронного генератора на основе уравнений синхронного генератора и сети, с учетом магнитного насыщения и параметров сети;

усовершенствован способ управления демпфирующим моментом на основе регулирования токов возбуждения с учетом скольжения ротора двухосного синхронного генератора для гашения раскачивания ротора.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана математическая модель процессов самораскачивания двухосных синхронных генераторов с учетом параметров сети и магнитного насыщения и алгоритм ее расчета;

достигнуто повышение живучести двухосных синхронных генераторов за счет полной компенсации процессов самораскачивания;

создана физическая модель и модель в Matlab Simulink для исследования процессов самораскачивания двухосных синхронных генераторов.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов исследований основана на данных, полученных с помощью физико-математических уравнений и программных моделей MatLab Simulink процессов самораскачивания двухосных синхронных генераторов и их взаимосвязи, приемки к использованию в производстве и согласовании большого числа теоретических и экспериментальных данных.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследований объясняется определением коэффициента демпфирования двухосных синхронных генераторов, усовершенствованием метода расчета электромеханических переходных процессов и разработкой математической модели процесса самораскачивания.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что в результате внедрения электрической схемы системы возбуждения реверсивного тиристорного преобразователя, обеспечивающей регулируемый демпфирующий момент синхронного генератора,

применяемого на тепловых электростанциях, на основе управления токами возбуждения происходит сокращение времени процесса самораскачивания на 40% и увеличивается возможность входа в синхронизм, что объясняется повышением устойчивой работы синхронного генератора при электромагнитных и электромеханических переходных процессах.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных научных результатов по разработке методов и алгоритмов гашения самораскачивания двухосных синхронных генераторов:

внедрена методика расчета электромеханических переходных процессов синхронного генератора с двухосным возбуждением в «Ташкентской ТЭС», находящейся в структуре АО «Теплоэлектрические станции» (справка АО «Теплоэлектрические станции» № 04-20/1180 от 26 сентября 2023г). В результате получено устранение аварийного отключения синхронного генератора при электромеханических переходных процессах, что позволило сэкономить 36 000 м³ природного газа, израсходованного при его повторном включении в сеть;

внедрены математическая модель и алгоритм расчета самораскачивания синхронного генератора с двухосным возбуждением в «Ташкентской ТЭС», находящейся в структуре АО «Тепловые станции» (справка АО «Тепловые станции» № 04-20/1180 от 26 сентября 2023г). В результате, увеличив коэффициент демпфирования синхронного генератора, можно сократить время перехода электромеханического переходного процесса на 40 %;

внедрен метод управления демпфирующим моментом на основе регулирования токов возбуждения для решения задачи повышения живучести в работе в электромеханических переходных процессах турбогенератора мощностью 165 МВт в электроцехе «Ташкент ТЭС» находящегося в структуре АО «Тепловые электрические станции» (справка АО «Тепловые станции» № 04-20/1180 от 26 сентября 2023г). В результате синхронный генератор быстро входит в синхронизм, а за счет повышения способности устойчиво работать в электромагнитных и электромеханических переходных процессах ожидаемый экономическая эффективность составила 157590000 (сто пятьдесят семь миллионов пятьсот девяносто тысяч) сумов.

Апробация результатов исследований. Результаты исследований были апробированы на 10 научно-практических конференциях и семинарах, в том числе на 8 международных и 2 республиканских конференциях.

Опубликованность результатов исследований. Всего по теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 2 статьи в зарубежных журналах (4 статьи на конференциях, входящих в базу данных Scopus), 8 в республиканских и зарубежных журналах, рекомендованных ВАК статей для публикации основного научного результата докторских диссертаций (PhD), свидетельства на 1 программное обеспечение, 10 статей в сборниках научных-конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 119 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и необходимость научных исследований, цели и задачи, охарактеризованы объект и предмет исследования, показано соответствие развития науки и технологий к приоритетным направлениям, описаны научная новизна и практические результаты проведенных научно-практических исследований, раскрыто научное и практическое значение работы, приведены сведения по внедрению результатов исследований в практику по опубликованным трудам и информация о структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Текущее состояние исследований повышения живучести синхронных машин за счет гашения процессов самораскачивания»** представлен анализ факторов, вызывающих процессы самораскачивания синхронных генераторов, и сведения о существующих методах устранения процессов самораскачивания. Кроме того, коэффициент демпфирования синхронного генератора двухосного возбуждения (СГДВ) определялся исходя из схемы замещения.

Анализ литературы в рамках изучения процессов самораскачивания синхронных генераторов показывает, что процессы самораскачивания СГДВ не изучены. Поскольку в синхронных машинах из-за того, что условие $\gamma^2 \gg \alpha_c^2$ в основном выполняется и параметры синхронных генераторов изменяются по закону колебаний при переходе с одного режима на другой, это позволяет сделать заключение: синхронные машины всегда склонны к колебаниям. Аналитические исследования показывают, что изменение параметров продольной демпферной обмотки или увеличение тока в продольной обмотке возбуждения не может устранить самораскачивание генератора. При работе синхронного генератора на пределе самораскачивания ток, проходящий через обмотку вдоль продольной оси, создает отрицательный демпфирующий момент, а ток, проходящий через поперечную обмотку по перпендикулярной к ней оси, создает положительный демпфирующий момент. Роль поперечной обмотки возбуждения или поперечной демпфирующей обмотки очень важна для устранения самораскачивания синхронного генератора.

Самораскачивание - это электромеханический переходный процесс, который можно проанализировать на основе следующего уравнения:

$$T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} + P_d \frac{d\delta}{dt} = P_T - P_{эм} \quad (1)$$

где $P_d = P_{Гд} + P_{Тд}$ - коэффициент демпфирования, учитывающий влияние демпфирующих цепей синхронного генератора и внешней электрической сети на движение ротора генератора, $P_{Гд}$ - коэффициент демпфирования, учитывающий генератор и его устройство автоматического регулирования возбуждения (АРВ), $P_{Тд} = \frac{dP_T}{d\omega}$ - составляющая коэффициента демпфирования, учитывающая турбину. Составляющая коэффициента демпфирования $P_{Гд}$ с учетом эквивалентных активного и реактивного сопротивлений в

динамической эквивалентной схеме замещения СГДВ выражается следующим образом: $P_{rd} = P_{rd1} + P_{rd2}$

$$\text{где, } P_{rd1} = U^2 \left[\frac{r_{q3}^2}{(x_{q3}^2 \omega_\gamma^2 + r_{q3}^2)^2} \cdot \cos^2 \delta_0 + \frac{r_{d3}^2}{(x_{d3}^2 \omega_\gamma^2 + r_{d3}^2)^2} \sin^2 \delta_0 \right] \quad (2)$$

Составляющую P_{rd2} СГДВ можно выразить следующим образом с учетом уровня возбуждения продольных и поперечных обмоток возбуждения и активного сопротивления обмотки статора:

$$P_{rd2} = P'_{rd2} + P''_{rd2} = - \left[\frac{(I_d - I_q)^2}{2} r_s + \left(\frac{E_d}{x_d} \right)^2 \left(1 - \frac{r_s^2}{x_d^2} \right) r_s - \left(\frac{E_q}{x_q} \right)^2 \left(1 + \frac{r_s^2}{x_q^2} \right) r_s \right] \quad (3)$$

Уравнения (2, 3), приведенные выше, составлены на основе эквивалентной схемы замещения СГДВ, представленной на рис.1.

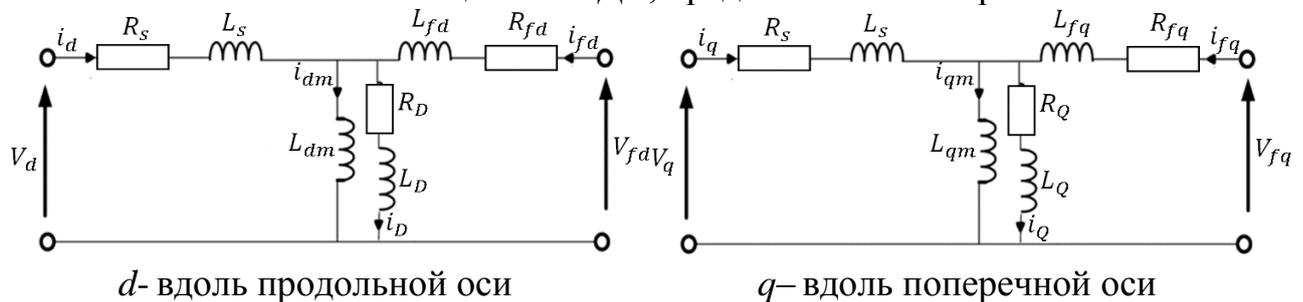


Рис.1. Эквивалентная схема замещения СГДВ

Согласно уравнению (2), когда синхронные генераторы работают с малой нагрузкой или в режиме холостого хода, будет $\cos^2 \delta_0 \rightarrow 1$, $\sin^2 \delta_0 \rightarrow 0$, это значит, что демпфирование в данном случае осуществляется только поперечным контуром, а влияние продольного контура мало или вообще отсутствует. Это значит, что при малых нагрузках параметры поперечной катушки возбуждения оказывают большое влияние на коэффициент демпфирования. Согласно уравнению (3), активное сопротивление статора и увеличение уровня возбуждения по продольной оси d вызывают увеличение отрицательного коэффициента демпфирования, а увеличение уровня возбуждения по поперечной оси q вызывает уменьшение отрицательного демпфирующего момента. Итак, в СГДВ можно увеличить коэффициент демпфирования, правильно отрегулировав возбуждение по осям d и q .

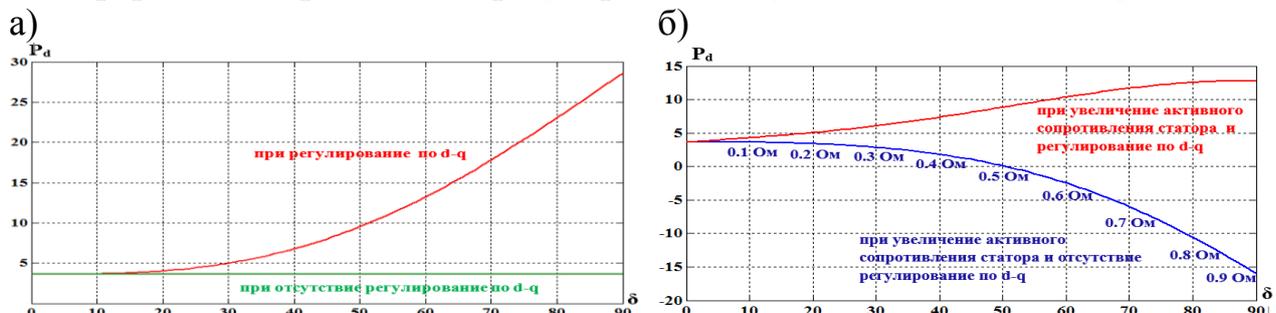


Рис.2. Изменение коэффициента демпфирования при регулировке и отсутствии регулировки токов возбуждения и пренебрежения активного сопротивления в цепи статора СГДВ (а) и с учётом (б)

На основе уравнений (2) и (3) и эквивалентной схемы замещения на рис.1. с учетом активного и реактивного эквивалентных сопротивлений по продольной и поперечной осям можно путем за правильного регулирования токов возбуждения увеличить коэффициент демпфирования в 7,8 раза (рис.2.).

Вторая глава диссертации «**Моделирование процессов самораскачивания синхронных машин**» посвящена усовершенствованию метода расчета электромеханических переходных процессов СГДВ на основе согласования уравнения генератора с уравнениями сети, разработаны математическая модель и алгоритм самораскачивания СГДВ на основе уравнений синхронного генератора и сети с учетом магнитного насыщения и параметров сети, создана имитационная модель Matlab Simulink, отражающая процессы самораскачивания СГДВ.

В этой главе диссертации при записи дифференциальных уравнений СГДВ предполагается, что уравнения генератора соответствуют матричным уравнениям сети. Для этого был рассмотрен метод преобразования дифференциальных уравнений синхронного генератора в форму ЭДС. Прежде всего учитываются три контура, а потокосцепление записывается следующим образом (без индексов q, d):

$$\psi = \frac{U_f \frac{x_a}{r_f} g' + i(x - x_3')}{1 + pT_0'} + \frac{U_f \frac{x_a}{r_f} g'' + i(x_3' - x_3'')}{1 + pT_0''} + \frac{U_f \frac{x_a}{r_f} g''' + i(x_3'' - x_3^{(z)})}{1 + pT_0'''} x^{(z)} \quad (4)$$

ЭДС возбуждение синхронного генератора:

$$E_e = U_f \frac{x_a}{r_f} \quad (5)$$

Переходные и сверхпереходные ЭДС :

$$\left. \begin{aligned} E' &= \frac{E_e g' + i(x - x_3')}{1 + pT_0'} \\ E'' &= \frac{E_e g'' + i(x_3' - x_3'')}{1 + pT_0''} \\ E^{(z)} &= E''' = \psi - x^{(z)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Для согласования уравнений двухосного синхронного генератора с матричными уравнениями сети вводятся ЭДС E_{cd} и E_{cq} следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= E_{cq} + x_d^{(z)} i_d \omega_s - r i_q \\ u_q &= E_{cd} + x_q^{(z)} i_q \omega_s - r i_d \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Найдя ψ из уравнения (6) и подставив его в уравнения Парка-Горева в операторной форме СГДВ и записывается следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -p(E_d^{(z)} + x_q^{(z)} i_q) + \omega_s (1 - s)(E_q^{(z)} + x_d^{(z)} i_d) - r i_q \\ u_q &= p(E_q^{(z)} + x_d^{(z)} i_d) - \omega_s (1 - s)(E_d^{(z)} + x_q^{(z)} i_q) - r i_d \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ЭДС связи E_{cd} и E_{cq} используются для сопоставления уравнений генератора с матричными уравнениями сети и находятся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} E_{cq} &= E_q^{(z)} \omega_s - s \omega_s (E_q^{(z)} + x_d^{(z)} i_d) - p (E_d^{(z)} + x_q^{(z)} i_q) \\ E_{cd} &= -E_d^{(z)} \omega_s + s \omega_s (E_d^{(z)} + x_q^{(z)} i_q) + p (E_q^{(z)} + x_d^{(z)} i_d) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

На основе уравнений (5) и (6) записана следующая система математических уравнений, которую можно использовать для исследования электромеханических переходных процессов СГДВ с учетом магнитного насыщения:

$$\left. \begin{aligned} pE' K_T &= \frac{1}{T_0'} [E_e g' + i(x - x_3') - E'] \\ pE'' K_T &= \frac{1}{T_0''} [E_e g'' + i(x_3' - x_3'') - E''] \\ p(E^{(z)} - E' - E'') K_T &= \frac{1}{T_0'''} [E_e g''' + i(x_3'' - x^{(z)}) - (E^{(z)} - E' - E'')] \\ p\omega_p T_J &= \frac{P_{Гнью} \mu_T P_s}{1+s} - \frac{E_q^{(z)} i_d + E_d^{(z)} i_q + (x_d^{(z)} - x_q^{(z)}) i_d i_q}{1+s_u} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $K_H (K_{Hd}, K_{Hq})$ — коэффициенты нелинейного насыщения, учитывающие основные потоки, которые направлены по двум осям.

Чтобы связать уравнения статорной цепи СГДВ с уравнениями электрической сети, заменим индуктивные сопротивления $x_d^{(z)}$ и $x_q^{(z)}$ на $z_{\mathcal{G}}^{(z)} = r_{\mathcal{G}}^{(z)} + jx_{\mathcal{G}}^{(z)}$ эквивалентным комплексным сопротивлением. В результате выводится следующее уравнение цепи статора генератора, согласованное с цепью сети:

$$u_q + ju_d = E_{cq} + jE_{cd} - (r_{\mathcal{G}}^{(z)} + jx_{\mathcal{G}}^{(z)}) (i_d + ji_q) \quad (11)$$

Подставив значения $E_{cq} - u_q$ и $E_{cd} - u_d$ в уравнение (10), определяются следующие эквивалентные комплексные сопротивления:

$$\left. \begin{aligned} r_{\mathcal{G}}^{(z)} &= \frac{i_d i_q (x_d^{(z)} - x_q^{(z)})}{i_d^2 + i_q^2} \\ x_{\mathcal{G}}^{(z)} &= \frac{(x_d^{(z)} i_d^2 - x_q^{(z)} i_q^2)}{i_d^2 + i_q^2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Приведенные выше модификации показывают, что согласование уравнений статорной цепи двухосного синхронного генератора с уравнениями цепи сети осуществляется посредством связи ЭДС $E_c = E_{cq} + jE_{cd}$. После расчета уравнений синхронных генераторов, ЭДС E_{cd} , E_{cq} переводятся из системы координат (q, jd) в систему координат электрической сети (i, j) следующим образом:

$$E_{\Gamma} = E'_{\Gamma} + jE''_{\Gamma} = (E_{Tq} + jE_{Td})e^{j\delta} \quad (13)$$

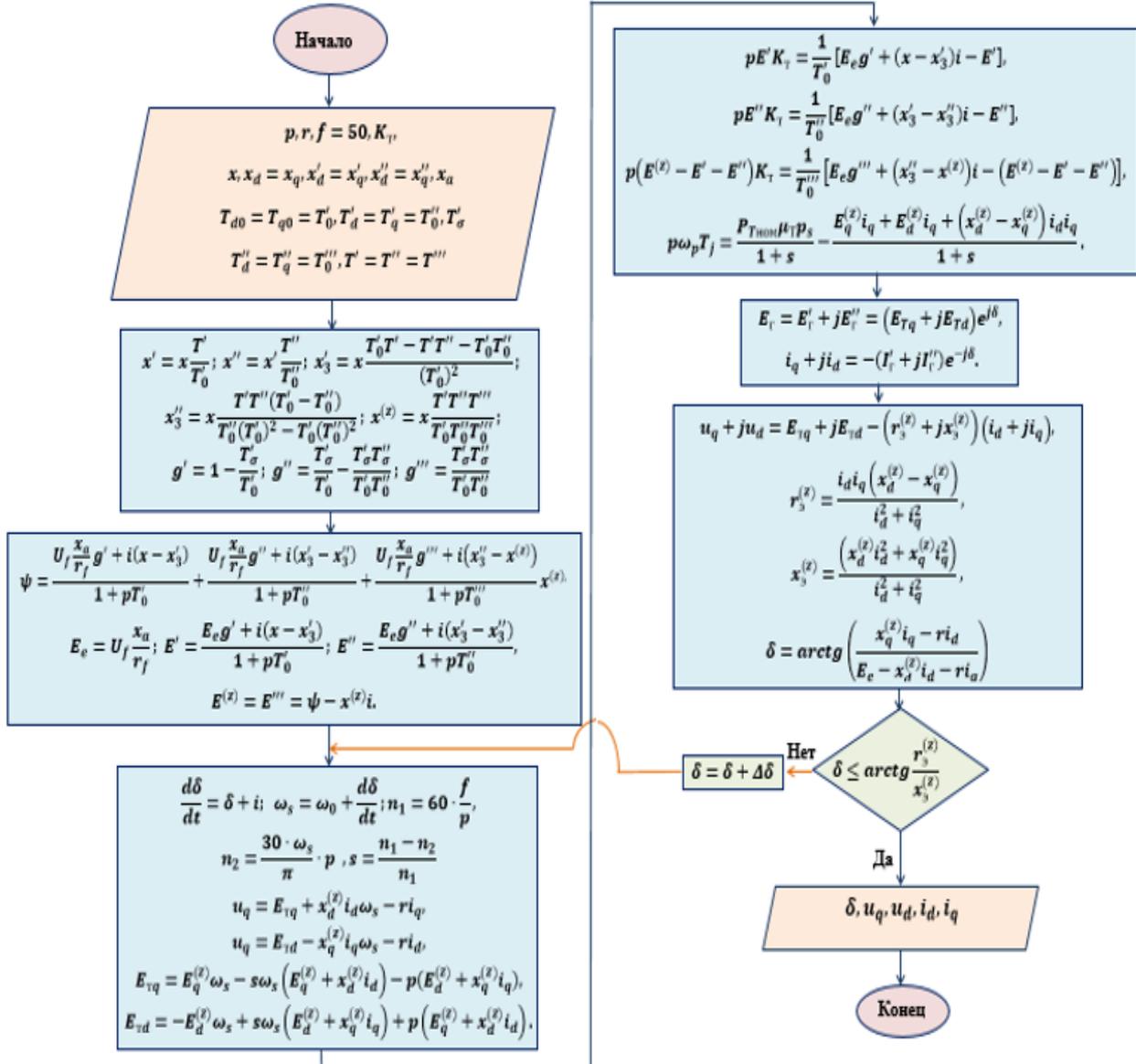


Рис.3. Алгоритм расчета процесса самораскачивания СГДВ с учетом параметров сети и магнитного насыщения

После расчета уравнений электрической сети, токи синхронного генератора I'_{Γ} и I''_{Γ} из системы координат (i, j) электрической сети переводятся в систему координат (q, jd) синхронного генератора следующим образом:

$$i_q + j i_d = -(I'_{\Gamma} + j I''_{\Gamma})e^{-j\delta} \quad (14)$$

Выше разработан алгоритм расчета самораскачивания СГДВ, представленный на рис.3, в основе которого лежат уравнения (4÷14), представляющие собой электромеханический переходный процесс.

Приведенные выше дифференциальные уравнения (10) состоят из двух основных частей: части электрических величин и части механических величин. Первые три члена системы дифференциальных уравнений (10) являются дифференциальными уравнениями, которые представляют

электромагнитные процессы в статорных и роторных контурах, а последний четвертый член системы уравнений является уравнением механического движения ротора синхронного генератора. Поэтому в данной диссертационной работе рассматриваются две основные части создания модели Matlab Simulink. Для этого были созданы подсистемы Matlab Simulink, состоящие из электрической и механической частей (рис. 4.).

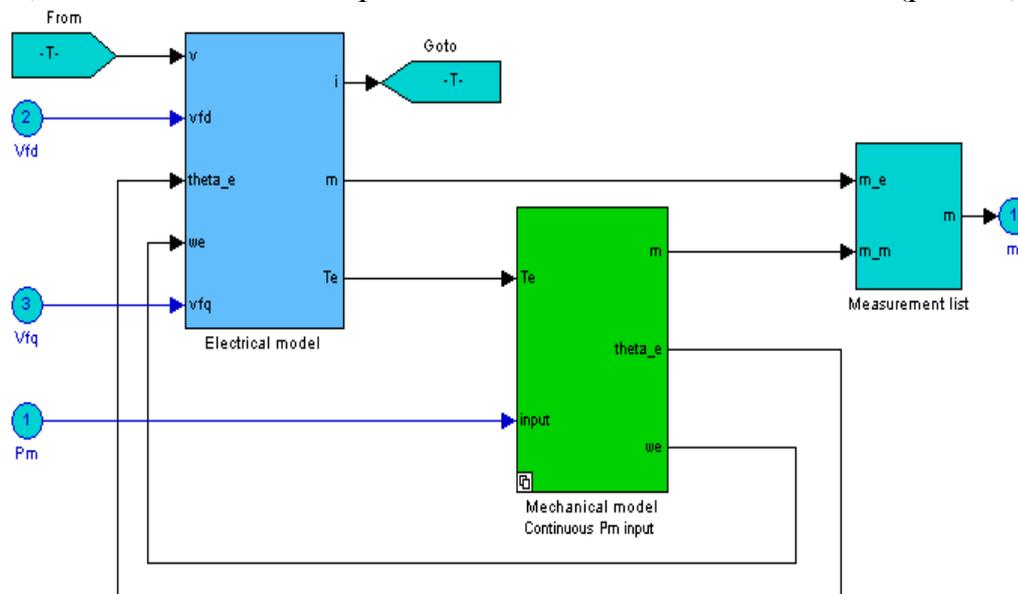


Рис.4. Подсистема Matlab Simulink электрической и механической частей СГДВ

При создании модели Matlab Simulink электрической части синхронного генератора были созданы подсистемы рассчитывающие токов и потокосцепление (рис. 5.).

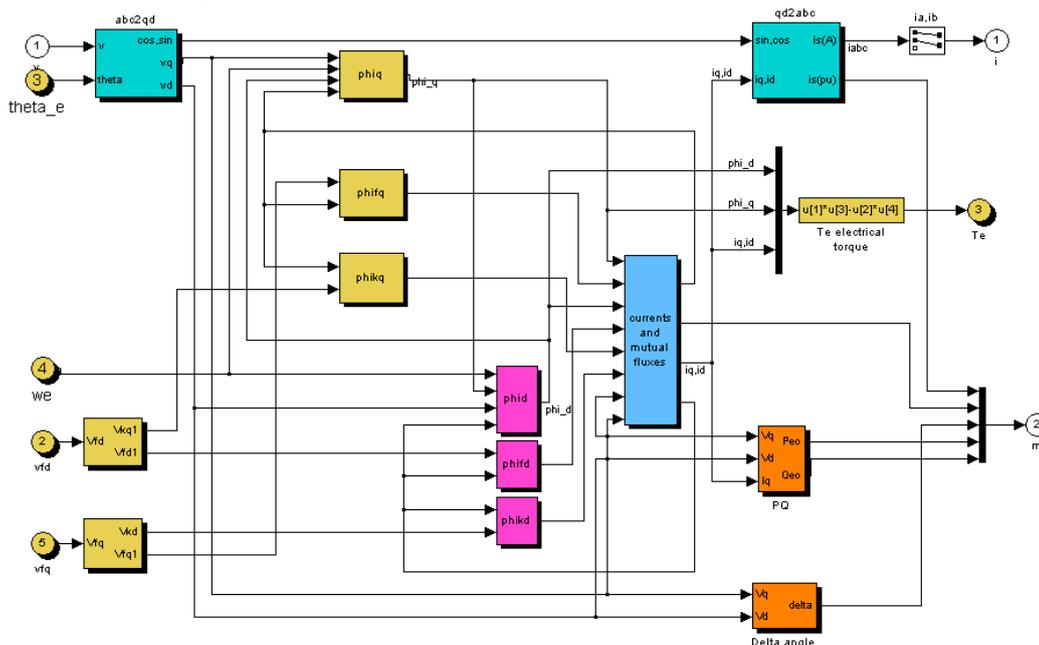


Рис.5. Подсистема Matlab Simulink для электрической части СГДВ

Последним четвертым членом системы дифференциальных уравнений

самораскачивания (рис.8.).

На основании осциллограмм на рис. 8 можно сделать вывод, что на основе правильного регулирования токов возбуждения СГДВ можно быстро привести генератор в синхронизм за счет увеличения его демпфирующего момента и сокращения времени переходного процесса на 40%.

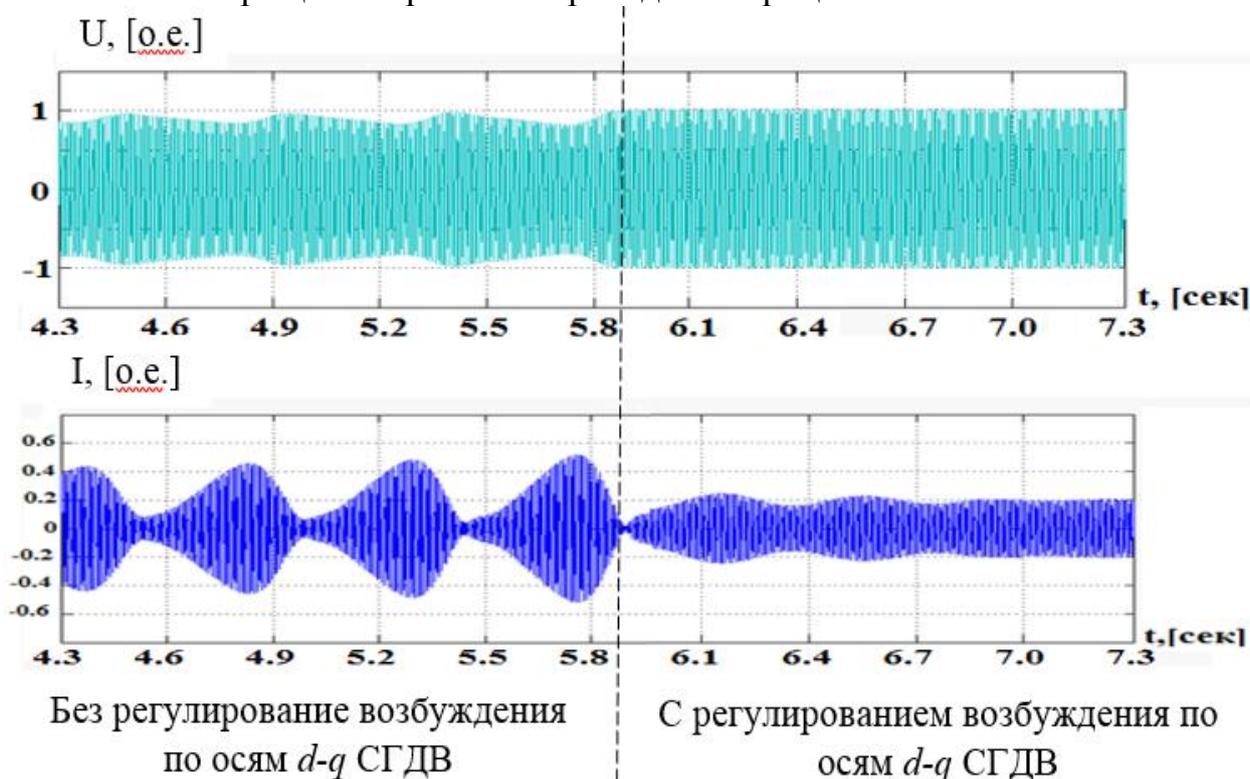


Рис. 8. Осциллограммы напряжения и тока статора самораскачивания ротора СГДВ, полученные с использованием модели Matlab Simulink

Третья глава диссертации «Повышение производительности двухосных синхронных генераторов» посвящена разработке электрической схемы системы возбуждения с реверсивным тиристорным преобразователем на основе управления токами возбуждения СГДВ, регулирующей демпфирующий момент и проанализированы динамические частотные характеристики системы возбуждения.

Учитывая тенденцию к увеличению потоков энергии по существующим линиям электропередачи, решение задач повышения устойчивости электроэнергетических систем в электромагнитных и электромеханических переходных процессах возможно с помощью СГДВ с продольными и поперечными обмотками возбуждения, размещенными на роторе и его системе возбуждения.

На рис. 9, где 1–СГДВ; 2–сеть; 3–блок-трансформатор; 4–трансформатор тока; 5, 6–трансформаторы напряжения; 7–трехобмоточный трансформатор для системы возбуждения; 8, 9–обмотки возбуждения по осям d и q ; 10, 11–автоматы, замыкающие накоротко обмотки возбуждения по осям d и q ; 12, 13–автоматы гашения поля; 14, 15, 16, 17–группа реверсивных тиристоров по осям d и q ; 18–датчик положения ротора; 19, 20–датчики токов обмотки возбуждения по осям d и q ; 21–устройство АРВ с микропроцессорным

управлением реверсивными тиристорами.

При самораскачивании синхронного генератора скорость вращения ротора вращается с колебанием 0,5 - 2,5 Гц, опережая скорость магнитного поля и отставая от него. При этом, если скорость ротора немного превышает скорость магнитного поля, он находится в режиме асинхронного генератора, а при ее уменьшении - переходит в режим асинхронного двигателя. С помощью схемы, показанной на рис. 9, можно быстро погасить самораскачивание, правильно отрегулировав ток в обмотках возбуждения. При этом скорость ротора при самораскачивании превышает скорость магнитного поля статора, в режиме асинхронного генератора за счет одновременного уменьшения тока возбуждения по оси d и увеличения тока возбуждения по оси q , наоборот, в режиме асинхронного двигателя, увеличение тока возбуждения по оси d и уменьшения тока обмотки возбуждения по оси q , осуществляется управление демпфирующим моментом СГДВ.

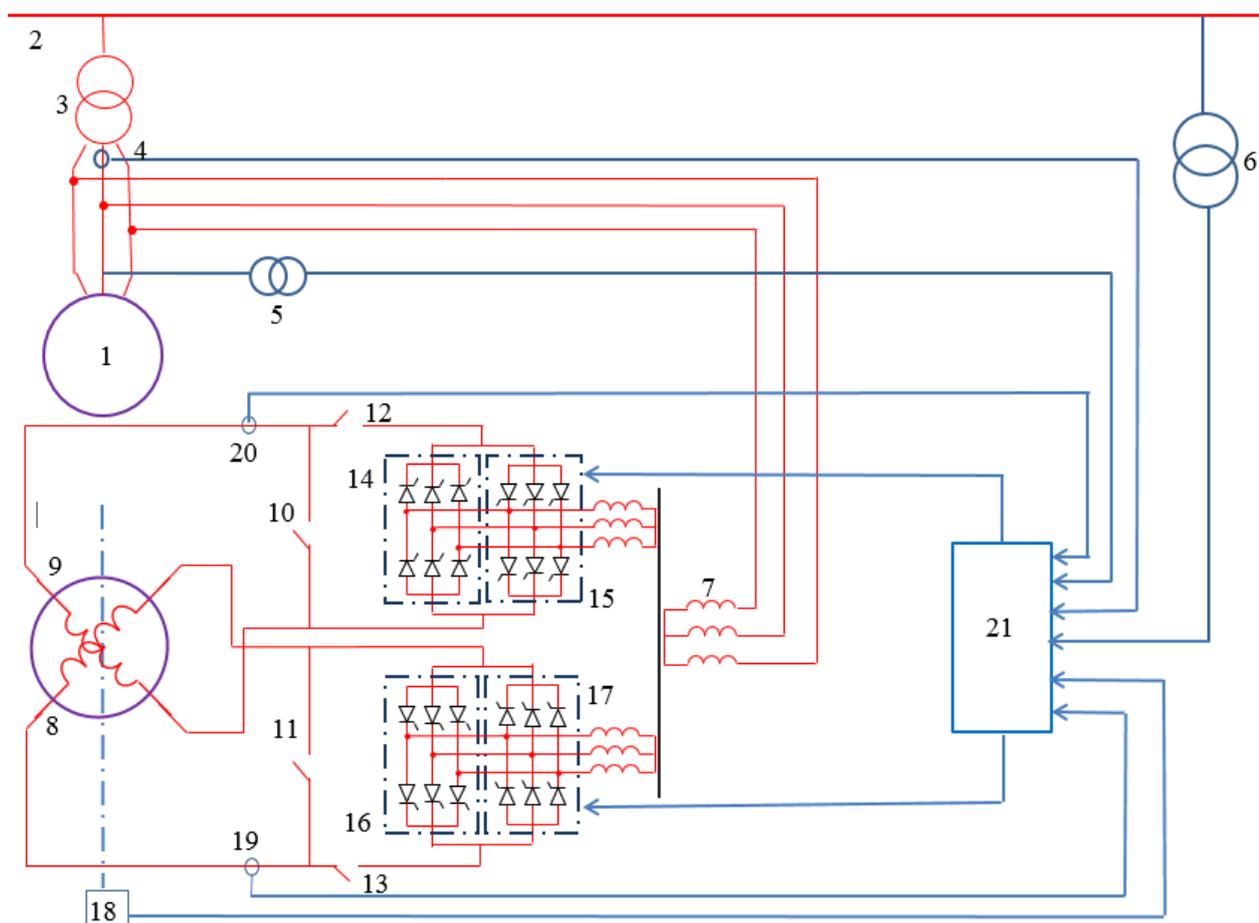


Рис. 9. Электрическая схема системы возбуждения с реверсивным тиристорным преобразователем, регулирующим демпфирующий момент СГДВ на основе управления токами возбуждения

На рис. 10 показан частотный годограф передаточной функции $w_{\Sigma}(p)$, рассчитанный в программе Matlab на основе эквивалентной передаточной схемы электрической цепи системы возбуждения СГДВ с обратной связью.

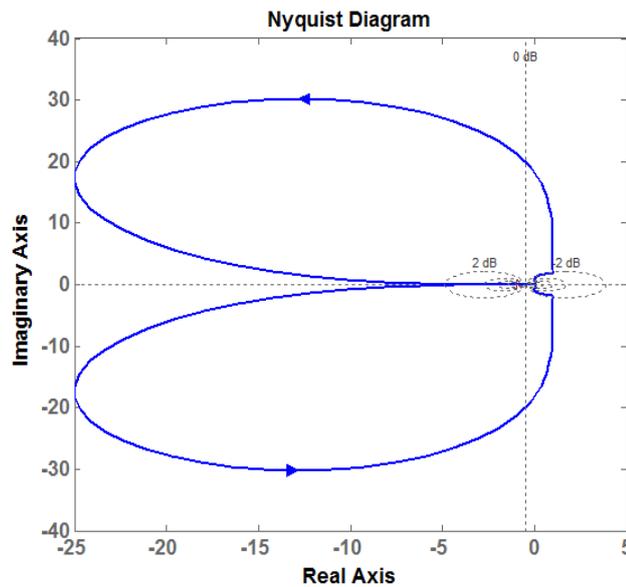


Рис.10. Частотный годограф передаточной функции $W_3(p)$

Четвертая глава диссертации «Проведенные эксперименты в двухосном синхронном генераторе» посвящена экспериментам с СГДВ по процессам самораскачивания с малыми нагрузками, а также проведением экспериментов по асинхронным режимам работы без возбуждения.

На рис. 11 показаны осциллограммы напряжения и тока статора в эксперименте самораскачивание СГДВ, показывающие эффективное полное гашение процесса самораскачивания за счет увеличения тока поперечного обмотке возбуждения.

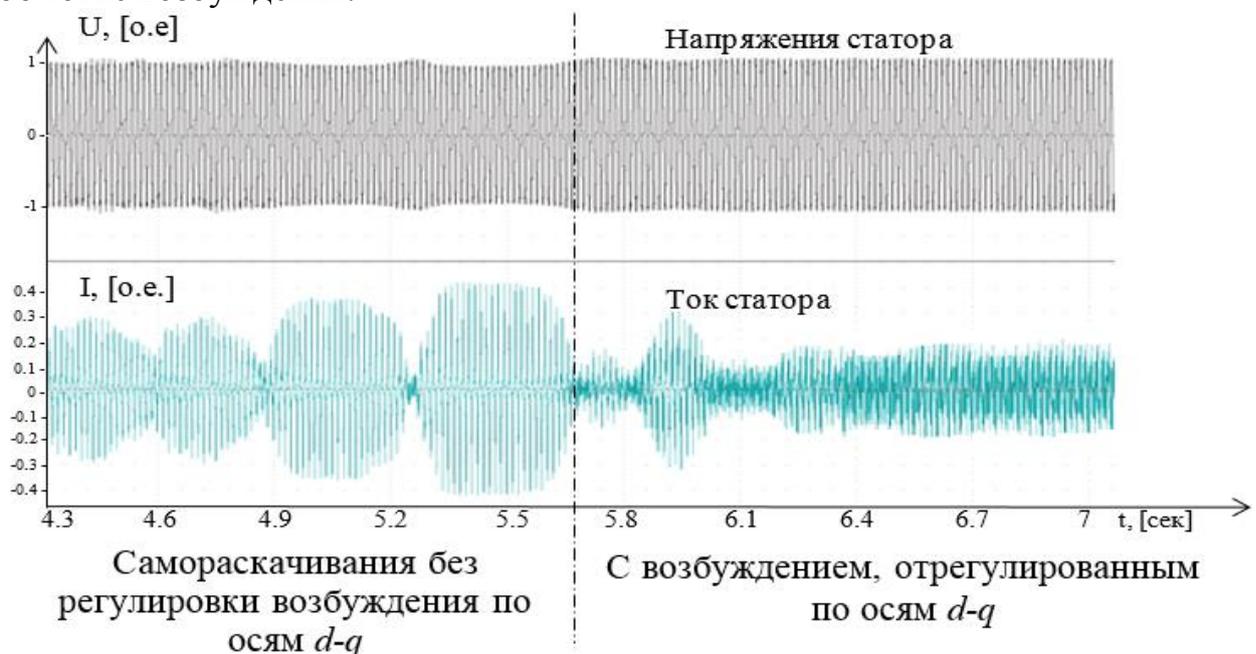


Рис. 11. Демпфирование самораскачивания СГДВ при небольших нагрузках с помощью регулирования тока поперечной обмотки возбуждения

Сравнение осциллограмм результатов исследования на рис. 11 и рис. 8, полученных в объекте исследования и имитационной модели Matlab при малых нагрузках в СГДВ, дало следующие результаты (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение токов статора для нерегулируемого и регулируемого токов возбуждения при малых нагрузках

Тип опыта	Фазный ток обмотки статора				Разница между результатами, полученными в модели Matlab и в объекте исследования
	Дано		Амплитудное значение тока		
	А	о.е.	А	о.е.	
Амплитудное значение тока статора в объекте исследования (возбуждение не регулируется).	7,0	1,0	3,15	0,45	5,4 %
Амплитудное значение тока статора в модели Matlab Simulink (возбуждение не регулируется).	7,0	1,0	3,33	0,47	
Амплитудное значение тока статора в объекте исследования (с регулированием возбуждения).	7,0	1,0	1,33	0,19	5 %
Амплитудное значение тока статора в модели Matlab Simulink (с регулированием возбуждения).	7,0	1,0	1,4	0,2	

По результатам сравнения (таблица – 1), приведенной выше, можно сделать вывод: при сравнении значений амплитудной величины тока статора при возбуждении нерегулируемого и отрегулированного СГДВ полученные значения в экспериментальной и моделируемой модели отличались в среднем на 5 %, что позволило обосновать адекватность разработанной имитационной модели.

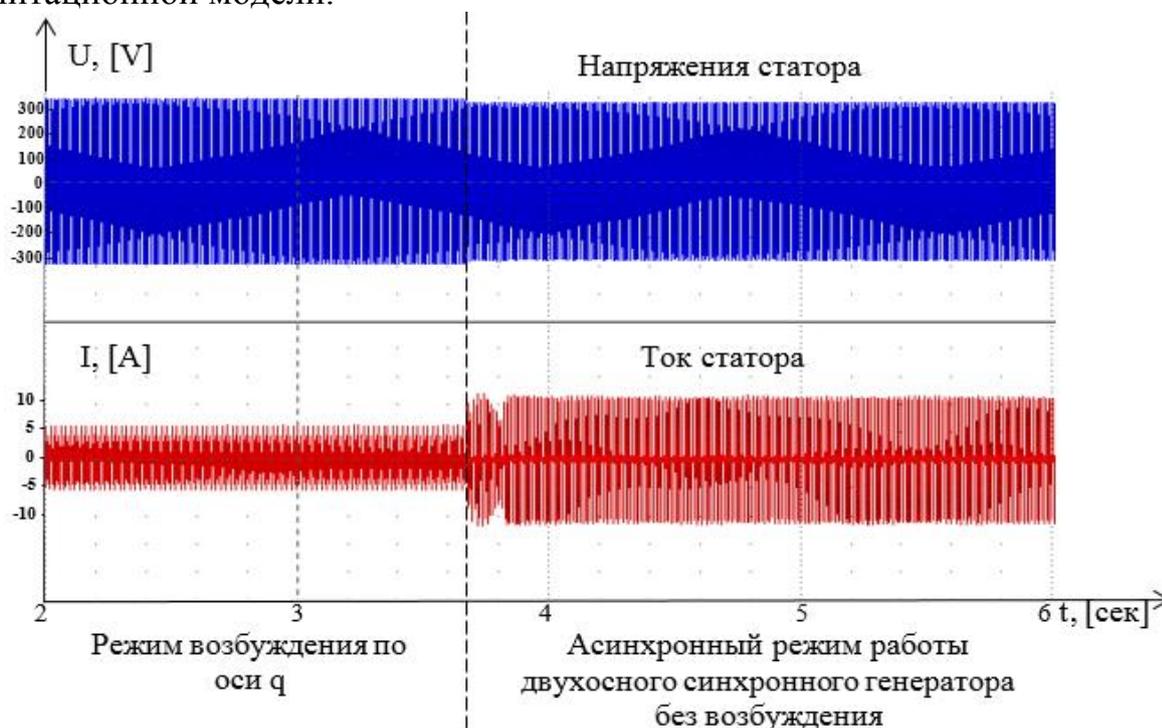


Рис. 12. Оциллограммы напряжения и тока СГДВ при переходе в асинхронный режим работы без возбуждения

Согласно осциллограммам рис. 12, ток и напряжение статора СГДВ в асинхронном режиме работы без возбуждения не колеблются. Причина в том, что ротор этого генератора магнитно и электрически симметричен, поэтому эффект одоосности отсутствует. В результате генератор может длительное время работать в асинхронном режиме без колебаний его параметров. В этом случае увеличение тока статора объясняется увеличением реактивной составляющей тока статора за счет того, что данный генератор получает реактивную энергию из сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований, проведенных в диссертации доктора философии (PhD) на тему «Повышение живучести двухосного синхронного генератора при самораскачивании», представлены следующие выводы:

1. Изучены вопросы повышения живучести синхронных генераторов, работающих в электроэнергетической системе, их работа в переходных электромеханических режимах. В результате исследования обоснована необходимость совершенствования метода, способного учитывать параметры двухосного синхронного генератора, работающего параллельно с сетью и параметры сети, а также необходимость создания математической модели и алгоритма электромеханического переходного процесса.

2. Определен коэффициент демпфирования синхронного генератора с двухосным возбуждением с учетом параметров поперечной обмотки возбуждения в схеме замещения. В результате чего удалось увеличить коэффициент демпфирования в 7,8 раз за счет правильного регулирования возбуждения двухосного синхронного генератора.

3. Создана имитационная модель процессов самораскачивания двухосного синхронного генератора. В результате получено значение амплитудной величины тока статора при нерегулированном возбуждении и при его регулировании. Сравнение значений, полученных в экспериментальной и имитационной моделях, отличались в среднем на 5 %, что позволило обосновать адекватность имитационной модели.

4. Разработана методика расчета переходных электромеханических процессов синхронного генератора на основе особенностей технологического процесса тепловых электростанций. В результате было осуществлено внедрение метода расчета на «Ташкентской ТЭС» находящейся в структуре АО «Теплоэлектрические станции», для устранения аварийных перерывов работы синхронного генератора в процессе самораскачивания, что позволило сэкономить 36000 м³ природного газа, использованного для повторного подключения генератора к сети.

5. Разработаны электрическая схема системы возбуждения реверсивного тиристорного преобразователя и метод его управления, регулирующего демпфирующий момент двухосного синхронного генератора на основе управления токами возбуждения. В результате разработанная электрическая схема и метод ее управления, реализованные на «Ташкентской ТЭС»,

находящейся в структуре АО «Теплоэлектрические станции», позволили сократить время перехода электромеханического переходного процесса на 40% за счет увеличения коэффициента демпфирования синхронного генератора.

6. Приняты результаты исследований в «Ташкентской ТЭС», и в внедрения результатов исследований синхронного генератора в синхронизм, за счет повышения вхождения способности устойчивой работы в электромагнитных и электромеханических переходных процессах ожидаемый экономический эффект составил 157 590 000 (сто пятьдесят семь миллионов пятьсот девяносто тысяч) 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**

BEKISHEV ALLABERGEN ERGASHEVICH

**INCREASING THE SURVIVABILITY OF A SYNCHRONOUS
GENERATOR WITH BIAXIAL EXCITATION DURING
SELF-OSCILLATION**

05.05.01-Energy systems and complexes

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

Tashkent – 2024

The topic of the dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences has been registered with the number B2022.4.PhD/T3317 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.ziyo.net.uz).

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

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

Berdiyev Usan Turdiyevich
Candidate of Technical Sciences, Professor

Leading organization: **"Tashkent institute of irrigation and agricultural mechanization engineers" National research 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 2024, on the "30" day of march at 11 o'clock. (Address: 100095, Tashkent city, Universitet Street, 2. Tel./fax: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: tsu_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 377). Address: 100095, Tashkent city, Universitet street, 2. Telephone: (99871) 207-14-70.

The abstract of the dissertation was distributed on the "15" of march 2024 year.
(The registry statement number dated "14" of march 2024 year).



K.R. Allayev
Chairman of Scientific Council on
awarding Scientific Degrees,
Faculty 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. There is a great need in the world for the development of the electric power industry in the field of increasing the survivability of the power system for the continuous supply of electricity to consumers, in which particular importance is attached to the development of a methodology for calculating electromechanical transient modes of synchronous generators with biaxial excitation. Today, in developed countries, large-scale research is being carried out to control transient processes by independently adjusting the excitation currents of synchronous generators with biaxial excitation. In this regard, attention is paid to increasing the static and dynamic stability of biaxial synchronous generators, namely increasing the reliability and survivability of these devices.

The aim of the research is to increase the survivability of a biaxial synchronous generator by damping self-oscillation..

The tasks of the research are as follows:

analysis of existing methods for increasing the survivability of synchronous generators by damping sifting and self-oscillation;

determine the damping coefficient of a biaxial synchronous generator, improve the method for calculating the electromechanical transient process, develop a mathematical model and algorithm for the self-swinging process;

develop an electrical circuit that allows you to control the current in the excitation windings to dampen the self-oscillation of a biaxial synchronous generator;

conduct an experimental test of the survivability of biaxial synchronous generators operating in the process of self-oscillation.

The object of the research is a biaxial synchronous generator.

The subject of the research is the process of self-oscillation of synchronous generators with biaxial excitation.

The methods of the research include the theory of electromechanical transient processes of biaxial synchronous generators, mathematical approximation, Runge-Kutta methods for solving differential equations of 2-3 degrees, modeling of self-swinging processes in the MatLab Simulink program, methods of mathematical statistics for comparing and processing the results obtained.

The scientific novelties of the research include:

the damping coefficient was determined taking into account equivalent resistances along the longitudinal and transverse axes, based on the equivalent circuit of a synchronous generator with biaxial excitation;

the method for calculating electromechanical transient processes of synchronous generators with biaxial excitation has been improved, taking into account the excitation level based on ensuring the compatibility of the generator equations with the network equations;

a mathematical model and algorithm for calculating the self-oscillation of a biaxial synchronous generator have been developed based on the equations of the

synchronous generator and the network, taking into account magnetic saturation and network parameters;

the method of controlling the damping torque has been improved based on the regulation of excitation currents taking into account the sliding of the rotor of a biaxial synchronous generator to dampen rotor swaying.

Approbation of research results. The research results were tested at 10 scientific and practical conferences and seminars, including 8 international and 2 republican conferences.

Publication of research results. In total, there are 20 scientific papers on the topic of the dissertation, including 2 articles in foreign journals (4 articles at conferences included in the Scopus database), 8 in republican and foreign journals recommended by the Higher Attestation Commission for publication of the main scientific result of doctoral dissertations (PhD) articles, certificates for 1 software, 10 in collections of scientific conferences.

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 119 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Pirmatov N.B., Bekishev A.E., Kurbonov N.A. Increasing the viability of synchronous generators with biaxial excitation in the process of self-rocking // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. India. 2023. - Vol. 10, Issue 3, March 2023. ISSN: 2350-0328. PP. 20473-20478 (05.00.00; №8).

2. Pirmatov N.B., Bekishev A.E. Comparative experimental analysis of the performance and viability of traditional and biaxial excitation synchronous generators in asynchronous mode without excitation // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. India. 2023. - Vol. 10, Issue 4, April 2023. ISSN: 2350-0328. PP. 20598-20601 (05.00.00; №8).

3. Bekishev A.E., Urakov S.E. Static stability in the electric power system // Техника фанлари ва инновация журнали. ISSN: 2181-0400. 2019, №2, С.175-183 (05.00.00; №16).

4. Тоиров О.З., Бекишев А.Е., Таниев М.Х. Исследование колебательной устойчивости синхронного генератора с помощью программы Matlab // Научно-технический журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2019. -№5. С. 71-78 (05.00.00; №5).

5. Пирматов Н.Б., Тоиров О.З., Бекишев А.Е., Ураков С.Е. Анъанавий ва бўйлама-кўндаланг ўқлари бўйича кўзғатиладиган синхрон машиналарнинг ўз-ўзидан тебранишини ҳисоблайдиган дифференциал тенгламаларини ишлаб чиқиш ва уларни Simulink Matlab дастури ёрдамида ечиш // “Информатика ва энергетика муаммолари”. -Тошкент, 2020. -№4. 43-51 б. (05.00.00; №5).

6. Пирматов Н.Б., Бекишев А.Е. Моделирование самораскачивания синхронных генераторов // “Проблемы энерго-и ресурсосбережения”. - Ташкент, 2020. - №3-4. С. 174-179 (05.00.00; №21).

7. Пирматов Н.Б., Бекишев А.Е., Курбонов Н.А. Синхрон машиналарнинг ўз-ўзидан тебранишини ҳисоблайдиган дифференциал тенгламаларни Matlab дастурида ечиш // “Инновацион технологиялар”. - Қарши, 2021. - №4(44). 69-72 б. (05.00.00; №38).

8. Пирматов Н.Б., Зайниева О.А., Бекишев А.Е., Курбонов Н.А., Тошев Т.Ю., Турдибоев А.А. Математическое моделирование синхронных генераторов с двухосным возбуждением // “Ирригация ва мелиорация”. Махсус сон. – Тошкент, 2022. С.254-257 (05.00.00; №22).

II бўлим (Часть II; PartII)

9. Пирматов Н.Б., Бекишев А.Е., Мирхонов У.К. Тўйинишни ҳисобга олган ҳолда синхрон генераторнинг ўз-ўзидан тебраниш ўткинчи жараёнларида генераторнинг электр параметрларини ҳисоблашнинг дастурий

таъминоти ЭҶМ учун дастур // Агентство по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU №14879 07.03.2022.

10. Пирматов Н.Б., Бекишев А.Е., Файзиев М.М., Курбанов Н.А., Имомназаров А.Б. Математическое моделирование процесса самораскачивания синхронных генераторов с двухосным возбуждением в среде matcad // журнал «Наука, техника и образование» //Издательство «Проблемы науки». Москва, 2022. -№ 5 (88). С. 40-47.

11. Toirov O.Z., Bekishev A.E., Mirhonov U.K., Urakov S.E. Development of differential equations and their solution using the Simulink Matlab program, which calculate the self-swinging of synchronous machines with traditional and longitudinaltransverse excitation // E3S Web Conf. Volume 216. Rudenko International Conference on Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems (RSES 2020). doi.org/10.1051/e3sconf/202021601116.

12. Pirmatov N.B., Bekishev A.E., Shernazarov S.E., Kurbanov N.A., Norkulov U.E. Regulation of mains voltage and reactive power with the help of a synchronous compensator by two-axis excitation // E3S Web of Conferences 264, 04028 (2021). International Scientific Conference Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering (CONMECHYDRO 2021). doi.org/10.1051/e3sconf/202126404028.

13. Toirov O.Z., Pirmatov N.B., Zayniyeva O.A., Bekishev A.E., Kurbanov N.A., Norkulov U.E. Calculation of U-shaped characteristics and reactive power of synchronous compensator with longitudinal-transverse excitation // AIP Conference Proceedings 2552, 040020 (2023). Rudenko International Conference “Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems” (RSES 2021). doi.org/10.1063/5.0115727.

14. Pirmatov N.B., Bekishev A.E., Egamov A.M., Shernazarov S.E., Isakov F.S., Zubaydullayev M.B. Mathematical modeling of the self-swinging process of synchronous generators // AIP Conference Proceedings 2612, 050005 (2023). The Third International Scientific Conference Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering (CONMECHYDRO 2021). doi.org/10.1063/5.0135546.

15. Пирматов Н.Б., Салимов Д.С., Бекишев А.Е. Қуввати 60 кВт булган аён кутбли синхрон моторнинг ишга тушириш жараёнини Matlab дастури ёрдамида моделлаш // Сб. трудов международной научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития энергетики». -Ташкент, 2011. - С.110-113.

16. Пирматов Н.Б., Бекишев А.Е., Курбанов Н.А. Моделирование самораскачивания синхронного генератора в среде Simulink Matlab // Сб. трудов международной научно-практической интернет-конференции. «Тенденции и перспективы развития науки и образования в условиях глобализации». -Переяслав-Хмельницкий, 2018. -С.585-588.

17. Пирматов Н.Б., Бекишев А.Е. Simulation of transient processes (self swinging) of synchronous generator in Matlab // “Электр энергиясини ишлаб чиқариш, узатиш ва тақсимлаш ҳамда ундан оқилона фойдаланишнинг долзарб муаммолари” мавзусида Республика миқёсидаги илмий-техникавий

анжуман илмий ишлар тўплами. Тошкент шаҳри 21-22 декабрь 2020 йил. декабр. 235-236 б.

18. Бекишев А.Е., Исаков Ф.С. МТО12-6 типли асинхрон двигател базасида икки ўқ бўйича қўзғатиладиган шамол синхрон генераторнинг моделини ASYS MAXWELL дастури асосида яратиш // “Муқобил ва қайта тикланувчи энергетиканинг ривожлантириш тенденциялари: муаммолар ва ечимлар” мавзусидаги халқаро миқёсидаги илмий-техникавий анжуман илмий ишлар тўплами. Тошкент шаҳри 17-18 май 2021 йил. 517-522 б.

19. Пирматов Н.Б., Бекишев А.Е., Файзиев М.М., Курбанов Н.А., Пардаев Н.Н., Норкулов У.Э. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон машиналарнинг ўз-ўзидан тебранишини ҳисоблайдиган дифференциал тенгламаларини MATLAB дастури ёрдамида ечиш // «Энерго- и ресурсосбережение: новые исследования, технологии и инновационные подходы» мавзусидаги халқаро илмий ва илмий-техник анжумани илмий ишлар тўплами. –Тошкент шаҳри 24-25 сентябр 2021 йил 133-136 б.

20. Пирматов Н.Б., Бекишев А.Е., Файзиев М.М., Зайниева О.А., Курбанов Н.А., Мавлонов Б.Б. Математическое моделирование процесса самораскачивания синхронных генераторов с двухосным возбуждением в среде MATCAD // “Энергия ва ресурс тежамкор инновацион технологияларни ривожлантиришнинг долзарб муаммолари” мавзусида Республика илмий-амалий анжумани илмий ишлар тўплами. Қарши шаҳри 23-24 сентябр 2022 йил. 172-179 б.