

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ**

**DSc 03/10.12.2019.Т.03.03 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**ТОШЕВ ШЕРЗОД ЭРГАШЕВИЧ**

**ИККИ ЎҚИ БЎЙИЧА ҚЎЗГАТИЛАДИГАН СИНХРОН  
ГЕНЕРАТОРЛАРНИНГ НОСИММЕТРИК ҚИСҚА ТУТАШИШ  
РЕЖИМЛАРИНИ ТАҲЛИЛ ҚИЛИШ ВА МОДЕЛЛАШТИРИШ**

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

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

**Ташкент – 2020**

**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**

**Тошев Шерзод Эргашевич**

Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларнинг  
носимметрик қисқа туташиб режимларини таҳлил қилиш ва  
моделлаштириш .....

3

**Тошев Шерзод Эргашевич**

Анализ и моделирование режимов несимметричных коротких замыканий  
синхронных генераторов двухосного возбуждения .....

20

**Toshev Sherzod Ergashevich**

Analysis and modeling of asymmetrical short circuit of synchronous  
generators of biaxial excitation .....

37

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ

List of published works.....

40

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ  
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ**

**DSc 03/10.12.2019.Т.03.03 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**ТОШЕВ ШЕРЗОД ЭРГАШЕВИЧ**

**ИККИ ЎҚИ БЎЙИЧА ҚЎЗГАТИЛАДИГАН СИНХРОН  
ГЕНЕРАТОРЛАРНИНГ НОСИММЕТРИК ҚИСҚА ТУТАШИШ  
РЕЖИМЛАРИНИ ТАҲЛИЛ ҚИЛИШ ВА МОДЕЛЛАШТИРИШ**

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

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

**Ташкент – 2020**

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В 2020.2.PhD/T276 рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертация Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:

Пирматов Нурали Бердиёрович  
техника фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар:

Камолов Тулаган Сирожидинович  
техника фанлари доктори, профессор

Арипов Назиржон Мукарамович  
техника фанлари доктори, профессор

Етакчи ташкилот:

Тошкент ирригация ва кишлок  
хўжалигини механизациялаш  
муҳандислари институти

Диссертация химояси Тошкент давлат техника университети ҳузуридаги DSc.03/10.12.2019.T.03.03 рақамли Илмий кенгашнинг 2020 йил "16" 12 соат 10<sup>00</sup> даги мажлисида бўлиб ўтади. Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўча, 2. Тел./ факс: (99871) 227-10-32, e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz).

Диссертация билан Тошкент давлат техника университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (186 рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100095, Тошкент, Университет кўча, 2. Тел./ факс: (99871) 227-03-41

Диссертация автореферати 2020 йил "04" 12 да тарқатилди.  
(2020 йил "04" 12 даги 14 рақамли реестр баённомаси).



Қ.Р. Аллаев

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

О.Х.Ишназаров

Илмий даражалар берувчи  
илмий кенгаш илмий котиби,  
техника фанлари доктори, катта илмий ходим

И.М.Ибадуллаев

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

## КИРИШ (фалсафа доктори (PhD)диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳонда электр энергетикани ривожлантиришнинг замонавий талаби истеъмолчиларни электр энергия билан таъминлаш ишончилигини ошириш, тизимда электр энергия мувозанатини сақлашга эришиш учун электр энергетика соҳасини ривожлантириш стратегиясида, электр энергия ишлаб чиқарадиган генераторларга алоҳида аҳамият берилмоқда. Ҳозирги кунда ривожланган мамлакатларда «...электр энергия ишлаб чиқарувчи икки ўқи бўйича кўзгатиладиган синхрон генераторлар устида кенг қамровли тадқиқотлар олиб борилмоқда»<sup>1</sup>. Бу борада жумладан, электр энергия ишлаб чиқарувчи икки ўқи бўйича кўзгатиладиган синхрон генераторларнинг носимметрик қисқа туташиб режимларини тадқиқ қилишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда электр энергияни ишлаб чиқариш, узатиш ва тақсимлаш тизимларида юз берадиган ўткинчи жараёнларни ўрганиш, тизим турғунлигини сақлаб қолишга қаратилган тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, жумладан, электр энергия ишлаб чиқарувчи генераторларни такомиллаштириш билан носимметрик иш режимларини таҳлил қилиш бўйича тадқиқотлар устивор ҳисобланади. Шу билан бирга, электр станциялари, электр узатиш тармоқларидаги ўткинчи жараёнлар вақтида шикастланишларсиз, сифатли электр энергия ишлаб чиқариш самарадорлигини ошириш долзарб вазифалардан ҳисобланади.

Республикамизда иқтисодиётнинг муҳим тармоқларидан бири ҳисобланган энергетика соҳасидаги синхрон генераторларни ўткинчи жараёнлар вақтида бошқариш муаммолари, бунда биринчи навбатда генераторларнинг шикастланишларсиз электр энергия ишлаб чиқариш самарадорлигини ошириш бўйича тадқиқотлар ва жорий қилиш чоратадбирлари амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида, жумладан «...иқтисодиётда энергия ва ресурслар сарфини камайтириш, ишлаб чиқаришга энергия тежайдиган технологияларни кенг жорий этиш, қайта тикланадиган энергия манбаларидан фойдаланишни кенгайтириш...»<sup>2</sup> вазифалари белгиланган. Мазкур вазифани амалга оширишда, жумладан, генераторларнинг носимметрик иш режимларида бешикаст ишлашини, электр энергияни истеъмолчиларга етказиб беришнинг узлуксизлигини, электр энергиянинг сифатини, тизимнинг турғунлигини таъминлаш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

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

<sup>1</sup><http://www.energetik.energy-journals.ru/index.php/EN/article/view/367>,

[http://ozlib.com/839900/tehnika/sinhronnye\\_mashiny\\_prodolno\\_poperechnogo\\_vozbuzhdeniya](http://ozlib.com/839900/tehnika/sinhronnye_mashiny_prodolno_poperechnogo_vozbuzhdeniya)

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

Президентининг 2015 йил 5 майдаги ПҚ-2343-сон «2015-2019 йилларда иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳада энергия сарфи ҳажмини қисқартириш, энергияни тежайдиган технологияларни жорий этиш чора-тадбирлари дастури тўғрисида», 2017 йил 26 майдаги ПҚ-3012-сон «2017-2021 йилларда қайта тикланувчи энергетикани янада ривожлантириш, иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳада энергия самарадорлигини ошириш чора-тадбирлари дастури тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация иши қисман хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлик» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Электр энергия ишлаб чиқарувчи станциялардаги турбогенераторларнинг носимметрик иш режимлардаги, ўткинчи жараёнларда юз берадиган авария ҳолатларини бартараф этиш борасида бажарилаётган илмий ишлардан бири, икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик режимларини ўрганишга йўналтирилган илмий-тадқиқотлар дунёнинг етакчи илмий марказларида ва олий таълим муассасаларида, жумладан California Institute of Technology (АҚШ), University of Michigan (АҚШ), University of Waterloo (Канада), Tokyo technology institute (Япония), Polytechnic University of Milan (Италия), Бутун Россия электроэнергетика илмий-тадқиқот институти (ВНИИЭ, Россия), Миллий тадқиқот униерситети (МЭИ, Россия) ва ТошДТУи «Электр машиналари» кафедрасида (Ўзбекистон) кенг қамровли илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон генератор ва асинхронлаштирилган синхрон генератор ривожига ҳамда уларни бошқариш ва амалий фойдаланишнинг замонавий назариясини яратишда проф. М.М.Ботвинник катта ҳисса қўшган, унинг ташаббуси ва раҳбарлиги остида, бу ишлар 1955 йилда бошланган ва унинг издоши проф. Ю.Г.Шакарян бу ишларни давом эттирган. Асинхронлаштирилган генераторларни жорий қилиш бўйича ишларни амалга ошириш 60-йилларда бошланди, бу борада қилинган асосий ишлардан Иова ГЭСсида (Колэнерго) ҳар бири 40 МВт қувватга эга 2 та асинхронлаштирилган гидрогенераторни ишга тушириш бўлди. Ўтказилган тадқиқотлар назарияси ва амалиётига Н.И.Блоцкий, Н.Н.Щедрин, И.А.Радин, А.И.Лабунец, А.П.Лохматов, Л.Г.Мамиконянц, И.М.Постников, В.В.Попов, Н.И.Соколов, И.Д.Урусов, Е.А.Каспаров, М.С. Morsy, Н.Н. Amer, В.В. Hogg, S. Raman, J.C.Clare, A.Kahn, L.M.Ricardo, R.M.Sebastian, шунингдек, мамлакатимиз олимлари М.Г. Ахматов, Қ.Р.Аллаев, Н.Б.Пирматов, О.Г.Одилов, Ж.С. Салимов, Л.В.Ковешникова ва бошқалар томонидан катта ҳисса қўшилган.

Сезиларли муваффақиятларига қарамай, икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташини режимлари етарли даражада ўрганилмаган. Мазкур ишда икки ўқи бўйича

кўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташуш режимларини ўрганиш учун физик, математик ва MatLab дастуридаги моделлари ишлаб чиқилган ҳамда носимметрик қисқа туташув режимлари атрофлича таҳлил қилиниб, ечимлари таклиф этилган.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация иши бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Тошкент давлат техника университетиде амалга оширилган А-3-65 рақамли «Вентилятор типидеги юклама механизмлар юритмасидеги асинхрон моторларни такомиллаштириш ва иш режимларини оптималлаш» (2015-2017йй.) мавзусидеги илмий тадқиқот иши режаси доирасиде бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон генератор носимметрик қисқа туташув (бир фаза, икки фаза, икки фаза нол) режимларидаги токлари, очик фазадаги ўта кучланишларини моделлаштириш ва таҳлил қилишдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташув режимларидаги токлари ва бу вақтда очик фазадаги ўта кучланишларни таҳлил қилиш ва математик моделлаштириш;

икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташув режимларини ҳисоблаш методикаси ва алгоритмини ишлаб чиқиш;

икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташув режимларини имитацион моделлаштириш;

икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташув режимларини тадқиқ қилиш тажриба моделини яратиш ва тадқиқот олиб бориш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида ИЭСдаги турбогенератор ҳамда ГЭСдаги гидрогенератор олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** бўлиб икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташув режимлари ҳисобланади.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Тадқиқот жараёнида икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташув режимлари назарияси, Парк – Горев дифференциал тенгламалари, симметрик ташкил этувчилар усули, носимметрик қисқа туташув режимларини математик ва MatLab дастурида моделлаштириш, олинган маълумотларни таққослаш ва қайта ишлашда математик статистика қўлланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторнинг дифференциал тенгламалари асосиде носимметрик қисқа туташув режимларининг математик модели ишлаб чиқилган;

икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташув токлари ва очик фазадаги ўта кучланишларни ҳисоблаш методикаси ва алгоритми ишлаб чиқилган;

икки ўқи бўйича кўзғатиладиган синхрон генератор носимметрик қисқа

туташув режимларининг имитацион модели ишлаб чиқилиб олинган катталиклар физик, математик модел натижалари билан таққосланиб, тузилган моделларининг бир-бирига мослиги асосланган;

икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташув режимларини тадқиқ қилиш тажриба модели яратилиб ток, кучланиш, ҳаво оралиғидаги магнит индукциялар тажриба асосида таҳлил қилинган.

**Тадқиқотнинг амалий натижаси** қуйидагилардан иборат:

икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторни лойихалашда, оптимал катталикларини аниқлаш учун носимметрик қисқа туташув режимларининг математик модели ишлаб чиқилган;

икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташув режимларини таҳлил қилиш учун ҳисоблаш методикаси ва алгоритми ишлаб чиқилган;

ҳар хил қувватли икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларнинг носимметрик қисқа туташув режимларини тез ва кам маблағ сарфлаб тадқиқ қилиш учун математик, имитацион модели ишлаб чиқилган;

икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташув режимини тадқиқ қилиш тажриба модели яратилди.

**Олинган тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** носимметрик қисқа туташув режимларининг физик, математик ва MatLab дастуридаги моделлари ёрдамида олинган натижалар ҳамда уларнинг ўзаро мувофиқлиги, ишлаб чиқаришда қўллашга қабул қилинганлиги орқали асосланганлиги, кўп сонли назарий ва тажрибавий тасдиқлаш натижаларининг мос келиши билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти, носимметрик қисқа туташув режимларида ананавий синхрон генераторларга нисбатан икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг ишлаш самарадорлигининг ошиши, зарбавий катталикларининг 20-35% кичиклиги, ўткинчи жараёнларнинг тез сўниши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти, тадқиқот натижалари электр станцияларда фойдаланилаётган синхрон генераторларда текширилганлиги туфайли, икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генератор учун ишлаб чиқилган усуллардан ҳар-хил қувватли турбо ва гидрогенераторларнинг носимметрик қисқа туташув режимларини таҳлил қилишда шу билан биргаликда иш жараёнида фойдаланиш мумкинлиги билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларнинг носимметрик қисқа туташув режимларини таҳлил қилиш ва моделлаштириш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генератор “Сирдарё” ИЭСда турбогенератор ва “Ўрта Чирчиқ ГЭСлар каскади” да гидрогенератор тавсия



кўринишида жорий этилган (“Ўзбекэнерго” АЖнинг 2018 йил 15 октябрдаги РМ-01-21/5509-сон ва “Ўзбекгидроэнерго” АЖнинг 2019 йил 26 июндаги 04-05/1539-сон маълумотномалари). Натижада 186 013 100 сўмлик иқтисодий самарадорликни олиш имконини берган;

икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генератор жорий этилганда носимметрик қисқа туташув режимлари туфайли турбо ҳамда гидрогенераторларнинг синхронизмдан чиқиб кетишининг олдини олган. Натижада ананавий синхрон генераторни ўчирилган вақтлардаги йўқотилиши керак бўлган электр энергияни сақлаб қолиш билан техник-иқтисодий самарадорликни ошириш имконини берган;

ИЭС ва ГЭСларда икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генератор жорий этилиши носимметрик қисқа туташув режимларида қисқа туташув катталикларини 20-35% камайтирган. Натижада носимметрик қисқа туташув режимларида генераторларнинг шикастланиш ҳолатларини камайтириш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Тадқиқот натижалари 10 та илмий-амалий анжуманлар ва семинарларда, шу жумладан, 3 та халқаро, 2 та хорижий ва 5 та республика анжуманларида апробациядан ўтди.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мавзуси бўйича жами 19 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 7 та мақолалар, жумладан 5 та республика ва 1 та чет эл илмий журналида, 1 та Scopus рўйхатидаги журналда нашр этилган.

**Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши.** Диссертация иши таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 107 бетни ташкил этади.

## **ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ**

Ишнинг **кириш** қисмида диссертация тадқиқотининг зарурлиги ва долзарблиги асосланган, тадқиқотнинг мақсади, вазифалари ва асосий кўриладиган масала ҳамда Ўзбекистон Республикасида фан ва технологиянинг ривожланиш йўналишларига мослиги, илмий янгилиги ва амалий натижалари, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, илмий ишларнинг чоп этганлиги ҳақида ва диссертациянинг тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **“Синхрон генератор носимметрик қисқа туташуш режимларининг замонавий ҳолати таҳлили”** деб номланган биринчи бобида электр энергия ишлаб чиқарувчи синхрон генераторларнинг носимметрик иш режимлари Ўзбекистон Республикаси ва дунёда қандай шикастланишларга сабабчи бўлаётганлигини, ишлаб чиқарилаётган электр энергия сифати, турғунлигига таъсири ҳамда қайси йўллар билан бартараф қилинаётганлиги таҳлил қилинган.

Синхрон генераторларнинг носимметрик қисқа туташуш режимлар бўйича илмий муаммоларни ҳал қилишда изланишлар олиб борган хорижий ва ўзбек олимларининг илмий-тадқиқот ишлари ўрганилиб, таҳлил қилинган бўлиб, тадқиқот объектининг тўлиқ тавсифи келтирилган.

Олиб борилган адабиётлар таҳлили шуни кўрсатдики, носимметрик қисқа туташуш режимлари бўйича адабиётлар ҳаволаси, носимметрик қисқа туташуш режимларида ток, ўта кучланиш, зарбавий моментлар, уларни ечишда фойдаланилаётган усуллари, синхрон генератор моделлари ва тенгламалари икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генератор (ИЎБҚСГ) учун кўриб чиқилмаган. Носимметрик иш режимлари бўйича илмий изланишлар олиб борган ва бораётган олимларининг илмий-тадқиқот ишлари ўрганилиб, таҳлил қилинганда, икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генератор носимметрик қисқа туташуш режимлари ўрганилмаган.

Икки ўқи (бўйлама ва кўндаланг ўқи) бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларни ўрганиш бўйича асосий муаммоларнинг қисқача таснифи келтирилган, ҳамда ноаён кубли синхрон генераторларнинг носимметрик қисқа туташуш режимлари кўриб чиқилган ва адабиётлар таҳлили асосида кўндаланг чулғамнинг хусусиятларини ўрганишнинг муҳим томонлари кўрсатилган.

Олиб борилган тадқиқотлар шуни кўрсатадики, икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик иш режимларида қисқа туташуш тоқлари ҳамда шикастланмаган фазалардаги ўта кучланишлар ўрганилмаган. Шу билан бирга ИЎБҚСГнинг носимметрик қисқа туташуш режимларда ишлаш самарадорлигини аниқлаш ва бу режимларда зарбавий катталикларнинг илмий асосланган ҳисоблаш усуллари ишлаб чиқилмаган.

Олиб борилган ўрганишлар давомида носимметрик қисқа туташуш режимларини ҳисоблашнинг бир нечта усули таҳлил қилиниб, улардан симметрик ташкил этувчилар усулининг ижобий тарафлари кўрсатилган ва танланган. Симметрик ташкил этувчилар усули бир нечта ўзгарувчилар мавжуд носимметрик қисқа туташуш режимларидаги мураккаб масалани, соддароқ йўл билан аниқроқ ҳисоблаш имконини беради.

**“Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташуш режимларининг математик таҳлили”** деб номланган иккинчи бобида ИЎБҚСГнинг носимметрик қисқа туташуш режимлари магнит юритувчи кучлари эгри чизиқлари ва симметрик ташкил этувчилар усулида таҳлили келтирилган. ИЎБҚСГ носимметрик қисқа туташуш режимлари аналитик ва сонли услублар билан тадқиқоти анализ қилиниб, таққосланган ҳолда баҳо берилган.

Бунинг учун симметрик ташкил этувчилар услуби қўлланилган, бу услуб ёрдамида электр машиналаридаги носимметрик қисқа туташуш режимларни тўлиқ ўрганиб чиқиш мумкин.

Симметрик ташкил этувчилар методини қўллаб барқарорлашган қисқа туташуш тоқларини аниқлаш мумкин:

бир фазали қисқа туташуш режимидаги ток

$$I_{KT1} = 3E_0/(x_d+x_2+x_0) \quad (1)$$

икки фазали қисқа туташуш режимидаги ток

$$I_{KT2} = \sqrt{3} E_0/(x_d+x_2) \quad (2)$$

уч фазали қисқа туташуш режимидаги ток

$$I_{KT3} = I_{KT} = E_0/x_d. \quad (3)$$

Бу тоқлар индуктив характерга эга бўлади.

Носимметрик қисқа туташуш характеристикаларидан ИЎБҚСГнинг  $x_2$  ва  $x_0$  параметрларини аниқлаймиз:

$$x_2 = \sqrt{3} E_0/I_{KT2} - E_0/I_{KT3}; \quad (4)$$

$$x_0 = 3E_0/I_{KT1} - \sqrt{3} E_0/I_{KT2}. \quad (5)$$

Энди симметрик ташкил этувчилар услуги ёрдамида қисқа туташув катталиклар ҳисобини кўриб чиқамиз:

Бунинг учун бизга 1 – жадвалда келтирилган салт ишлаш тавсифи керак бўлади.

**1-жадвал**

### Салт ишлаш катталиклари

Катталик	Ўлчов бирлиги	Қийматлар						
		$E_a$	<b>В</b>	73,7	127	153,7	168,9	177,8
	<b>н.б.</b>	0,58	1,0	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51
$I_{fd} = I_{fq}$	<b>А</b>	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5
	<b>н.б.</b>	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5

Қисқа туташув режимида якорнинг магнитсизлаш хусусияти катта, шунинг учун машинанинг пўлат ўзаги тўйинмайди. Юқорида айтиб ўтилганларга асосланиб  $E_a = f(I_{fd} = I_{fq})$  боғланишни, қисқа туташувдаги якор ЭЮК ни кўзғатиш токига боғлиқлигини қуриш мумкин.

Бир неча математик амалларни бажариб қуйидаги боғланишни келтириб чиқариш мумкин  $E_a = 29,5I_d$ . Олинган боғланиш асосида ҳар бир қисқа туташув ҳоли учун якорда пайдо бўладиган ЭЮКни ҳисоблаб чиқамиз:

Бир фазали қисқа туташув учун:

$$E_{a1} = 29,5 \cdot I_{d1} = 29,5 \cdot 5,8 = 171,1 \text{ В}$$

Икки фазали қисқа туташув учун:

$$E_{a2} = 29,5 \cdot I_{d2} = 29,5 \cdot 3,82 = 112,7 \text{ В}$$

Уч фазали қисқа туташув учун:

$$E_{a3} = 29,5 \cdot I_{d3} = 29,5 \cdot 3,8 = 112,1 \text{ В}$$

Якор чулгамининг тўлиқ қаршилигининг тўғри кетма-кетлигини уч фазали қисқа туташув тажрибасидан ҳисоблаб чиқиш мумкин:

$$Z_1 = E_{a3} / I_{к.т.3} = 112,1 / 2,7 = 41,5 \text{ Ом}$$

Юқорида айтилганидек, икки фазанинг ўзаро қисқа туташувида тескари кетма-кетлик токи, тўғри кетма-кетлик токига тескари қиймат билан олинганига тенг ( $I_2 = -1,95A$ ). Нол кетма-кетлик токи нолга тенг ( $I_0 = 0$ ).

Бир фазали қисқа туташув. Тўғри кетма-кетлик токи:

$$I_1 = \frac{E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2} = \frac{127}{2,44 + 41,5 + 23,6} = 1,88A$$

Бир фазали қисқа туташувда токнинг тўғри, тескари ва нол ( $I_1 = I_2 = I_0 = 1,88A$ ) кетма-кетликлари ўзаро тенг.

Нол симдаги ток учала ташкил этувчининг йиғиндисига тенг:  $I_{к.т.0} = 3 \cdot I_1 = 3 \cdot 1,88 = 5,64 A$ .

Ушбу берилган машинанинг қаршиликлари ташкил этувчиларини аниқлаб, иш пайтида икки фазали нол қисқа туташувда статорда қандай тоқлар бўлишини ҳисоблаб чиқиш мумкин.

Тўғри кетма-кетлик токи:

$$I_1 = \frac{(Z_0 + Z_2) \cdot E_a}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0} = \frac{(2,44 + 23,6) \cdot 127}{979,4 + 101,3 + 57,6} = 2,91A$$

Тескари кетма-кетлик токи:

$$I_2 = \frac{-Z_0 \cdot E_a}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0} = \frac{-2,44 \cdot 127}{979,4 + 101,3 + 57,6} = -0,272A$$

Нол кетма-кетлик токи:

$$I_0 = \frac{-Z_2 \cdot E_a}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0} = \frac{-23,6 \cdot 127}{979,4 + 101,3 + 57,6} = -2,63A$$

Нол симдаги ток:

$$I_{к.т.0} = \frac{-3Z_2 \cdot E_a}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0} = \frac{-3 \cdot 23,6 \cdot 127}{979,4 + 101,3 + 57,6} = -7,9A$$

Қисқа туташув токи:

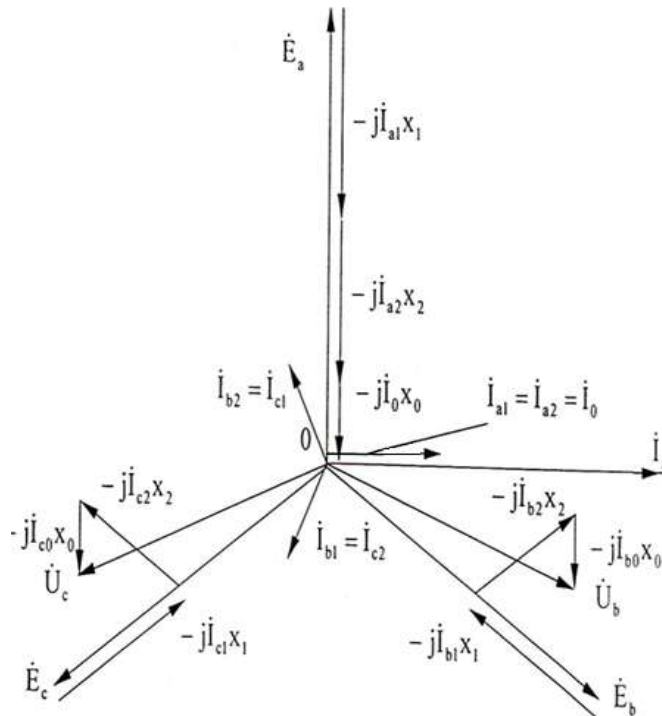
$$I_{к.т.} = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{|Z_2^2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_0^2|} \cdot E_a}{|Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0|} = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{|23,6^2 + 23,6 \cdot 2,44 + 2,44^2|}}{979,4 + 101,3 + 57,6} = 0,427A$$

2 – жадвал

**Симметрик ташкил этувчилар усули ёрдамида ҳисоблаш  
натижалари**

Қисқа туташувнинг турлари			
Уч фазали	Икки фазали	Бир фазали	Икки фазали нол

$I_1$	3,06	1,95	1,88	2,91
$I_2$	0	-1,95	1,88	-0,272
$I_0$	0	0	1,88	-2,63
$I_{к.т.0}$	0	0	5,64	-7,9
$I_{к.т.}$	3,06	3,38	5,64	0,427



**1 – расм. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генератор бир фазали нол қисқа туташувидаги кучланишлар ва токи вектор диаграммаси**

Симметрик ташкил этувчилар усули билан ҳисоблаб топилган 2-жадвал катталиклари асосида, 1-расмда кўрсатилган икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генератор бир фазали нол қисқа туташувидаги кучланишлар ва токи вектор диаграммаси қурилган. Бундан ташқари худди шундай 2-жадвалдаги икки фазали ва икки фазали нол қисқа туташуш режимлари учун ҳам вектор диаграммалари қурилган.

Диссертациянинг учинчи боби “**Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташув режимлари тадқиқоти**” деб номланиб, Парк-Горев тенгламалар системаси асосида ИЎБҚСГнинг носимметрик қисқа туташуш режимлари математик модели ишлаб чиқилди, ва шу тенгламалардан фойдаланиб носимметрик қисқа туташув режимлари тоқлари ва очиқ фазадаги ўта кучланишларини ҳисоблаш алгоритми ишлаб чиқилди. Математик модел асосида Matlab модели ишлаб чиқилиб, ИЎБҚСГларнинг носимметрик қисқа туташув

режимлари токлари ва очик фазадаги ўта кучланишларининг осциллограммалари олинган.

Маълумки, ИЎБҚСГнинг дифференциал тенгламалари нозизиқли ва шу сабабли уларни ечишда маълум қийинчиликлар юзага келади.

Машинанинг бўйлама ва кўндаланг ўқларда бошқа катталикларини ҳам ифодалаш мумкин.  $d$  ва  $q$  ўқларни кўллаб машина барча катталикларини иккита ташкил этувчи орқали ифодалаш орқали тўла алгебро-дифференциал тенгламаларини ифодалаймиз.

Бунда Парк-Горев тенгласидан фойдаланиб қуйидагича ёзамиз:

$$\begin{aligned}
 & \frac{d\psi_d}{dt} + i_d \cdot r_d = 0 \\
 & \frac{d\psi_q}{dt} + i_q \cdot r_q = 0 \\
 u_d = -\frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \frac{d\gamma}{dt} - i_d r & \quad \psi_d = X_d \cdot i_d + X_{ad} \cdot i_{fd} + X_{1d} \cdot i_{1d} \\
 u_q = \psi_d \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\psi_q}{dt} - i_q r & \quad \psi_q = X_q \cdot i_q + X_{aq} \cdot i_{fq} + X_{1q} \cdot i_{1q} \\
 u_{fd} = \frac{d\psi_{fd}}{dt} + i_{fd} \cdot r_{fd} & \quad \psi_{fd} = X_{fd} \cdot i_{fd} + X_{ad} \cdot i_d + X_{1d} \cdot i_{1d} \\
 u_{fq} = \frac{d\psi_{fq}}{dt} + i_{fq} \cdot r_{fq} & \quad \psi_{fq} = X_q \cdot i_{fq} + X_{aq} \cdot i_q + X_{1q} \cdot i_{1q} \\
 u_0 = X_0 \frac{di_0}{dt} + i_0 \cdot r_0 & \quad \psi_{1d} = X_{ad} \cdot i_d + X_{fd} \cdot i_{fd} + X_{1d} \cdot i_{1d} \\
 & \quad \psi_{1q} = X_{aq} \cdot i_q + X_{fq} \cdot i_{fq} + X_{1q} \cdot i_{1q} \\
 & \quad M_\Gamma = \psi_q \cdot i_d - \psi_d \cdot i_q \\
 & \quad \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{1}{T_j} (M_T - M_\Gamma) = \frac{1}{T_j} [M_1 - (\psi_q \cdot i_d - \psi_d \cdot i_q)]
 \end{aligned} \tag{6}$$

(6) тенгламалар системасидан фойдаланиб, ИЎБҚСГнинг носимметрик қисқа тутатиш режимларини тадқиқ қилиш MatLab пакети Simulink дастуридаги модели тузилган.

ИЎБҚСГнинг бир фазали қисқа тутатиш режими учун статор занжири оқим илашимлиги тенгласи қуйидагича:

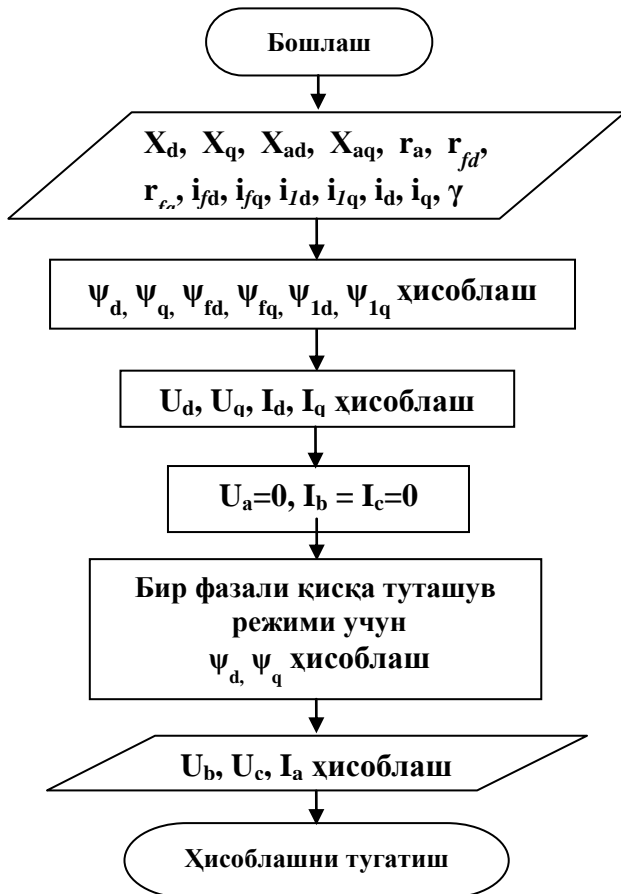
$$\left. \begin{aligned}
 \psi_d &= X_{ad} \cdot (1 + \cos 2\gamma_r) \cdot (i_{fd} + i_{1d}) - X_{ad} \cdot \sin 2\gamma_r (i_{fq} + i_{1q}) - 2(X_d + X_k) \cdot i_d \\
 \psi_q &= -X_{ad} \cdot \sin 2\gamma_r \cdot (i_{fd} + i_{1d}) - X_{aq} \cdot (1 - \cos 2\gamma_r) \cdot (i_{fq} + i_{1q}) - 2(X_d + X_k) \cdot i_q
 \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

ИЎБҚСГнинг икки фазали қисқа тутатиш режими учун статор занжири оқим илашимлиги тенгласи қуйидагича:

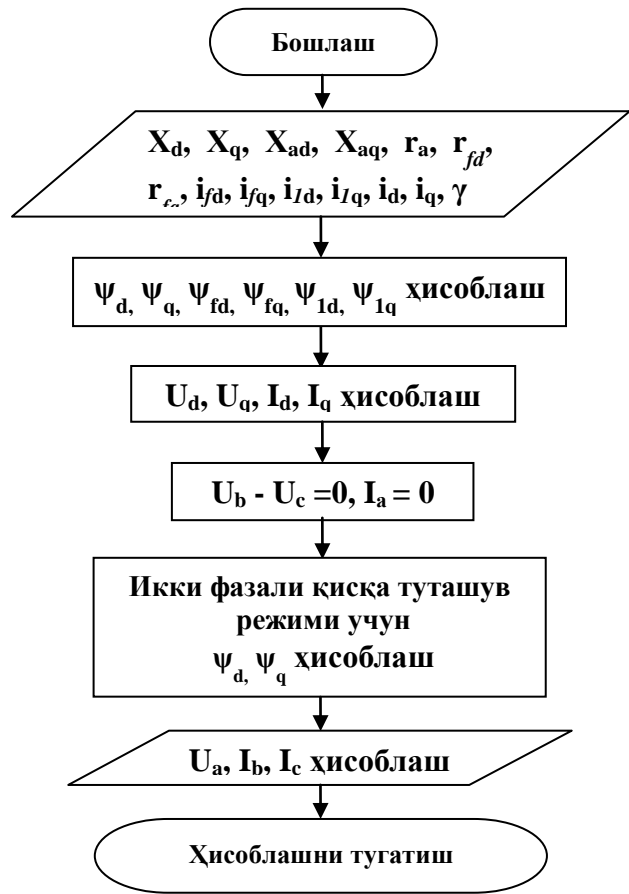
$$\left. \begin{aligned}
 \psi_d &= \frac{X_{ad}}{2} \cdot (1 - \cos 2\gamma_r) \cdot (i_{fd} + i_{1d}) + \frac{X_{ad}}{2} \cdot \sin 2\gamma_r (i_{fq} + i_{1q}) - X_d \cdot i_d \\
 \psi_q &= \frac{X_{ad}}{2} \cdot \sin 2\gamma_r \cdot (i_{fd} + i_{1d}) + \frac{X_{aq}}{2} \cdot (1 + \cos 2\gamma_r) \cdot (i_{fq} + i_{1q}) - X_q \cdot i_q
 \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

ИЎБҚСГнинг икки фазали нол қисқа туташиш режими учун статор занжири оқим илашимлиги тенгламаси қуйидагича:

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= \frac{X_{ad}}{2} \cdot (1 + \cos 2\gamma_r) \cdot (i_{fd} + i_{1d}) + \frac{X_{ad}}{2} \cdot \sin 2\gamma_r \cdot (i_{fq} + i_{1q}) - (X_d + 2X_k) \cdot i_d \\ \psi_q &= \frac{X_{ad}}{2} \cdot \sin 2\gamma_r \cdot (i_{fd} + i_{1d}) + \frac{X_{aq}}{2} \cdot (1 - \cos 2\gamma_r) \cdot (i_{fq} + i_{1q}) - (X_q + 2X_k) \cdot i_q \end{aligned} \right\} \quad (9)$$



**2-расм. ИЎБҚСГ бир фазали қисқа туташиш режими токлари ва ўта кучланишларни ҳисоблаш алгоритми**

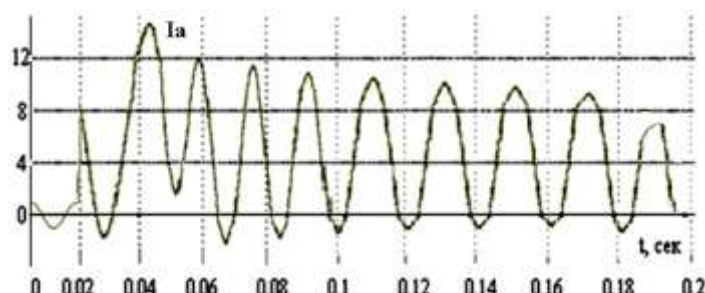


**3-расм. ИЎБҚСГ икки фазали қисқа туташиш режими токлари ва ўта кучланишларни ҳисоблаш алгоритми**

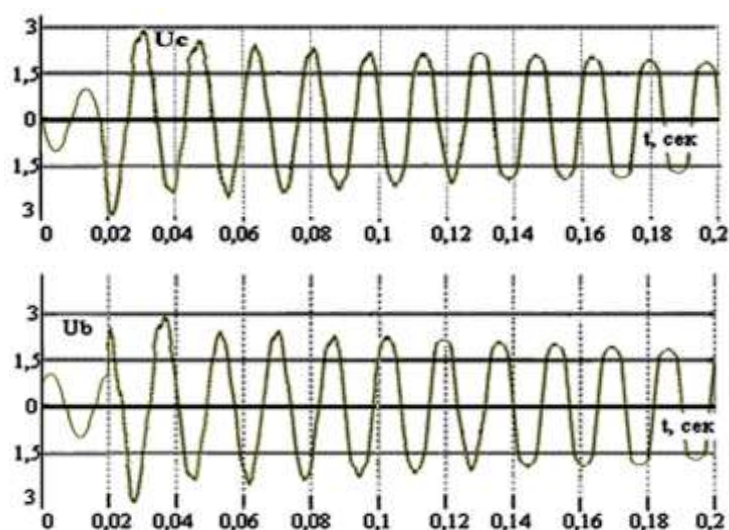
(7-9) – тенгламалар ИЎБҚСГнинг статор занжири оқим илашимликлари мос ҳолда икки фазали ва икки фазали нол қисқа туташиш режимлари учун тузилган.

Юқоридаги тенгламалар асосида, қисқа туташиш токлари ва бу вақтдаги очиқ фазадаги ўта кучланишларни тадқиқ қилиш учун Matlab даги модели ишлаб чиқилган. Ушбу ишлаб чиқилган Matlab даги модел ёрдамида бир фазали, икки фазали, икки фазали нол қисқа туташиш режимларида статор токлари ва бу вақтдаги очиқ фазадаги ўта кучланишлар осциллограммалари олинган. Масалан, Matlabдаги модел ёрдамида, 4-расмда ИЎБҚСГнинг бир фазали қисқа туташиш режимида статор токи осциллограммаси келтирилган

ва 5-расмда бу вақтдаги очик фазадаги ўта кучланишлар осциллограммаси келтирилган.



4 – расм. ИЎБҚСГ бир фазаги қисқа туташувдаги статор токи осциллограммаси



5-расм. ИЎБҚСГ бир фазаги қисқа туташувда статор очик фазаларидаги ўта кучланиш осциллограммалари

Диссертация тадқиқотининг тўртинчи боби “Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташув режимларини тажриба йўли билан текшириш” бўлиб, тадқиқот қилинаётган генераторнинг тузилиши, физик моделнинг яратилиши ва ИЎБҚСГ катталиклари (3-жадвал) тўғрисида маълумот берилган.

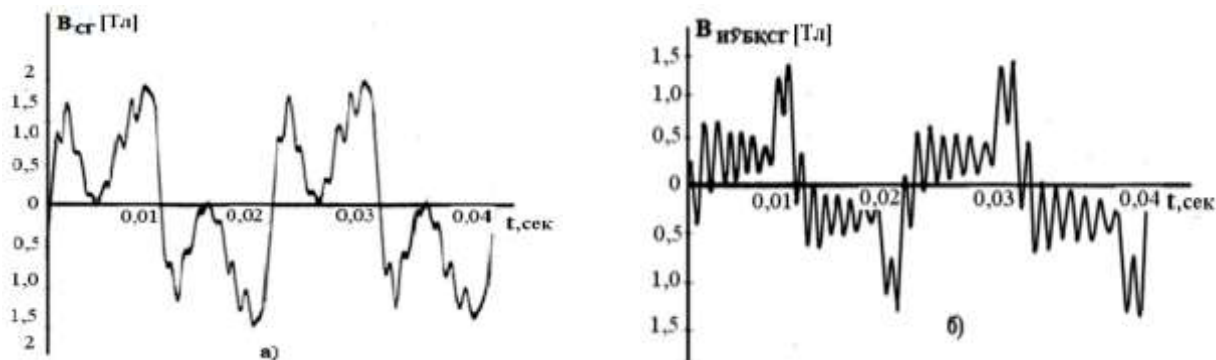
### 3 – жадвал

Носимметрик қисқа туташув режимлари тадқиқ қилинаётган бўйлама ва кўндаланг қўзғатишли генераторнинг техник катталиклари

Катталик	Ўлчов бирлиги	Қиймати
Номинал қувват	кВт	2,2
Айланиш тезлиги	айл/дақ	1500
Статор номинал токи	А	7
Номинал кучланиш	В	380
Қўзғатиш чулгамининг номинал кучланиши	В	220
Ротор номинал токи	А	5
ФИК	%	85
Инерция моменти	Кг*м <sup>2</sup>	0,029
Массаси	кг	18

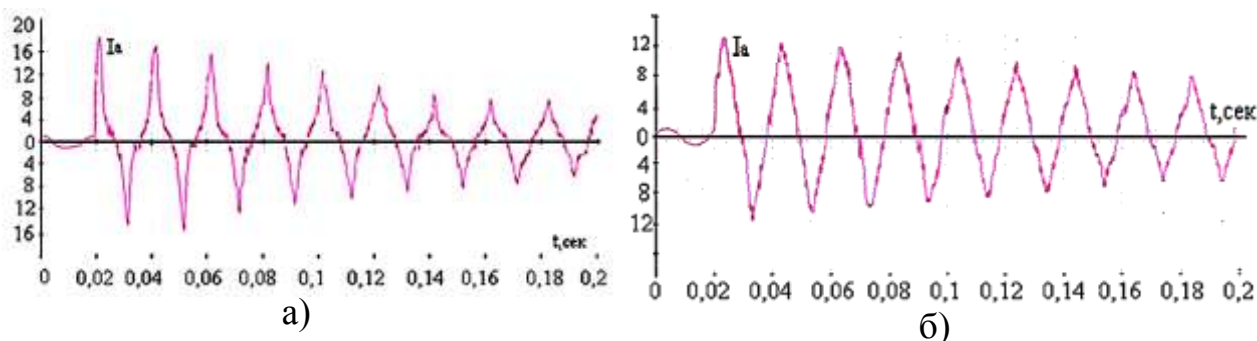


Физик модел ёрдамида тадқиқ қилинаётган генератор ҳова оралиғидаги магнит индукцияси статор пазлари тишларига маҳкамланадиган ўлчаш рамкалари орқали бир фазали, икки фазали ва икки фаза нол қисқа туташуш режимлар осциллограммалари олинган ҳамда таҳлил қилинган (6-расм).



**6 – расм. СГ (а) ва ИЎБҚСГ (б) бир фазали қисқа туташув режимидаги натижавий магнит индукцияси осциллограммалари**

Физик модел ёрдамида ИЎБҚСГ носимметрик қисқа туташуш режимлари тадқиқ қилиниб осциллограммалари WaveRunner 64Xi-A серияли осциллографда олинган.

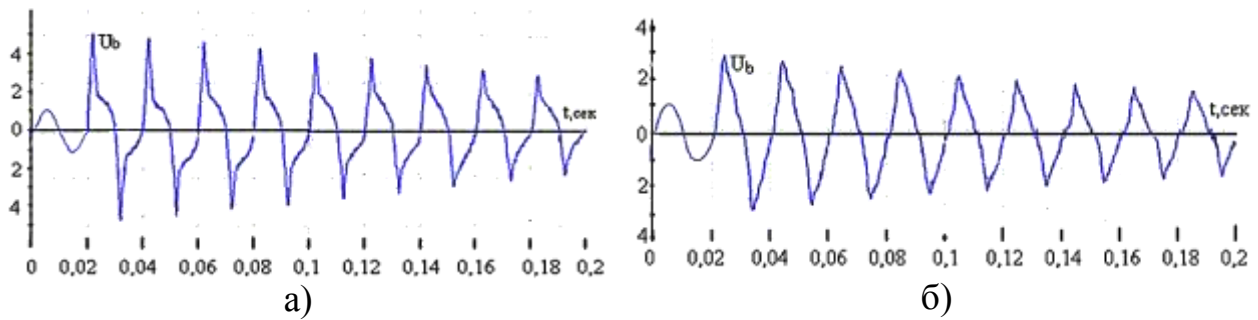


**7 – расм. СГ (а), ИЎБҚСГ (б) бир фазали қисқа туташувдаги статор токлари осциллограммаси**

#### 4 – жадвал

**Бир фазали қисқа туташув режимида фаза тоқларининг тажрибавий ўлчов натижаларини таққослаш**

Тури	Статор чулғами фаза тоқи ( $I_a$ )				Қарралиғи
	Берилган		Қисқа туташув тоқи		
	А	н.б.	А	н.б.	
СГ	7,0	1,0	121,18	17,312	17,312
ИЎБҚСГ	7,0	1,0	83,5	12,1	12,1
ИЎБҚСГ матлаб модели	7,0	1,0	91	12,6	12,6



8 – расм. СГ (а), ИЎБҚСГ (б) бир фазали қисқа туташувдаги статор очик фазаларидаги ўта кучланишлари осциллограммаси

### 5-жадвал

#### Бир фазали қисқа туташув режимида очик фазада ўта кучланишларининг тажрибавий ўлчов натижаларини таққослаш

Тури	Кучланиш ( $U_b/U_c$ )				Карралиги
	Берилган кучланиш		Очик фазадаги ўта кучланиш		
	В	н.б.	В	н.б.	
СГ	30	1,0	153/150	5,1/5	5,1/5
ИЎБҚСГ	30	1,0	88,2/85,5	2,94/2,85	2,94/2,85
ИЎБҚСГ матлаб модел	30	1,0	93/90	3,1/3	3,1/3

Яратилган физик тажриба стенди ёрдамида юқоридаги бир фазали қисқа туташуш режими тадқиқоти каби икки фаза, икки фаза нол қисқа туташуш режимларининг ҳам катталиклари олинган бўлиб, бу натижалар 4,5-жадваллардагидек таққосланганда, физик, математик ва имитацион моделларнинг натижаларининг бир-бирига мос келаётганини кўрсатди. Ушбу таққослаш натижалари яратилган моделларнинг тўғри тузилганлигини тасдиқлайди.

### ХУЛОСА

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертация мавзуси “Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторларнинг носимметрик қисқа туташуш режимларини таҳлил қилиш ва моделлаштириш” илмий иши натижалари бўйича қуйидаги хулосалар тақдим этилган:

1. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташуш режимларидаги тоқлари ва бу вақтда очик фазадаги ўта кучланишлар таҳлил килинди ва математик модели ишлаб чиқилди. Натижада икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташуш режимларини математик модели асосида тадқиқ қилишга эришилади.

2. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташуш режимлари тоқлари ва бу вақтдаги очик фазадаги ўта кучланишларни ҳисоблаш методикаси ва алгоритми ишлаб чиқилди. Натижада икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг

носимметрик қисқа туташиш режимларини ҳисоблаш методикаси ва алгоритми асосида таҳлил қилишга эришилади.

3. Илк бор Matlab дастурида икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг модели яратилди. Натижада носимметрик қисқа туташув режимларининг имитацион модели ишлаб чиқилиб олинган катталиклар физик, математик модел натижалари билан таққосланиб, тузилган моделларининг бир-бирига мослиги баҳоланади.

4. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташув режимларини тадқиқ қилиш тажриба модели яратилди. Натижада ток, кучланиш, ҳаво оралиғидаги магнит индукциялар тажриба асосида таҳлил қилинган.

5. Олиб борилган тадқиқотларда, икки ўқи бўйича қўзғатиладиган синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташув режимларидаги зарбавий катталиклари, худди шу қувватдаги оддий синхрон генераторга нисбатан 20-35% кичиклиги ва ўткинчи жараёнларнинг нисбатан тез сўниши, барқарор носимметрик қисқа туташув режимларида электр катталик шакллари эса оддий синхрон генераторникига нисбатан синусоидага яқин бўлиши аниқланди.

6. Кўндаланг қўзғатиш чулғами генераторнинг носимметрик қисқа туташув режим катталикларини яхшилаши аниқланди. Натижада бир фазали қисқа туташишда ток 30,1% га, очик фазадаги ўта кучланишлар 40% га камайди, икки фазали қисқа туташишда ток 30% га, ўта кучланиш 25% га камайди, икки фаза нол қисқа туташишда ток 20% га, ўта кучланиш эса 33% га камайтириш имконини берган.

Тадқиқот натижалари “Сирдарё” ИЭСнинг битта агрегатида турбогенератор тавсия кўринишида (“Ўзбекэнерго” АЖнинг 2018 йил 15 октябрдаги РМ-01-21/5509-сон маълумотномаси) ва “Ўрта Чирчиқ ГЭСлар каскади”нинг битта агрегатида гидрогенератор тавсия кўринишида (“Ўзбекгидроэнерго” АЖнинг 2019 йил 26 июндаги 04-05/1539-сон маълумотномаси) жорий қилинганида йилига 186 013 100 сўм иқтисодий фойда келтирди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
ДОКТОРА НАУК DSc 03/10.12.2019.Т.03.03 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**ТОШЕВ ШЕРЗОД ЭРГАШЕВИЧ**

**АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ НЕСИММЕТРИЧНЫХ  
КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ  
ДВУХОСНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

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

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

**Ташкент – 2020**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за В 2020.2.PhD/T276.

Докторская диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

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 «ZiyoNet» ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

<b>Научный руководитель:</b>	<b>Пирматов Нурали Бердиёрович</b> доктор технических наук, профессор
<b>Официальные оппоненты:</b>	<b>Камолов Тулаган Сирожиддинович</b> доктор технических наук, профессор <b>Арипов Назиржон Мукарарович</b> доктор технических наук, профессор
<b>Ведущая организация:</b>	<b>Ташкентский институт инженеров иригации и механизации сельского хозяйства</b>

Защита диссертации состоится «16» 12 2020 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании Научного совета DSc.03/10.12.2019.T.03.03 при Ташкентском государственном техническом университете. (Адрес: 100095, г Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (регистрационный номер - 186). (Адрес: 100095, Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 246-03-41).

Автореферат диссертации разослан «04» 12 2020 года.  
(протокол рассылки № «14» от «04» 12 2020 года).



**К.Р. Аллаев**  
Председатель научного совета  
по присуждению ученой степени,  
доктор технических наук, профессор, академик

**О. Х. Ишнараров**  
Ученый секретарь научного совета  
по присуждению ученой степени,  
доктор технических наук., с.н.с.

**М.И.Ибадуллаев**  
Председатель научного семинара при  
научном совете по присуждению учёной степени  
доктор технических наук., профессор

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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** Развитие современного спроса на электроэнергию в мире в стратегии развития электроэнергетики по повышению надежности электроснабжения потребителей, поддержанию баланса электроэнергии в системе особое внимание уделяется генераторам, вырабатывающим электроэнергию. В настоящее время в развитых странах «проводятся обширные исследования синхронных генераторов с двухосным возбуждением»<sup>1</sup>. В связи с этим особое внимание уделяется, в частности, исследованию несимметричных режимов короткого замыкания синхронных генераторов с двухосным возбуждением.

В мире в настоящее время проводятся исследования для изучения переходных процессов, происходящих в системах производства, передачи и распределения электроэнергии, а также для поддержания стабильности системы. Исследования в этой области, включая анализ несимметричных режимов работы с усовершенствованием генераторов производящих электроэнергию, являются приоритетными. При этом одной из актуальных задач является повышение эффективности производства качественной электроэнергии без повреждений во время переходных процессов на электростанциях и линиях электропередачи.

Проблемы управления синхронными генераторами в переходных процессах в энергетическом секторе, которая является одной из важнейшей отраслью экономики страны, в то же время проводятся исследования и меры по внедрению, чтобы повысить эффективность производства электроэнергии без повреждений. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы, в том числе: «...сокращение энергоемкости и ресурсоемкости экономики, широкое внедрение в производство энергосберегающих технологий, расширение использования возобновляемых источников энергии, повышение производительности труда в отраслях экономики...»<sup>2</sup>. При выполнении этой задачи в том числе, обеспечение бесперебойной работы генераторов в несимметричных режимах работы, бесперебойная подача электроэнергии потребителям, качество электроэнергии, стабильность работы системы, является одна из важных задач.

В Указе Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-2343 от 5 мая 2015 года «О Программе мер по сокращению энергоемкости,

---

<sup>1</sup><http://www.energetik.energy-journals.ru/index.php/EN/article/view/367>,

[https://ozlib.com/839900/tehnika/sinhronnye\\_mashiny\\_prodolno\\_poperechnogo\\_vozbuzhdeniya](https://ozlib.com/839900/tehnika/sinhronnye_mashiny_prodolno_poperechnogo_vozbuzhdeniya)

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

внедрению энергосберегающих технологий в отраслях экономики и социальной сфере на 2015-2019 годы» и №ПП-3012 от 26 мая 2017 года « О Программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017-2021 годы», а также для выполнения задач, изложенных в других нормативных актах, связанных с этой деятельностью, исследование данной диссертации служит в определенной степени.

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

**Степень изученности проблемы.** Одним из научных исследований по турбогенераторам в несимметричных режимах работы на электростанциях является изучение несимметричных режимов синхронных генераторов с двухосным возбуждением в ведущих мировых исследовательских центрах и университетах, включая Калифорнийский технологический институт (США), Мичиганский университет (США), Университет Ватерлоо (Канада), Токийский технологический институт (Япония), Миланский политехнический университет (Италия), Всероссийский научно-исследовательский институт электроэнергетики (ВНИИЭ, Россия), Национальный исследовательский университет (МЭИ, Россия) и ведутся масштабные научно-исследовательские работы на кафедре «Электрические машины» Ташкентского государственного технического университета (Узбекистан).

При разработке синхронных генераторов с двухосным возбуждением и асинхронизированных синхронных генераторов, а также создании современной теории их управления и практического использования внес большой вклад проф. М.М. Ботвинник, под его инициативой и руководством эта работа началась в 1955 году, а эту работу продолжил его преемник проф. Ю.Г. Шакарян. Работы по внедрению асинхронизированных генераторов начались в 60-х годах, основная работа, проводимая в этом направлении, заключалась в запуске 2-х асинхронизированных гидрогенераторов на Иова ГЭС (Колэнерго) мощностью по 40 МВт каждый. В теорию и в практику исследований внесли большой вклад такие учёные, как Н.И. Блоцкий, Н.Н. Щедрин, И.А. Радин, А.И. Лабунец, А.П. Лохматов, Л.Г. Мамиконянц, И.М. Постников, В.В. Попов, Н.И. Соколов, И.Д. Урусов, Е.А. Каспаров, М.С. Морси, Х. Амер, Б.В. Хогг, С. Раман, Дж. К. Клэр, А. Кан, Л. М. Рикардо, Р. М. Себастьян, а также ученые нашей страны М.Г. Ахматов, К.Р. Аллаев, Н.Б. Пирматов, О.Г. Одилов, Ж.С. Салимов, Л.В. Ковешникова и другие.

Несмотря на значительный успех, несимметричные режимы короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением изучены недостаточно. В этой работе были разработаны физические, математические модели и модель в MatLab для исследования несимметричных режимов короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением, а

также подробно проанализированы несимметричные режимы короткого замыкания и предложены решения.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательского плана Ташкентского государственного технического университета на тему № А-3-65 «Усовершенствование и оптимизация работы асинхронных двигателей на приводах механизмов с вентиляторным типом нагрузки» (2015-2017 г.г.).

**Целью исследования** является анализ и моделирование токов и перенапряжений в разомкнутой фазе в несимметричных режимах короткого замыкания (однофазный, двухфазный, двухфазный нулевой) синхронного генератора двухосного возбуждения.

**Задачи исследования:**

анализ и математическое моделирование токов в несимметричных режимах короткого замыкания синхронного генератора двухосного возбуждения, и перенапряжений в разомкнутой фазе в это время;

разработка методов и алгоритмов расчета несимметричных режимов короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением;

моделирование несимметричных режимов короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением;

создать экспериментальную модель и провести эксперимент для исследования несимметричных режимов короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением.

**Объектом исследования** является турбогенератор на ТЭС и гидрогенератор на ГЭС.

**Предмет исследования** - несимметричные режимы короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением.

**Методы исследований.** В исследовании использовались теория несимметричных режимов короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением, дифференциальные уравнения Парка-Горева, метод симметричных составляющих, математическое моделирование несимметричных режимов короткого замыкания и в программах MatLab, сравнение и обработка полученных данных.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

разработана математическая модель несимметричных режимов короткого замыкания на основе дифференциальных уравнений синхронного генератора с двухосным возбуждением;

разработан методика и алгоритм расчета несимметричных токов короткого замыкания и перенапряжений свободной фазы синхронного генератора с двухосным возбуждением;

разработана имитационная модель несимметричных режимов короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением на основе



совместимости построенных моделей, сравнения результатов с результатами физических, математических моделей;

создана и проанализирована экспериментальная модель для исследования несимметричных режимов короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением, на основе экспериментов по току, напряжению, магнитным индукциям в воздушном зазоре.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

при проектировании синхронного генератора с двухосным возбуждением была разработана математическая модель несимметричных режимов короткого замыкания для определения оптимальных величин;

вычислительная методология и алгоритм были разработаны для анализа несимметричных режимов короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением;

разработали математическую имитационную модель для быстрого и недорогого исследования несимметричных режимов короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением разной мощности;

разработали экспериментальную модель для исследования режима несимметричного короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением.

**Достоверность результатов исследований** объясняется тем, что результаты, полученные с использованием моделей несимметричных режимов короткого замыкания в физических, математических моделях и программах MatLab, и их совместимость основаны на их приемлемости для использования в производстве, согласованности многочисленных теоретической результатов и экспериментальной проверки.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.** Научная значимость результатов исследования объясняется повышением работоспособность синхронного генератора с двухосным возбуждением по сравнению с традиционными синхронными генераторами в несимметричных режимах короткого замыкания, малость ударных величины на 20-35% и быстрым угашением переходных процессов.

Практическая значимость результатов исследования объясняется тем, что методы, разработанные для синхронного генератора с двухосным возбуждением, могут быть использованы при анализе несимметричных режимов короткого замыкания турбо и гидрогенераторов различной мощности, а также в рабочем процессе, поскольку результаты исследования апробированы на синхронном генераторе, применяемых на электростанциях.

**Внедрение результатов исследования.** На основании полученных научных результатов по анализу и моделированию несимметричных режимов короткого замыкания синхронных генераторов с двухосным возбуждением:

синхронный генератор с двухосным возбуждением внедрен в качестве турбогенератора на Сырдарьинской ТЭС и гидрогенератора на каскаде Урта-Чирчикских ГЭС (АО «Узбекэнерго» № РМ-01-21 / 5509 от 15 октября 2018

года и АО «Узбекгидроэнерго» от 26 октября 2019 года. справки № 04-05 / 1539 от июня). В результате удалось получить экономическую эффективность 186 013 100 сумов;

синхронного генератора с двухосным возбуждением предотвратил выход из синхронизма турбогенераторов и гидрогенераторов из-за несимметричных режимов короткого замыкания. В результате смог повысить эффективность за счет экономии электроэнергии, которая должна быть потеряна во время остановов чем в традиционным синхронном генераторе;

использование синхронного генератора с двухосным возбуждением на ТЭС и ГЭС снизило величину короткого замыкания на 20-35% в несимметричных режимах короткого замыкания. В результате удалось снизить вероятность повреждения генератора в несимметричных режимах короткого замыкания.

**Апробация результатов исследований.** Результаты данного исследования прошли апробацию на 10-научно-практических конференциях и семинарах, в том числе на 3-и международных, 2-и зарубежных и 5-и республиканских конференциях.

**Опубликованность результатов исследований.** По теме диссертации опубликовано 19 научных трудов, в том числе 7 статей в научных изданиях, рекомендованных к публикации основных научных результатов докторских диссертаций ВАК Республики Узбекистан, в том числе 5 национальных и 1 зарубежный научный журнал, опубликовано 1 журнале на базе Scopus.

**Структура и объем диссертации.** Структура диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации 107 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приводятся обоснования актуальности и востребованности диссертационного исследования, описание цели и основных задач, а также объектов и предметов, соответствующих приоритетным направлениям развития науки и технологии Республики Узбекистан, научная новизна и практические результаты, теоретическая и прикладная значимость результатов, сведения об опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Анализ современного состояния режимов несимметричного короткого замыкания синхронных генераторов»** проанализировано ущерб, причиненный несимметричными режимами синхронных генераторов производимых электрической энергии в Республике Узбекистан и в мире, их влияние на качество и стабильность электроэнергии.

Изучены и проанализированы научно-исследовательские работы зарубежных и узбекских ученых, проводивших исследования при решении научных задач по несимметричным режимам короткого замыкания синхронных генераторов, дано подробное описание объекта исследования.

Анализ литературы показал, что справочная литература по несимметричным режимам короткого замыкания, току в несимметричных режимах короткого замыкания, перенапряжениям, ударным моментам,

методам их решения, моделям синхронного генератора и уравнениям для синхронного генератора с двухосным возбуждением (СГДВ) не рассмотрены. При исследовании и анализе научно-исследовательских работ ученых, проводивших и ведущих исследования несимметричных режимов работы, несимметричные режимы короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением не изучены.

Дана краткая классификация основных проблем исследования синхронных генераторов двухосного (продольного и поперечного) возбуждения, а также рассмотрены несимметричные режимы короткого замыкания неявнополюсных синхронных генераторов и на основе анализа литературных источников показаны важные аспекты исследования свойств поперечных обмоток.

Проведенные исследования показали, что токи короткого замыкания и перенапряжения не поврежденных фаз при несимметричных режимах работы СГДВ не изучались. Вместе с тем не определены оптимальные режимы работы СГДВ при несимметричных коротких замыканиях и не разработан научно обоснованный метод расчета ударных величин в этих режимах.

В ходе исследования было проанализировано несколько методов расчета несимметричных режимов короткого замыкания, из которых были показаны и выделены преимущества метода симметричных составляющих. Метод симметричных составляющих позволяет более простым способом вычислить сложную задачу и имеет возможность более точного расчета в несимметричных режимах короткого замыкания с несколькими переменными.

Во второй главе, озаглавленной **«Математический анализ несимметричных режимов короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением»**, представлены кривые магнитодвижущих сил анализ несимметричных режимов короткого замыкания СГДВ с помощью метода симметричных составляющих. Исследование несимметричных режимов короткого замыкания СГДВ было проанализировано и оценено аналитическими и численными методами.

Для этого был использован метод симметричных составляющих, который может быть использован для полноценного исследования несимметричных режимов короткого замыкания в электрических машинах.

Устойчивые токи короткого замыкания можно определить методом симметричных составляющих:

ток в режиме однофазного короткого замыкания

$$I_{кз1} = 3E_0 / (x_d + x_2 + x_0) \quad (1)$$

ток в режиме двухфазного короткого замыкания

$$I_{кз2} = \sqrt{3} E_0 / (x_d + x_2) \quad (2)$$

ток в режиме трехфазного короткого замыкания

$$I_{кз3} = I_{кТ} = E_0 / x_d. \quad (3)$$

Эти токи будут индуктивными по своей природе.

Из характеристик несимметричного короткого замыкания СГДВ определяем параметры  $x_2$  и  $x_0$  :

$$x_2 = \sqrt{3} E_0 / I_{кз2} - E_0 / I_{кз3}; \quad (4)$$

$$x_0 = 3E_0 / I_{кз1} - \sqrt{3} E_0 / I_{кз2}. \quad (5)$$

Рассмотрим расчет величин короткого замыкания методом симметричных составляющих:

Для этого нам потребуется описание характеристика холостого хода, приведенное в таблице 1.

**Таблица-1**

**Величина холостого хода**

Величина	Единица измерения	Результат						
$E_a$	<b>В</b>	73,7	127	153,7	168,9	177,8	185,4	191,6
	<b>о.е.</b>	0,58	1,0	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51
$I_{fd} = I_{fq}$	<b>А</b>	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5
	<b>о.е.</b>	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5

В режимах короткого замыкания свойство размагничивания якоря велико, поэтому стальной сердечник машины не насыщается. Исходя из вышеизложенного, можно построить соединение  $E_a = f(I_{fd} = I_{fq})$  в зависимости от тока возбуждения и ЭДС короткозамкнутого якоря.

Выполнив несколько математических операций, можно вывести следующую зависимость  $E_a = 29,5 I_d$ . На основе полученного соединения рассчитываем ЭДС, которая появляется на якоре для каждого условия короткого замыкания:

При однофазном коротком замыкании:

$$E_{a1} = 29,5 \cdot I_{d1} = 29,5 \cdot 5,8 = 171,1 \text{ В}$$

При двухфазном коротком замыкании:

$$E_{a2} = 29,5 \cdot I_{d2} = 29,5 \cdot 3,82 = 112,7 \text{ В}$$

При трехфазном коротком замыкании:

$$E_{a3} = 29,5 \cdot I_{d3} = 29,5 \cdot 3,8 = 112,1 \text{ В}$$

Прямая последовательность полного сопротивления якоря может быть рассчитана из эксперимента по трехфазному короткому замыканию:

$$Z_1 = E_{a3} / I_{кз3} = 112,1 / 2,7 = 41,5 \text{ Ом}$$

Как упоминалось выше, ток обратной последовательности при взаимном коротком замыкании двух фаз равен значению, обратному току прямой последовательности ( $I_2 = -1,95A$ ). Ток нулевой последовательности равен нулю ( $I_0 = 0$ ).

Однофазное короткое замыкание. Прямая последовательность:

$$I_1 = \frac{E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2} = \frac{127}{2,44 + 41,5 + 23,6} = 1,88 \text{ A}$$

При однофазном коротком замыкании прямая, обратная и нулевая ( $I_1=I_2=I_0=1,88 \text{ A}$ ) последовательности тока равны друг другу.

Ток в нулевом проводе равен сумме трех составляющих:  $I_{кз.0}=3 \cdot I_1=3 \cdot 1,88 = 5,64 \text{ A}$ .

Определив сопротивление данной машины, можно вычислить, какие токи будут течь в статоре во время двухфазного короткого замыкания на ноль во время работы.

Ток прямой последовательности:

$$I_1 = \frac{(Z_0 + Z_2) \cdot E_a}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0} = \frac{(2,44 + 23,6) \cdot 127}{979,4 + 101,3 + 57,6} = 2,91 \text{ A}$$

Ток обратной последовательности:

$$I_2 = \frac{-Z_0 \cdot E_a}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0} = \frac{-2,44 \cdot 127}{979,4 + 101,3 + 57,6} = -0,272 \text{ A}$$

Ток нулевой последовательности:

$$I_0 = \frac{-Z_2 \cdot E_a}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0} = \frac{-23,6 \cdot 127}{979,4 + 101,3 + 57,6} = -2,63 \text{ A}$$

Ток нулевого провода:

$$I_{кз0} = \frac{-3Z_2 \cdot E_a}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0} = \frac{-3 \cdot 23,6 \cdot 127}{979,4 + 101,3 + 57,6} = -7,9 \text{ A}$$

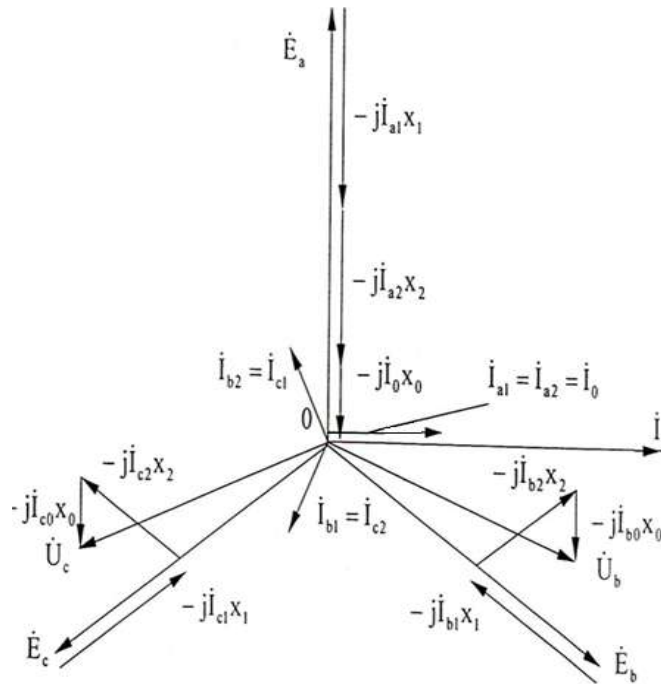
Ток короткого замыкания:

$$I_{кз} = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{|Z_2^2 + Z_2 \cdot Z_0 + Z_0^2|} \cdot E_a}{|Z_1 \cdot Z_2 + Z_1 \cdot Z_0 + Z_2 \cdot Z_0|} = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{|23,6^2 + 23,6 \cdot 2,44 + 2,44^2|}}{979,4 + 101,3 + 57,6} = 0,427 \text{ A}$$

**Таблица-2**

**Результаты расчетов с использованием метода симметричных составляющих.**

	Типы коротких замыканий			
	Трёхфазный	Двухфазный	Однофазный	Двух фаз на нейтраль
$I_1$	3,06	1,95	1,88	2,91
$I_2$	0	-1,95	1,88	-0,272
$I_0$	0	0	1,88	-2,63
$I_{кз.0}$	0	0	5,64	-7,9
$I_{кз}$	3,06	3,38	5,64	0,427



**Рис-1. Векторная диаграмма напряжений и тока, однофазного нулевого короткого замыкания синхронного генератор с двухосным возбуждением**

На основе значений таблицы 2, рассчитанных методом симметричных составляющих, была построена векторная диаграмма напряжений и тока, однофазного нулевого короткого замыкания синхронного генератор с двухосным возбуждением, показанным на рисунке 1. Кроме того, в таблице 2 были построены тоже такой векторные диаграммы для режима двухфазного и двухфазного нулевого короткого замыкания.

Третья глава диссертации озаглавлена «**Исследование режимов симметричного короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением**» и на основе системы уравнений Парка-Горева была разработана математическая модель несимметричных режимов короткого замыкания СГДВ, и с использованием этих уравнений был разработан алгоритм расчета токов несимметричных режимов короткого замыкания и перенапряжений в открытой фазе. На основе математической модели была разработана модель Matlab и получены осциллограммы несимметричных токов короткого замыкания и перенапряжений открытой фазе в СГДВ.

Известно, что дифференциальные уравнения СГДВ нелинейны и поэтому существуют определенные трудности в их решении.

Могут быть обозначены и другие величины машины по продольной и поперечной осям. Используя оси  $d$  и  $q$ , мы выражаем полные алгебро-дифференциальные уравнения, выражая все величины машины через два составляющих.

Используя уравнение Парка-Горева, запишем:

$$\begin{aligned}
& \frac{d\psi_d}{dt} + i_d \cdot r_d = 0 \\
& \frac{d\psi_q}{dt} + i_q \cdot r_q = 0 \\
u_d = -\frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \frac{d\gamma}{dt} - i_d r & \quad \psi_d = X_d \cdot i_d + X_{ad} \cdot i_{fd} + X_{1d} \cdot i_{1d} \\
u_q = \psi_d \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\psi_q}{dt} - i_q r & \quad \psi_q = X_q \cdot i_q + X_{aq} \cdot i_{fq} + X_{1q} \cdot i_{1q} \\
u_{fd} = \frac{d\psi_{fd}}{dt} + i_{fd} \cdot r_{fd} & \quad \psi_{fd} = X_{fd} \cdot i_{fd} + X_{ad} \cdot i_d + X_{1d} \cdot i_{1d} \\
u_{fq} = \frac{d\psi_{fq}}{dt} + i_{fq} \cdot r_{fq} & \quad \psi_{fq} = X_q \cdot i_{fq} + X_{aq} \cdot i_q + X_{1q} \cdot i_{1q} \\
u_0 = X_0 \frac{di_0}{dt} + i_0 \cdot r_0 & \quad \psi_{1d} = X_{ad} \cdot i_d + X_{fd} \cdot i_{fd} + X_{1d} \cdot i_{1d} \\
& \quad \psi_{1q} = X_{aq} \cdot i_q + X_{fq} \cdot i_{fq} + X_{1q} \cdot i_{1q} \\
& \quad M_\Gamma = \psi_q \cdot i_d - \psi_d \cdot i_q \\
& \quad \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{1}{T_j} (M_T - M_\Gamma) = \frac{1}{T_j} [M_1 - (\psi_q \cdot i_d - \psi_d \cdot i_q)]
\end{aligned} \tag{6}$$

С помощью системы уравнений (6) была построена модель пакета MatLab в программе Simulink для исследования несимметричных режимов короткого замыкания СГДВ.

Уравнение потокосцепления в цепи статора для режима однофазного короткого замыкания СГДВ выглядит следующим образом:

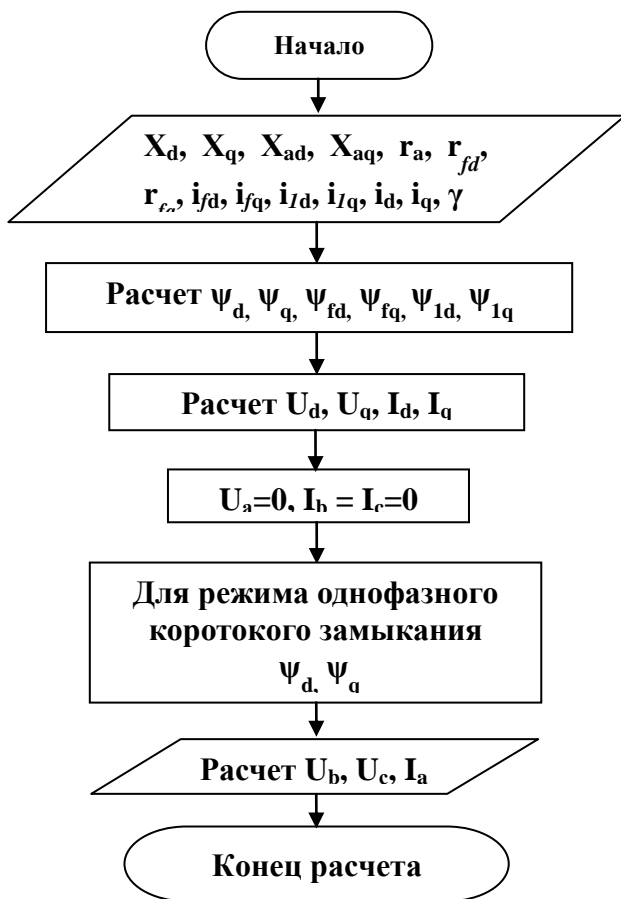
$$\left. \begin{aligned}
\psi_d &= X_{ad} \cdot (1 + \cos 2\gamma_r) \cdot (i_{fd} + i_{1d}) - X_{ad} \cdot \sin 2\gamma_r \cdot (i_{fq} + i_{1q}) - 2(X_d + X_k) \cdot i_d \\
\psi_q &= -X_{ad} \cdot \sin 2\gamma_r \cdot (i_{fd} + i_{1d}) - X_{aq} \cdot (1 - \cos 2\gamma_r) \cdot (i_{fq} + i_{1q}) - 2(X_d + X_k) \cdot i_q
\end{aligned} \right\} \tag{7}$$

Уравнение потокосцепления в цепи статора для режима двухфазного короткого замыкания СГДВ выглядит следующим образом:

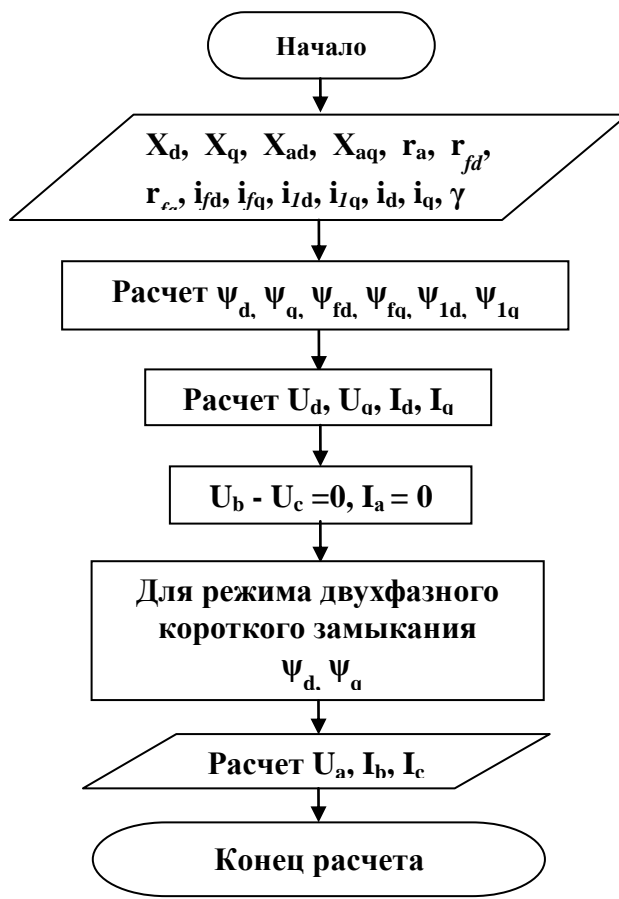
$$\left. \begin{aligned}
\psi_d &= \frac{X_{ad}}{2} \cdot (1 - \cos 2\gamma_r) \cdot (i_{fd} + i_{1d}) + \frac{X_{ad}}{2} \cdot \sin 2\gamma_r \cdot (i_{fq} + i_{1q}) - X_d \cdot i_d \\
\psi_q &= \frac{X_{ad}}{2} \cdot \sin 2\gamma_r \cdot (i_{fd} + i_{1d}) + \frac{X_{aq}}{2} \cdot (1 + \cos 2\gamma_r) \cdot (i_{fq} + i_{1q}) - X_q \cdot i_q
\end{aligned} \right\} \tag{8}$$

Уравнение потокосцепления в цепи статора для режима двухфазного нулевого короткого замыкания СГДВ выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned}
\psi_d &= \frac{X_{ad}}{2} \cdot (1 + \cos 2\gamma_r) \cdot (i_{fd} + i_{1d}) + \frac{X_{ad}}{2} \cdot \sin 2\gamma_r \cdot (i_{fq} + i_{1q}) - (X_d + 2X_k) \cdot i_d \\
\psi_q &= \frac{X_{ad}}{2} \cdot \sin 2\gamma_r \cdot (i_{fd} + i_{1d}) + \frac{X_{aq}}{2} \cdot (1 - \cos 2\gamma_r) \cdot (i_{fq} + i_{1q}) - (X_q + 2X_k) \cdot i_q
\end{aligned} \right\} \tag{9}$$



**Рис-2. Алгоритм расчета однофазных токов короткого замыкания и перенапряжений в СГДВ**



**Рис-3. Алгоритм расчета двухфазных токов короткого замыкания и перенапряжений в СГДВ**

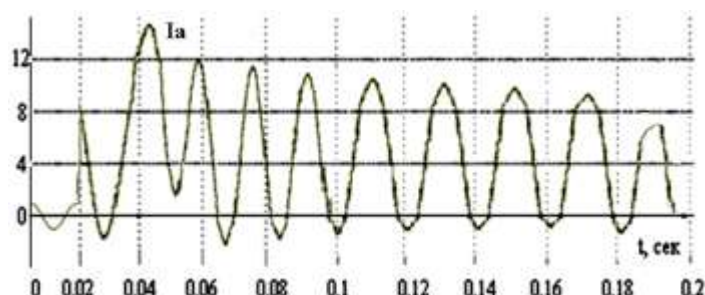
(7-9) - построены уравнения потокосцепления в цепи статора СГДВ для однофазного, двухфазного и двухфазного нулевого режимов короткого замыкания.

На основе приведенных выше уравнений в Matlab была разработана модель для изучения токов короткого замыкания и перенапряжений открытой фазе в это время. Используя модель в этом разработанном Matlab, были получены токи статора в режимах однофазного, двухфазного, двухфазного нулевого короткого замыкания и осциллограммы перенапряжений открытой фазе в это время.

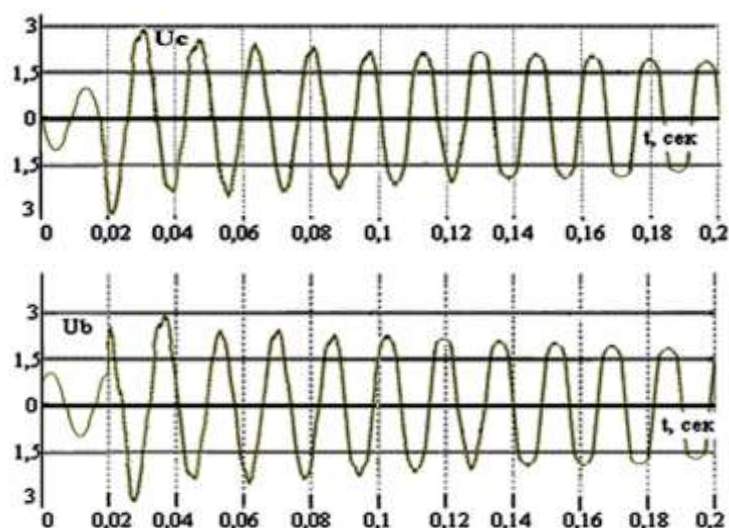
Например, с использованием модели в Matlab на рисунке 4 показана осциллограмма тока статора в режиме однофазного короткого замыкания СГДВ, а на рисунке 5 показана осциллограмма перенапряжений открытой фазе в это время.

«Экспериментальная проверка несимметричных режимов короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением», четвертая глава диссертационного исследования в котором представлена информация о конструкции исследуемого генератора, создании физической модели и величина СГДВ (таблица-3).





**Рис-4. Осциллограмма тока статора однофазного короткого замыкания на СГДВ.**



**Рис-5. Осциллограммы перенапряжения открытой фазы статора при однофазном коротком замыкании на СГДВ.**

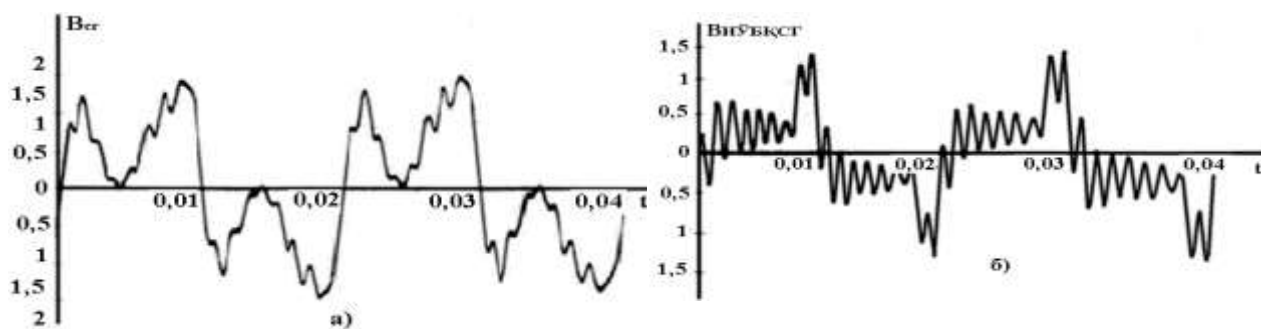
**Таблица-3**

**Технические параметры генераторов с продольным и поперечным возбуждением, в которых исследуются несимметричные режимы короткого замыкания**

Параметры	Единица измерения	Величины
Номинальная мощность	кВт	2,2
Скорость вращения	Об/мин	1500
Номинальный ток статора	А	7
Номинальное напряжение	В	380
Номинальное напряжение обмотки возбуждения	В	220
Номинальный ток ротора	А	5
КПД	%	85
Момент инерции	Кг*м <sup>2</sup>	0,029
Масса	кг	18

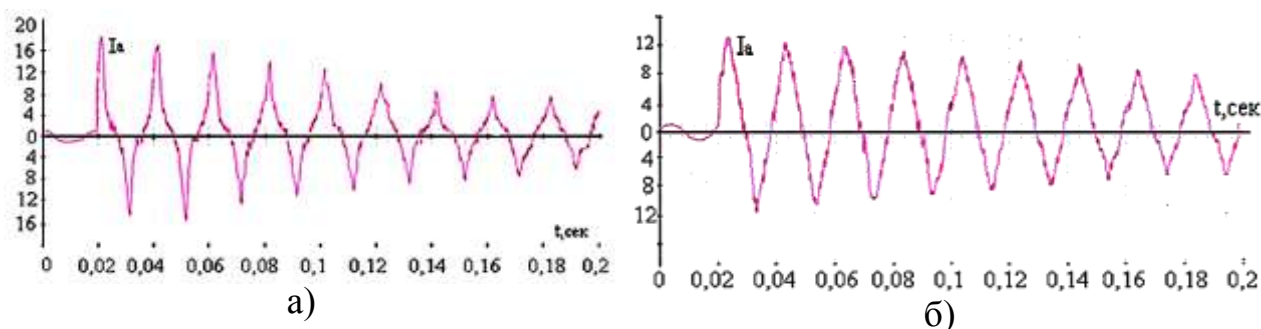
С использованием физической модели с помощью измерительных рамок, закрепленных на зубцах клиньев статора были получены и проанализированы осциллограммы магнитной индукции в исследуемом

воздушном зазоре генератора во время однофазных, двухфазных и двухфазных нулевых режимов короткого замыкания (рис.6).



**Рис-6. Осциллограммы результирующей магнитной индукции СГ (а) и СГДВ (б) в режиме однофазного короткого замыкания**

С использованием физической модели были исследованы несимметричные режимы короткого замыкания СГДВ и получены осциллограммы на осциллографе серии WaveRunner 64Xi-A.

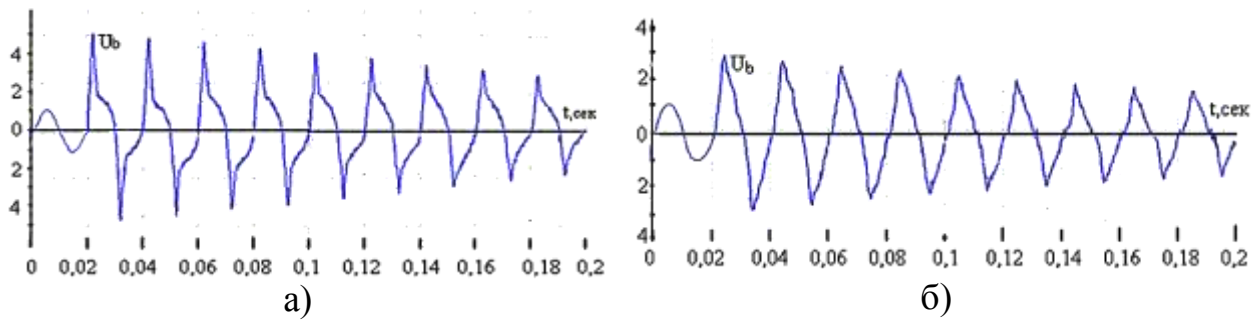


**Рис-7. Осциллограмма тока статора однофазного короткого замыкания СГ (а) и СГДВ (б)**

**Таблица-4**

**Сравнение экспериментальных результатов измерения фазных токов в режиме однофазного короткого замыкания**

Тип	Фазный ток обмотки статора ( $I_a$ )				кратность
	Номинальный ток статора		Ток короткого замыкания		
	А	н.б.	А	н.б.	
СГ	7,0	1,0	121,18	17,312	17,312
СГДВ (физическая модель)	7,0	1,0	83,5	12,1	12,1
СГДВ (модели в Matlab)	7,0	1,0	91	12,6	12,6



**Рис-8. Осциллограмма перенапряжения в открытой фазе в режиме однофазного короткого замыкания статора СГ (а) и СГДВ (б)**

**Таблица-5**

**Сравнение результатов экспериментальных измерений перенапряжений в открытой фазе в режиме однофазного короткого замыкания**

Тип	Напряжения ( $U_b/U_c$ )				Кратность
	Заданное напряжение		Перенапряжения в открытой фазе		
	В	н.б.	В	н.б.	
СГ	30	1,0	153/150	5,1/5	5,1/5
СГДВ (физическая модель)	30	1,0	88,2/85,5	2,94/2,85	2,94/2,85
СГДВ (модели в Matlab)	30	1,0	93/90	3,1/3	3,1/3

Используя созданный стенд для физического эксперимента, были получены величины как двухфазных, так и двухфазных нулевых режимах короткого замыкания, как в вышеупомянутом исследовании однофазного режима короткого замыкания, и результаты были сопоставлены в таблице 4 и 5, чтобы показать, что результаты физических и математических имитационных моделей согласуются. На основании этих результатов было подтверждено, что созданные модели были правильно структурированы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов диссертационной работы «Анализ и моделирование несимметричных коротких замыканий синхронных генераторов двухосного возбуждения» доктора философии по техническим наукам (PhD) представлены следующие заключения:

1. Были проанализированы токи несимметричных режимов короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением и перенапряжения открытой фазы в это время, и была разработана математическая модель. В результате исследования достигнуты несимметричные режимы короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением на основе математической модели.

2. Разработаны методы и алгоритмы расчета токов несимметричных режимов короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением и перенапряжений в открытой фазе на данный момент. В результате, проведен анализ, основанный на методике и алгоритме расчета режимов несимметричного короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением.

3. Впервые в программе Matlab создана модель синхронного генератора с двухосным возбуждением. В результате разработана имитационная модель несимметричных режимов короткого замыкания, величины которой сравниваются с результатами физическим, математическим моделям, а также структурированные модели оцениваются на совместимость друг с другом.

4. Разработана экспериментальная модель для исследования несимметричных режимов короткого замыкания синхронного генератора с двухосным возбуждением. В результате ток, напряжение, магнитные индукции в воздушном зазоре были проанализированы экспериментально.

5. Исследования показали, что ударных величин синхронных генераторов с двухосным возбуждением в несимметричных режимах короткого замыкания на 20-35% меньше, чем в простом синхронном генераторе той же мощности, и относительно быстром затухании переходных процессов, в стабильных несимметричных режимах короткого замыкания формы электрических величин оказались ближе к синусоиде, чем в простом синхронном генераторе.

6. Было обнаружено, что обмотка с поперечной обмоткой возбуждением улучшает величины несимметричные режимы короткого замыкания генератора. В результате однофазный ток короткого замыкания снизился на 30,1%, перенапряжение разомкнутой фазы на 40%, двухфазный ток короткого замыкания на 30% и перенапряжение на 25%, ток двухфазное короткое замыкание через ноль уменьшилась на 20%, а перенапряжение на 33% снижается.

При внедрении результаты исследования в рекомендуемом виде турбогенератора на одном блоке Сырдарьинской ТЭС (Справка АО «Узбекэнерго» РМ-01-21/5509 от 15 октября 2018 г.) и в рекомендуемом виде гидрогенератора на одном блоке каскада Урта Чирчикских ГЭС (Узбекгидроэнерго, 2019). Справка № 04-05 / 1539 от 26.06.2006г.) принес экономический эффект в размере 186 013 100 сумов в год.

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY  
SCIENTIFIC COUNCIL FOR AWARDED SCIENTIFIC  
DEGREES DSc. 03/10.12.2019.T.03.03**

---

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

**TOSHEV SHERZOD ERGASHEVICH**

**ANALYSIS AND MODELING OF ASYMMETRIC SHORT- CIRCUIT  
MODES OF SYNCHRONOUS GENERATORS OF BIAxIAL  
EXCITATION**

**05.05.02- Electrical engineering. Electric power stations and systems.  
Electrotechnical complexes and installations**

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

**Tashkent – 2020**

The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) in technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B 2020.2.PhD/T276.

The dissertation has been prepared at Tashkent State Technical University named after Islam Karimov.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian and English (resume)) on the website [www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz) and on the website of «ZiyoNet» Information and education portal [www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz).

**Scientific supervisor:**

**Pirmatov Nurali Berdiyevich**  
doctor of technical sciences, professor

**Official opponents:**

**Kamalov Tulagan Sirojiddinovich**  
doctor of technical sciences, professor

**Aripov Nazirjon Mukaramovich**  
doctor of technical sciences, professor

**Leading organization:**

**Tashkent institute of irrigation and  
agricultural mechanization engineers**

The defense of dissertation will take place on "16" 12 2020 at 10<sup>00</sup> o'clock at a meeting of the Scientific council No. DSc. 03/10.12.2019.T.03.03 under Tashkent State Technical University and LLC "Scientific-Technical Centre" (Address: 100095, Tashkent, Universitetst., 2. Tel./fax: (99871) 227-10-32; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).

The doctoral dissertation can be reviewed at the Information-resource center of Tashkent State Technical University (is registered number No 186) (Address: 100095, Tashkent, Universitetskaya st., 2. Tel./fax: (99871) 246-03-41; e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz)).

Abstract of the dissertation sent out on "04" 12 2020  
(Protocol of the delivery No 14 dated "04" 12 2020)



**K.R.Allaev**  
Chairman of scientific council for awarding  
scientific degrees  
Doctor of technical sciences, Professor, Academician

**O.H.Ishnazarov**  
Scientific secretary of scientific council  
on awarding scientific degrees,  
Doctor of technical sciences, Senior Scientific Researcher

**I.M.Ibadullaev**  
Chairman of scientific seminar under scientific council  
for awarding scientific degrees  
Doctor of technical sciences, Professor

## INTRODUCTION (abstract of thesis)

**Research objective is** to analyze and simulate no-load currents and overvoltages in asymmetric short-circuit modes (single-phase, two-phase, two-phase zero) of a synchronous biaxial excitation generator.

**Research problems:**

analysis and mathematical modeling of currents in asymmetric modes of short circuit of a synchronous generator of biaxial excitation, and overvoltages in the open phase at this time;

development of methods and algorithms for calculating asymmetric short-circuit modes of a synchronous generator with biaxial excitation;

simulation of asymmetric short-circuit modes of a synchronous generator with biaxial excitation;

to create and carry out an experimental model for the study of asymmetric short-circuit modes of a synchronous generator with biaxial excitation.

**The object of research** is a turbine generator at a thermal power plant and a hydrogenerator at a hydroelectric power plant.

**The scientific novelty of the research is as follows:**

a mathematical model of asymmetric short-circuit modes based on differential equations of a synchronous generator with biaxial excitation has been developed;

a method and algorithm for calculating unbalanced short-circuit currents and overvoltages of phase breakage of a synchronous generator with biaxial excitation are developed;

a simulation model of asymmetric short-circuit modes of a synchronous generator with biaxial excitation is developed based on the compatibility of the constructed models and comparison of the results with the results of physical and mathematical models;

an experimental model has been created and analyzed to study asymmetric short-circuit modes of a synchronous generator with biaxial excitation based on experiments on current, voltage, and magnetic inductions in the air gap.

**The structure and outline of the research work.**The thesis consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of literature, and applications. The volume of the thesis is 107 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙЎХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (I часть; I part)**

1. Пирматов Н.Б., Тошев Ш.Э., Дувлонов Ж. Икки ўқи бўйича кўзгатиладиган синхрон генераторларнинг носимметрик қисқа туташув режимлари. – ТошДТУ хабарлари. 2016, №3 с.63-69. (05.00.00; №16).
2. Пирматов Н.Б., Салимов Д.С., Тошев Ш.Э. Синхронная машина двухосного возбуждения для симметрирования фазного напряжения при изменении нагрузки. – Журнал проблемы энерго и ресурсосбережения №1-2, 2012, с.163-165 (05.00.00; №21).
3. Тошев Ш.Э., Пирматов Н.Б. Икки ўқи бўйича кўзгатиладиган ноаён кутбли синхрон генераторнинг носимметрик қисқа туташув режимлари таҳлили. – ТошДТУ хабарлари, махсус нашр, 2015, с.100-105. (05.00.00; №16).
4. Пирматов Н.Б., Салимов Д.С., Тошев Ш.Э. Некоторые аспекты сравнения эксплуатационных свойств синхронных машин с обычной и двумя взаимно сдвинутыми обмотками возбуждения. . – Энергия ресурс тежаш муаммолари журнали №1-2, 2010, с.160-169 (05.00.00; №21).
5. Хайдаров С.Ж., Тошев Ш.Э. Анализ перенапряжений, возникающих при несимметричных коротких замыканиях в синхронном турбогенераторе двухосного возбуждения. – Вестник ТашГТУ. 2016, №1 с 68-74. (05.00.00; №16).
6. Toshev Sh.E., Pirmatov N.B., Haydarov S.D., Duvlonov J.N., Yakubova D.K. Analysis of magnetic field in the air gap not expressly pole synchronous generator excitation biaxially at asymmetrical short circuit. -European Science Review.: Austria, Vienna, 2016 №11-12, 134-136. (05.00.00; №3).

**II бўлим (II часть; II part)**

7. Pirmatov N.B., Toshev Sh.E. Overvoltage in the free phase of the stator winding in case of asymmetric short circuit implicit pole synchronous generator biaxial excitation. –E3S Web of Conferences 139, 01030 (2019), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901030> (05.00.00; Scopus).
  8. Pirmatov N.B., Toshev Sh.E., Haydarov S.D., Tosheva Sh.N. Investigation of electromagnetic processes in electrical system with biaxial turbogenerator excitation at asymmetrical short circuit. –European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences.: Austria, Vienna, 15th International scientific conference 20th July 2017, 105-110.
  9. Пирматов Н.Б., Тошев Ш.Э. Магнитное поле в воздушного зазора неявнополюсной синхронной машины двухосного возбуждения при несимметричном коротком замыкании. -Вестник Алматинского института энергетики и связи. Алматы.: 2008г.№2(2), с.40-44
  10. Одилов Г., Тошев Ш.Э. Синхрон генератор қисқа туташуш зарбавий токига унинг актив қисмлари ўлчамлари таъсирини текшириш. - Сб. “Фан ва
- 40



техника траккиётида ёшлар” мавзусида иктидорли талабаларнинг илмий – амалий анжумани. II – қисм. Тошкент.: ТошДТУ, 2001й. 44б.

11. Пирматов Н.Б., Тошев Ш.Э. Однофазное короткое замыкание синхронного генератора. - Международной научно – технической конференции «Современное состояние и перспективы развития энергетики» Сборник трудов. Тошкент.: ТошГТУ, 2006г. 175-177с.

12. Пирматов Н.Б., Тошев Ш.Э., Эгамов А.М., Тошева Ш.Н. Динамических перенапряжений в электрической системе содержащей синхронный турбогенератор двухосного возбуждения при несимметричных коротких замыканиях. – Республиканская научно-техническая конференция. Карши.: 2017, с 452-454.

13. Тошев Ш.Э. Экспериментальное исследование магнитного поля в воздушном зазоре неявнополюсной синхронной машины двухосного возбуждения при несимметричном коротком замыкании. - Сб. Международная научная конференция «Инновация - 2007» Тошкент.: 2007й. с.187-188

14. Тошев Ш.Э., Гафурова М.О. Икки ўқи бўйича кўзгатиладиган ноаён кутбли синхрон генераторнинг носимметрик қиска туташув режимлари математик таҳлили. «Фан ва техника тараққиётида интеллектуал ёшларнинг ўрни» Республика илмий анжумани. Маърузалар тўплами. 1-қисм. 2015й. 67-70б.

15. Тошев Ш.Э., Пирматов Н.Б. Двухфазное короткое замыкание двух фаз на нольный провод синхронного генератора двухосного возбуждения. - Тошкент темир йўл транспорти муҳандислари институти, Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институти, Тошкент автомобил йўллари институти. Ер усти транспорти тизимлари муаммоларига бағишланган илмий техник конференция, II-қисм, Тошкент.: 2007й.141-143б.

16. Тошев Ш.Э., Пирматов Н.Б. Двухфазное несимметричное короткое замыкание синхронного генератора двухосного возбуждения. - Сб. Международная научная конференция «Инновация - 2005» Тошкент.: 2005й. 119-120с.

17. Тошев Ш.Э., Пирматов Н.Б. Ноаён кутбли синхрон генераторнинг магнит майдонини тажриба йўли билан текшириш. - «Техника юлдузлари» 2002й, №3, 43-46 б.

18. Тошев Ш.Э., Таниев М., Эгамбердиев Д.Х. Исследование электромагнитных процессов в электрической системе с синхронными генераторами двухосного возбуждения при несимметричных режимах. - Республика илмий техник анжумани. Фарғона.: 2016, с 182-184.

19. Хамзаев А.А., Тошева Ш.Н., Тошев Ш.Э. Анализ магнитного поля в воздушном зазоре неявнополюсного синхронного генератора двухосного возбуждения при несимметричных коротких замыканиях. - Молодой исследователь: вызовы и перспективы: сб.ст. по материалам CLXXXIX Международной научно-практической конференции «Молодой исследователь: вызовы и перспективы».-№42(189).-М., Изд. «Интернаука», 2020.

Автореферат «ТошДТУ хабарлари» илмий журнал таҳририятида  
таҳрирдан ўтказилди

Бичими 84x60 1/16. «Times New Roman» гарнитураси рақамли босма усулда босилди.  
Шартли босма табағи 2,75. Адади 100. Буюртма № 4.