

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

БЕРДАҚ НОМИДАГИ ҚОРАҚАЛПОҚ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

СЕИТМУРАТОВ БАЙРАМБАЙ ТУРГАНБАЕВИЧ

**ҚИСҚА ТУТАШГАН РОТОРЛИ АСИНХРОН ГЕНЕРАТОР
РЕЖИМЛАРИНИ ТАДҚИҚ ҚИЛИШ**

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

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

Тошкент – 2024

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

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

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

Сеитмуратов Байрамбай Турганбаевич

Қисқа туташган роторли асинхрон генератор режимларини тадқиқ қилиш..... 3

Сеитмуратов Байрамбай Турганбаевич

Исследование режимов асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором..... 27

Seitmuratov Bayrambay Turganbaevich

Study of the modes of an asynchronous generator with a squirrel-cage rotor 51

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ 55
List of published works

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

БЕРДАҚ НОМИДАГИ ҚОРАҚАЛПОҚ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

СЕИТМУРАТОВ БАЙРАМБАЙ ТУРГАНБАЕВИЧ

**ҚИСҚА ТУТАШГАН РОТОРЛИ АСИНХРОН ГЕНЕРАТОР
РЕЖИМЛАРИНИ ТАДҚИҚ ҚИЛИШ**

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

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

Тошкент – 2024

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг мавзуси Ўзбекистон Республикаси Олий таълим, фан ва инновациялар вазирлиги ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2021.1.PhD/T2108 рақами билан рўйхатга олинган.

Бердақ номидаги Қорақалпоқ давлат университетида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:

Бобожонов Юнус Матризаевич

техника фанлари номзоди, доцент

Расмий оппонентлар:

Бобожанов Махсуд Қаландарович

техника фанлари доктори, профессор

Мирзаев Абдурашид Тухтасинович

техника фанлари номзоди, доцент

Етакчи ташкилот:

Тошкент давлат транспорт университети

Диссертация ҳимояси Ислоом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университети ҳузуридаги DSc.03/10.12.2019.T.03.03 рақамли илмий кенгашнинг 2024 йил “___” _____ соат ___ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Университет кўчаси, 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@edu.uz).

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

Диссертация автореферати 2024 йил “___” _____ куни тарқатилди.
(2024 йил “___” _____ даги ___ рақамли реестр баённомаси).

К.Р.Аллаев

Илмий даражалар берувчи

илмий кенгаш раиси,

техника фанлари доктори, профессор, академик

И.У.Рахмонов

Илмий даражалар берувчи

илмий кенгаш илмий котиби,

техника фанлари доктори, профессор

Т.Ш.Гайибов

Илмий даражалар берувчи илмий

кенгаш қошидаги илмий семинар раиси,

техника фанлари доктори, профессор

КИРИШ (докторлик (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда мавжуд энергия ресурсларини тежаш, қайта тикланувчи энергия (ҚТЭ) манбаларидан оқилона фойдаланиш ва янгидан-янги муқобил энергия манбаларини ишлаб чиқиш масалаларига алоҳида аҳамият берилмоқда. Ҳозирги кунда ривожланган мамлакатлар бўйича, «2020 йил учун самарадорликнинг муҳим кўрсаткичлари шарҳида ҚТЭ манбаларининг энг катта улушлари Швецияга - энергия истеъмолининг 60,1%, Финляндияга - 43,8% ва Латвияга - 42,1% тўғри келиши ҳақида маълумотлар келтирилган. Ушбу мамлакатларнинг асосий энергия ишлаб чиқариш манбалари ГЭС ва ШЭСлар, шунингдек, биомассани қайта ишлаш манбалари ҳисобланади»¹. Бу борада, жумладан автоном тизимларнинг қувват манбалари конструкциясининг соддалиги, техник хизмат кўрсатишнинг қулайлиги, нисбатан кичик масса (кВА/кг) ва ҳажмга эга бўлиши, ҳамда чиқиш ҳолат параметрларининг барқарорлиги каби талабларни оширишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳоннинг ривожланаётган давлатларида, автоном электр таъминоти тизимларидан фойдаланиш бўйича ҳозиргача ўтказилган илмий тадқиқотлар ва амалда қўллаш билан боғлиқ лойиҳалар кўпроқ фаза роторли асинхрон генератор (АГ) ларга қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, жумладан, истеъмолчилар электр таъминотининг ишончлилиги –айниқса электр манбаи қурилмаси бўйича тадқиқотлар устувор ҳисобланмоқда. Шу билан бирга, истеъмолчиларнинг электр энергиясига бўлган эҳтиёжини қаноатлантиришнинг муҳим омили ноанъанавий усуллар билан электр энергия ишлаб чиқарилишига қаратилган илмий тадқиқотлар етакчи ўринни эгалламоқда, мазкур давлатларда ҚТЭ манбаларининг улуши - умумий электр энергия ҳажмининг 30-40% ни ташкил этса, бу кўрсаткич республикамизда 10-12% эканлиги инобатга олиниб, 2030 йилгача ҚТЭ манбаларини кенг татбиқ қилиниши ҳисобига 40% гача ошириш бўйича тадқиқотлар ўтказилиши долзарб вазифалардан ҳисобланмоқда.

Республикамизда иқтисодиёт тармоқлари кесимида энергия сиғимдорлигини 2030 йилга қадар бир ярим баробарга камайтириш мақсадида янги технологик ечимларни яратиш ва такомиллаштириш ҳамда жорий этишга доир кенг кўламли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. 2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегиясида, жумладан ««Яшил иқтисодиёт» технологияларини барча соҳаларга фаол жорий этиш орқали 2026 йилга қадар иқтисодиётнинг энергия самарадорлигини 20 фоизга ошириш ва ҳавога чиқариладиган зарарли газлар ҳажмини 20 фоизга қисқартириш»² бўйича вазифалар белгиланган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда, хусусан, сўнгги даврларда кичик қувватли

¹ <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tendentsii-razvitiya-zelenoy-energetiki>

² Ўзбекистон Республикаси Президентининг “2022 — 2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида” 2022 йил 28 январдаги ПФ – 60 сонли фармони.

қайта тикланувчан энергия манбаларини татбиқ этиш тобора долзарб аҳамиятга эга бўлмоқда, айниқса гидравлик ва шамол турбиналари ёрдамида ҳаракатга келтирилувчи кичик қувватли автоном генераторлардан иборат станциялар шулар жумласидандир. Ушбу станцияларда ўрнатилган генераторлар: синхрон генератор (СГ) лар, асинхрон генератор (АГ) лар, ўзгармас ток генераторлари ва бошқалар бўлиши мумкин. Ўтказилган тадқиқотлардан, электр энергия манбаи сифатида АГ ларнинг юқори энергетик кўрсаткичларга эгаллиги, динамик ва статик хусусиятларининг устунлиги, юқори ишончлилиги, тузилишининг оддийлиги ва нархининг арзонлиги каби асосий параметрларини инобатга олиб, АГ ни хар қандай турдаги бирламчи двигателлар ёрдамида ҳаракатга келтириладиган - чексиз қувватли энергетик тизимлардаги каби автоном станцияларда ҳам қўлланилиши - долзарб масалаларни ечишга қаратилган илмий-тадқиқот ишларини олиб бориш муҳим ҳисобланади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги «2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида» ги ПФ-60-сонли Фармони, 2022 йил 9 сентябрдаги “Энергия тежовчи технологияларни жорий қилиш ва кичик қувватли қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида”ги ПФ-220-сонли фармони ва Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2023 йил 16 февралдаги “2023 йилда қайта тикланувчи энергия манбаларини ва энергия тежовчи технологияларни жорий этишни жадаллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида” ги ПҚ-57-сонли қарорларида ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти натижалари муайян даражада хизмат қилади.

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

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. ҚТЭ манбаларини электр энергия ишлаб чиқаришга кенг татбиқ қилиш - ҳозирги даврнинг энг долзарб масалаларидан бири эканлиги ҳисобга олиниб, Германиянинг «Inter Gora» ва «Geonet» компаниялари томонидан республика ҳудудларидаги шамолга оид параметрлар ўлчаб кўрилганда, Ўзбекистоннинг шамол энергетик потенциали 512 ГВт дан юқори эканлиги республикада минглаб шамол электр станцияларни куриш имконини беради. Худди шундай, Германиянинг «Fichtner» компанияси ўтказган тадқиқотлар натижаларига кўра, Ўзбекистон тоғ олди кичик дарёларининг гидроэнергетик потенциали 4 ГВт дан юқорилиги, электр энергия истеъмолчиларининг йилдан-йилга ортиб бораётган эҳтиёжларини ҚТЭ манбаларини кенг татбиқ қилиниши ҳисобига таъминлаш ва энерготизимдаги энергия танқислигини узил-кесил бартараф қилинишига қаратилган.

XX аср бошларидан қисқа туташган роторли АГ ларни тадқиқ қилиш каби масалаларни ҳал қилишда бир қатор таниқли хорижий олимлар катта ҳисса қўшганлар, жумладан: И.М.Постников, М.А.Тагиров, Ю.Г.Толстов, А.А.Иванов, А.В.Иванов–Смоленский, А.И. Важнов, Л.Г.Мамиконянц, М.П.Костенко, В.Г.Китушин, Н.И.Соколов, Ю.Г Шакарян., А.Klimann (А.Климанн), Р.Richardson (П.Ричардсон), De Mello (Де Мелло), L.N.Hannett (Л.Н.Ханнетт), J.M.Elder (Ж.М.Элдер), J.T.Bous (Ж.Т.Боус), J.L.Woodward (Ж.Л.Вудвард), M.P.Rapin (М.П.Рапин), R.Bonert (Р.Бонерт), G Hoops (Г.Хоопс) ва бошқалар.

Чексиз қувватли тизимга параллел ишлаётган массив роторли АГ ва СГ ларнинг станция статик ва динамик турғунликларини ошириш каби илмий муаммоларни ҳал этилишида Ўзбекистоннинг таниқли олимларини илмий ишлари бағишланган. Булардан: Тошкент давлат техника университети академиклари Х.Ф.Фазылов, К.Р.Аллаев раҳбарлигида массив ротори турли конструкцияга эга бўлган АГ лар техник параметрларини уларнинг энергетик кўрсаткичларига ва ишчи характеристикаларига таъсирини аниқлаш бўйича назарий ва экспериментал тадқиқотлар ўтказиладиган илмий мактаб яратилган бўлиб, унда П.П.Зимаков, С.Ж.Хайдаров, К.Х. Қурбаниязов, Н.Б. Пирматов, А.Ф. Ан, Ю.М.Бобожонов, Ю.М.Клименко, А.Т.Мирзаев. Олиб борилган илмий тадқиқотлар натижасида чексиз қувватли тизимга параллел ишлаётган станцияга массив роторли АГ ларни тадқиқ қилиниши ҳисобига станция турғунликларини ошириш масалаларини ечишда салмоқли натижаларга эришилди.

Сезиларли муваффақиятларга қарамай, қисқа туташган анъанавий роторли АГ ларнинг номинал, максимал ва турли характердаги юкламаларида чиқиш кучланиши ва частота ўзгаришлари билан боғлиқ илмий муаммолар етарли даражада ўрганилмаган. Мазкур диссертация ишида автоном режимда ишлаётган АГ юкламасининг турли қийматларида чиқиш кучланишини ўзгармаслигини таъминланишини - конденсаторлар сиғимини автоматик ростлаш қурилмасини тадқиқ қилиш ҳисобига такомиллаштирилиши тақлиф этилган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Қорақалпоқ давлат университетининг илмий-тадқиқот ишлари режасининг “Электр энергетика тизимларини моделлаштириш, барқарорлашган ҳолатларини таҳлил қилиш ва оптимал бошқаришнинг замонавий усул ва алгоритмларини ишлаб чиқиш” ҳамда Тошкент давлат техника университетининг амалий лойиҳалари илмий-тадқиқот ишлари режаси доирасида амалга оширилди: А-3-96-сонли “Ўзбекистон Республикаси энерготизими электр истеъмолчилари юкламаларини оптимал бошқариш” мавзусидаги амалий лойиҳаси (2015-2017) доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади. Қисқа туташган роторли асинхрон генераторнинг иш режимларини тадқиқ қилиш ва чиқиш кучланиш бошқарув

тизимини такомиллаштириш.

Тадқиқотнинг вазифалари:

АГ параметрларини ростлаш схемасига ўзгарувчан сиғимли конденсатордан иборат шахобчани киритиш ҳисобига такомиллаштириш;

автоном режимдаги ва станцияда СГ билан АГ параллел ишлаётган режимдаги ҳолат параметрларининг ўзгаришларини юклама қиймати ва конденсатор сиғимиغا боғлиқлигини тадқиқ қилиш учун имитацион модел ишлаб чиқиш;

автоном режимда ишлаётган АГ юкламасининг турли қийматларида чиқиш кучланишини стабиллигини таъминловчи конденсаторлар сиғимини автоматик ростлаш қурилмасини тадбиқ қилиш ҳисобига такомиллаштириш;

АГ дан иборат тажриба-синов стендида кучланиш ва частота ўзгаришларини юклама миқдори ва характериға боғлиқлигини тажриба асосида аниқлаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида автоном ва чексиз қувватли тизимга СГ билан параллел ишлаётган АГ олинган.

Тадқиқотнинг предмети таркибида чексиз қувватли тизимга ишлаётган АГ нинг математик модели, Матлаб дастуридаги имитацион модели ва тажриба модели ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида белгиланган вазифаларни ҳал қилиш учун Парк-Горев тенгламалари ва тажриба – синов стенди ва имитацион модел асосида электр энергетикаси тизимларининг барқарорлашган ва ўткинчи режимлари таҳлил қилиш усуллардан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

асинхрон генераторнинг автоном ва синхрон генератор билан параллел ишлаш режимларида, станция шинасига уланадиган ҳар қандай юкламаларга мос конденсатор улаш асосида шина кучланиши барқарорлигини таъминлаш усули ишлаб чиқилган;

ўзгарувчан сиғимли конденсатор шахобча киритилиши асосида асинхрон генераторнинг алмаштириш схемаси такомиллаштирилиб, ўзгарувчан юкламаларда чиқиш кучланиши барқарорлигини таъминланишни таҳлил қилиш имконияти яратилган;

микропроцессор асосидаги реактив қувватни автоматик ростлаш қурилмасининг кучланиш каналидан фойдаланиш асосида асинхрон генераторнинг ўзгарувчан юкламаларида кучланишни номинал қийматларда ушлаб турилиши асосланган;

микропроцессорли автоматик ростлаш қурилмасини ишлаб чиқиш асосида асинхрон генераторнинг ҳар қандай характерли юкламасида чиқиш кучланишининг ўзгаришсиз қолиши 70% юкламагача чиқиш частотаси бўйича барқарорлиги асосланган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси қуйидагилардан иборат:

асинхрон турбогенераторлардан иборат электр тизимнинг амплитуда–частотавий характеристикасини аниқлаш алгоритми ва ЭХМ учун дастурий

маҳсулот ишлаб чиқилган;

электр станциясидаги СГ ва АГ ларнинг параллел иш режимларини ҳисоблаш модели ва ЭХМ учун дастурий маҳсулот ишлаб чиқилган;

автоном режимда ишловчи қисқа туташган роторли АГ реактив қувват истеъмолини автоматик ростлаш учун параметрларни ҳисоблаш усули ва ЭХМ учун дастурий маҳсулот ишлаб чиқилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги иммитацион усулда олинган натижаларнинг тажриба усулида аниқланган амалий натижалар билан тасдиқланганлиги, яъни тадқиқот натижаларининг ўзаро мутаносиблиги, тажриба тадқиқотларининг замонавий услуб ва воситалар ёрдамида жорий қилинганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти чексиз қувватли тизимга параллел ишлаётган, қисқа туташган роторли АГ ва СГ дан иборат электроэнергетика тизимларнинг математик ва имитацион моделлари асосида ҳолат параметрлари ўзгаришларини тизим конструктив параметрларига ва юклама миқдорига боғлиқлигини таҳлил қилиш имконияти, ҳамда автоном режимда ишлашга мўлжалланган АГ чиқиш кучланишини ростлаш қурилмасининг ишлаш принципи генераторнинг такомиллаштирилган алмаштириш схемасига мувофиқлиги назарий жиҳатдан асосланганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти таклиф этилган, қуввати 4 кВт бўлган, сувнинг механик энергияси ҳисобига ҳаракатланувчи қисқа туташган роторли АГ дан ва реактив қувватни автоматик ростлаш қурилмасидан иборат микропроцессорли қурилма «Худудий электр тармоқлари» АЖ Хоразм филиалига татбиқ қилинганида АГ юкламасининг миқдор ва характер жиҳатидан ўзгарганида ҳам АГ чиқиш кучланишининг ўзгармасдан қолиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Қисқа туташган роторли асинхрон генератор режимларини тадқиқ қилишнинг тажриба, математик моделлари ва алгоритмларини ишлаб чиқиш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

микропроцессор асосидаги реактив қувватни автоматик ростлаш қурилмасининг кучланиш каналидан фойдаланиб сувнинг механик энергияси ҳисобига ҳаракатланувчи, қуввати 4 кВт бўлган қисқа туташган роторли асинхрон генератордан ташкил топган қурилма «Худудий электр тармоқлари» АЖ Хоразм филиалига жорий қилинган (“Худудий электр тармоқлари” АЖ нинг 26.08.2023 йилдаги №01-21 04/1414-сонли маълумотномаси). Натижада, микро ГЭСдаги синхрон генератор ўрнига асинхрон генераторни қўллаш ҳисобига йил давомида иқтисодий самарадорликни 2,4 бараварга ошириш имконияти яратилган;

микропроцессорли автоматик ростлаш қурилмасини ишлаб чиқиш асосида асинхрон генераторнинг ҳар қандай характерли юкламасида чиқиш

кучланишининг ўзгаришсиз қолиши таъминлайдиган, қисқа туташган роторли асинхрон генератордан иборат қурилма вилоят ҳудудидан ўтган канал, сой ва ирмоқларга яқин жойлашган жами 5 та истеъмолчида намунавий лойиҳа-смета ҳужжатлари асосида жорий этилган (“Ҳудудий электр тармоқлари” АЖ нинг 26.08.2023 йилдаги №01-21 04/1414-сонли маълумотномаси). Натижада қисқа туташган роторли асинхрон генераторни тадбиқ қилиниши ҳисобига йиллик иқтисодий самарадорлик 155 520 000 (бир юз эллик беш миллион беш юз йигирма минг) сўмни ташкил этган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 5 та халқаро ва 3 та республика илмий-техник ва илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 20 та илмий иш чоп этилган бўлиб, шулардан, 1 та монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фалсафа доктори (PhD) диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий нашрларда 5 та мақолалар, жумладан 4 та республика ва 1 та чет эл илмий журналларида ҳамда 3 та Scopus базасига кирувчи тўпламларда нашр этилган, 3 та ЭҲМ учун дастурга гувоҳнома олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби: кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 119 бетни ташкил этади.

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 ишончилиги ёритилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий этилганлиги, ишнинг апробация натижалари, эълон қилинган ишлар ва диссертациянинг тузилиши ва ҳажми бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг «**Ҳозирги даврда асинхрон генераторлардан фойдаланиш имкониятлари ва истиқболлари**» деб номланган биринчи бобида электр энергетика тизимларида фойдаланиладиган генераторларни ўзаро таққослаш, асинхрон машинани генератор сифатида ишлаш хусусиятлари, АГ ни ўз-ўзидан қўзғатилиши, АГдан иборат станциянинг математик модели, қисқа туташган роторли АГ ҳолат параметрлари ўзгаришларини унинг алмаштириш схемаси асосидаги таҳлили келтирилган.

АГ ҳолат параметрларининг ташқи турткиларга нисбатан боғланишини акс эттирадиган электромагнит ва электромеханик моментларининг ночизигий ҳаракат тенгламасидан иборат Парк -Горев тенгламалар системаси қуйидаги кўринишга эга:

$$U_d = \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \omega_k - i_d r_s \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
U_q &= \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \omega_K - i_q r_s \\
U_0 &= \frac{d\Psi_0}{dt} + i_0 r_s \\
0 &= \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - (S_K - S_A) \Psi_{qr} + i_{dr} r_r \\
0 &= \frac{d\Psi_{qr}}{dt} - (S_K - S_A) \Psi_{dr} + i_{qr} r_r \\
\frac{T_j dS_A}{dt} &= M_T - M_A \\
\Psi_d &= x_m i_{rd} - x_s i_d \\
\Psi_q &= x_m i_{rq} - x_s i_q \\
\Psi_0 &= L_0 i_0 \\
\Psi_{rd1} &= x_{1d} i_{r1d} + x_m (i_{r1d} - i_d) \\
\Psi_{rq1} &= x_{1q} i_{r1q} + x_m (i_{r1q} - i_q)
\end{aligned}$$

Юқоридаги тенгламаларда қуйидагича белгиланишлар киритилган: U_d, U_q, Ψ_d, Ψ_q – АГ статор кучланиши ва оқим илашувчанликларининг бўйлама ва кўндаланг ўқлардаги ташкил этувчилари; r_s, r_r, r_{r1} – генератор статори, ротори ва демпфер чулғами актив қаршиликлари;

X_{1d}, X_{1q}, X_m – демпфер чулғами индуктив қаршилигининг бўйлама ва кўндаланг ўқлардаги ташкил этувчилари ва ўзаро индуктив қаршилиги;

$i_d, i_q, i_{dr}, i_{qr}, i_{r1d}, i_{r1q}$ – генератор статори, ротори ва демпфер чулғамлари тоқларининг бўйлама ва кўндаланг ташкил этувчилари;

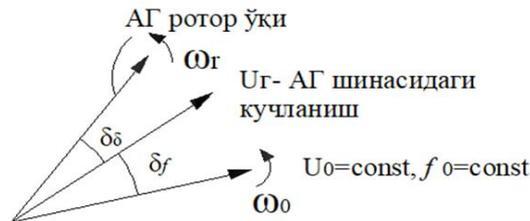
АГ электромагнит моменти: $M_A = X_m [i_q i_{dr} - i_d i_{qr}] (1 + S_K)$;

M_T – бирламчи двигател (трубина) айлантурувчи моменти;

$S_A = \frac{\omega_r - \omega_0}{\omega_0}$ – АГ сирпаниши; $\omega_r = \omega_0 (1 + S_A)$ – ротор айланиш тезлиги; ω_0 – синхрон тезлик; S_K – координата ўқларига нисбатдан сирпаниш.

Тизимдаги кичик туртки сабабли АГ нинг қуввати ва сирпанишида кичик ўзгариш содир этади: $P_A = P_{A0} \pm \Delta P, S_A = S_{A0} \pm \Delta S$.

АГ нинг сирпаниши иккита ташкил этувчидан: шинадаги кучланишнинг ўзгариши билан боғлиқ сирпаниш ва бирламчи двигател айланиш тезлигига боғлиқ сирпанишдан иборат. $S_A = S_{Af} + S_{AT}$; бошқача кўринишдаги ифодаси: $\delta_{\Delta A} = \delta_f + \delta_r$.



1–расм. АГ даги сирпанишлар

Келтирилган ночизиғий тенгламалар системасини чизиқлантириш учун Тейлор қатори бўйича ёйиб кичик тебранишлар учун, битта генератордан иборат автоном ишлаш тизимининг қуйидаги характеристик тенгламаси ҳосил қилинди.

$$\lambda^3 + (-C_1 - P_1 - D_2)\lambda^2 + (P_1 C_1 + C_1 D_2 + P_1 D_2 - C_2 D_1)\lambda + (C_2 P_1 D_1 - C_1 P_1 D_1) = 0.$$

бунда:

$$P_1 = j\omega - \frac{EU}{\omega x_1} \sin\delta; \quad C_1 = \frac{EU}{x_1} \cos\delta; \quad C_2 = \frac{EU}{x_1} \sin\delta;$$

$$D_1 = \frac{U^2}{R_{\text{Ю}}}; \quad D_2 = U^2 \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_{\text{Ю}}} + \frac{1}{x_{\text{К.С}}} + \frac{1}{x_{\text{С}}} \right);$$

j – бурчак частотасига келтирилган инерция доимийси ω ;

E, U – Э.Ю.К ва генератор кучланиши; x_1 – АГ ning индуктив қаршилиги;

δ – генераторнинг ички бурчаги (кучланиш ва Э.Ю.К векторлари орасидаги бурчак); $x_{\text{Ю}}, x_{\text{К.С}}, x_{\text{С}}$ – мос равишда юкламанинг индуктив қаршилиги, кўзғатиш ва ўзгарувчанконденсатор сиғими қаршилиги.

Гурвиц мезони бўйича станциянинг турғунлиги қуйидаги шарт бўйича аниқланади: $a_1 = (-C_1 - P_1 - D_2) > 0$;

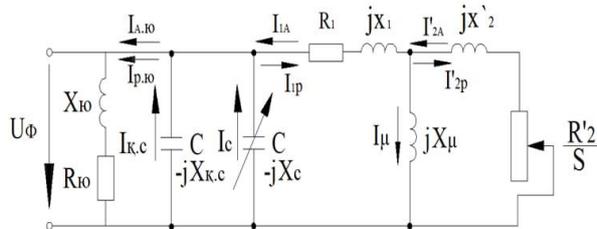
$$a_1 a_2 - a_0 a_3 = C_1 P_1 D_1 + (C_1 + P_1)(D_1 D_2 + C_1 P_1 + C_2 D_1) - C_2 D_1^2 + D_2(C_1 + P_1)^2 + P_1(C_2 D_1 - C_1 D_2) < 0. \quad (2)$$

$C_2 P_1 D_1 - C_1 P_1 D_2 = 0$ шартидан турғунлик захираси:

$$D_2 = U^2 \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_{\text{Ю}}} + \frac{1}{x_{\text{К.С}}} + \frac{1}{x_{\text{С}}} \right) \quad (3)$$

Бунда: $\text{tg}\delta = \frac{R_{\text{Ю}}}{X} = R_{\text{Ю}} \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_{\text{Ю}}} + \frac{1}{x_{\text{К.С}}} + \frac{1}{x_{\text{С}}} \right)$ бўлиб, турғунликни ошириш

учун сиғимий қаршиликни камайтириш лозимлиги маълум бўлади. Сиғимий қаршиликнинг қиймати - АГ параметрлари ва юклама миқдорлари асосида аниқланади. Тенгламалар ечимидан аниқланган, турғунликни таъминлаш чоралари 2–расмда келтирилган АГ ning “Т” шаклидаги эквивалент алмаштириш схемаси асосидаги таҳлилга мос келади.



2–расм. АГ ning “Т” шаклидаги эквивалент алмаштириш схемаси

Алмаштириш схемаси қуйидаги шахобчалардан иборат:

1. X_{μ} дан иборат магнитланиш шахобчасининг реактив ўтказувчанлиги $1/X_{\mu}=b_0$;

2. R'_2/S –актив қаршиликдан иборат бош шахобча реактив ўтказувчанлиги $1/X'_2=b'_2$;

3. Ўзгарувчан сиғимли

конденсатордан иборат шахобча реактив ўтказувчанлиги $1/X_{\text{С}}=b_{\text{С}}$;

4. Ўзгармас сиғимли конденсатордан иборат кўзғатиш шахобчаси реактив ўтказувчанлиги $1/X_{\text{К.С}}=b_{\text{К.С}}$;

5. Аралаш юклама иборат шахобчанинг реактив ўтказувчанлиги $1/X_{\text{Ю}}=b_{\text{Ю}}$;

Бунда: $I_{1А}$ – АГ токининг актив ташкил этувчиси.

$I_{\text{Р}}$ – АГ токининг реактив ташкил этувчиси.

$I'_{2А}$ – АГ ротор токининг актив ташкил этувчиси.

$I'_{2Р}$ – АГ ротор токининг реактив ташкил этувчиси.

$I_{\text{А.Ю}}$ – АГ юклама актив токи.

$I_{\text{К.С}}$ – конденсатор кўзғатиш токи.

I_μ – АГ магнитловчи шохобча реактив токи.

АГ юкламаси ўзгарган ҳолатларида унинг дастлабки номинал параметрларини бирламчи двигател айланиш частотасини ростлаш билан ёки АГ магнит оқимини конденсатор батареялари ёрдамида бошқарилиши ҳисобига барқарорлигини таъминлаш мумкин.

АГ чиқиш кучланиши алмаштириш схемасидаги магнитланиш шаҳобчасининг реактив токи I_μ га боғлиқ, бунда;

$$I_\mu = I_K - I_2 \sin \alpha - I \sin \varphi \quad (4)$$

$I_K = U_1 \omega_1 C$ – конденсатор токи.

АГ чиқиш частотаси:

$$f = \frac{E}{ce\Phi} = \frac{E}{ce(I_\mu)}; \quad (5)$$

Бунда; E -статор фазасида ҳосил бўлувчи Э.Ю.К.

Φ - Э.Ю.К E ни ҳосил қилувчи асосий магнит оқими.

Юқоридагилардан, юклама ўзгарганида АГ нинг чиқиш кучланиши ва частотасининг ўзгармасдан қолиши – унга уланган конденсатор сифимини автоматик равишда ростлаш орқали асосий оқим Φ нинг ўзгармаслиги таъминланиши ҳисобига содир бўлганлиги маълум бўлади.

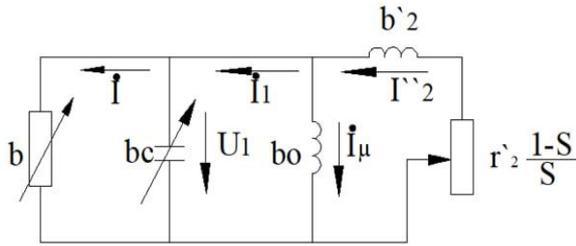
Сўнгги йилларда ўтказилаётган тадқиқотлар, АМ дан генератор сифатида кенг фойдаланиш, жумладан 0,4 кВ ли 3 фазали истеъмолчиларни электр энергия билан таъминлашда ҳам муҳим аҳамиятга эга эканлигини кўрсатмоқда. АГ ларнинг, реактив қувват манбаи мавжуд бўлган ҳар қандай шароитларда актив қувват ишлаб чиқариш қобилиятига эга.

Кенг миқёсда ўтказилаётган тадқиқотлардан, АГ ларнинг чексиз қувватли энерготизим билан параллел режимда ёки автоном режимда ишлаш мумкинлиги исботланган, жумладан, АГ ларнинг энг катта юкламали даврлар генератори сифатида, кучланиш ва частотани ростлаш тизимисиз ишлатиш мумкинлиги сабабли уларни хизмат кўрсатувчи ходимга эга бўлмаган кичик электростанцияларда, жумладан шамол электр станцияси ва гидро электр станцияси генератори сифатида ҳам қўллаш имкониятлари тасдиқланган.

Автоном электр таъминоти тизимларида конденсатор ёрдамида қўзғатилувчи АГ ни қўллашда талаб этиладиган муҳим шартлар: турли хил юкламаларда кучланиш ва частотани барқарорлигини таъминлаш ҳисобланади.

Белгиланган шартларни ҳал этиш, бир томондан, электр энергияси сифатини яхшилаш зарурати, иккинчи томондан, барқарорлик нуқтаи назаридан келиб чиқади. АГ да барқарорликни таъминланиши магнитланиш характеристикасининг чизиқли қисмидаги ишчи нуқтасига мос келади.

АГ юкламаси ўзгарган ҳолатларида чиқиш кучланиши ўзгаришининг сабаблари 3–расмда келтирилган, АГ нинг эквивалент алмаштириш схемаси асосида шохобчалар реактив ўтказувчанликларидан фойдаланиб таҳлил қилинди.



3-расм. АГ нинг “Г” шаклидаги содалаштирилган эквивалент алмаштириш схемаси

Шахобчалар токлари вектор тенгнамаси қуйидагича:

$$I_1 = I_\mu + (-I_2'') \quad (6)$$

бу ерда: I_{00} – салт ишлаш ҳолатидаги генератор токи.

Пулатдаги йўқотишлар кичик миқдорларни ташкил этганлиги учун ҳисобга олинмаган.

АГ нинг чиқишида ҳосил бўладиган кучланиш миқдори –

тизимининг реактив ўтказувчанликлари балансига боғлиқ.

1. Агар АГ юкламаси актив характерга эга бўлса, у ҳолда магнитловчи шахобча реактив ўтказувчанлиги b_0 , бош шахобча ўтказувчанлиги b'_2 ва конденсатордан иборат шахобча ўтказувчанлиги b_c қуйидаги боғланиш билан ифодаланади:

$$b_0 + b'_2 - b_c - b_{к.с} = 0 \quad (7)$$

Бундан, магнитловчи шахобчанинг реактив ўтказувчанлиги b_0 ва бош шахобча ўтказувчанлиги b'_2 , реактив қувват манбаи ҳисобланган конденсатордан иборат шахобча ўтказувчанлиги b_c билан қопланади, яъни b_0 ва b'_2 ўтказувчанликлар доим b_c ва $b_{к.с}$ билан мувозанатда бўлишлиги маълум бўлади. Юқоридаги муносабатни тармоқлар реактив тоқлар орқали ифодаси:

$$I_\mu = I_K - I_2'' \sin \alpha$$

Алмаштириш схемасидан:

$$\left\{ \begin{array}{l} b_0 \approx \frac{1}{X_1} \\ b'_2 = \left(\frac{I_2''}{U_1} \right)^2 \times \operatorname{Im} \left(\frac{U_1}{I_2''} \right) = \left(\frac{I_2''}{U_1} \right) \cdot \left(\frac{I_2''}{U_1} \right) \cdot \operatorname{Im} \left(\frac{U_1}{I_2''} \right) = \left(\frac{I_2''}{U_1} \right) \cdot \left(\frac{\operatorname{Im} \left(\frac{U_1}{I_2''} \right)}{\left(\frac{U_1}{I_2''} \right)} \right) = \left(\frac{I_2''}{U_1} \right) \cdot \sin \alpha \\ b_c = \omega_1 \cdot C \end{array} \right. \quad (8)$$

(8) ни қуйидагича ифодалаймиз $b_0 = b_c - b'_2 \equiv U_1$ яъни:

$$\frac{I_\mu}{U_1} = \omega_1 \cdot C - \frac{I_2''}{U_1} \sin \alpha \equiv U_1 \quad (9)$$

Бунда: кучланиш U_1 ва ток I_2 орасидаги фаза силжиш бурчаги:

$$\alpha = \arctg \frac{\operatorname{Im} \frac{U_1}{I_2}}{\operatorname{Re} \frac{U_1}{I_2}} \quad (10)$$

Генератор кучланиши – магнитланиш шахобчасининг реактив ўтказувчанлиги b_0 га боғлиқ бўлиб, $C = \text{const}$ бўлганда, b_0 генератор юкламасига боғлиқ бўлади. Юкламанинг ўзгариши магнитланиш шахобчаси реактив ўтказувчанлигининг тескари ўзгаришини келтириб чиқаради.

Шундай қилиб, юкламанинг ошиши билан асосий шахобчанинг реактив ўтказувчанлиги ошади, магнитланиш шахобчасининг ўтказувчанлиги ва генератор учларидаги кучланиш эса камаяди, аксинча генератор юкламасининг камайиши тескари натижага олиб келади. Салт ишлаганда

$I_2=0$ бўлиб, магнитланиш шахобчасининг реактив ўтказувчанлиги энг катта қийматга эришади, натижада: $b_0=b_c$, яъни:

$$\frac{I_\mu}{U_1} = \omega_1 C \quad (11)$$

Умумий ҳолда реактив ўтказувчанликлар баланси қуйидаги тенглама билан ифодаланади:

$$\sum_{k=1}^n b_k = 0 \quad (12)$$

Ушбу муносабатдан тармоқлар реактив тоқлари баланси тенгламаси:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

Юқоридагидан, асинхрон генератор – юкламадан иборат тизимнинг реактив ўтказувчанликларининг алгебраик йиғиндиси нолга тенг.

2. Агар АГ юкламаси аралаш характерга эга бўлса, у ҳолда:

$$b_0 + b_2 - b_c - b_{к,c} \pm b = 0 \quad (13)$$

бунда: b – юкламанинг реактив ўтказувчанлиги бўлиб, индуктив ($b > 0$) ёки сиғимий ($b < 0$) характерга эга бўлиши мумкин.

Агар юклама актив–индуктив характерга эга бўлса, юкламанинг реактив ўтказувчанлиги:

$$b = \frac{I_L}{U_1} \quad (14)$$

бунда: $I_L = I \sin \varphi$ – юклама тоқининг реактив ташкил этувчиси. У ҳолда реактив ўтказувчанликлар баланси тенгламаси қуйидаги шаклга эга бўлади:

$$b_0 + b_2 - b_c - b_{к,c} + b = 0 \quad (15)$$

бундан: $b_0 = b_c - b_2 - b$, яъни:

$$\frac{I_\mu}{U_1} = \omega_1 C - \frac{I_2}{U_1} \sin \alpha - \frac{I}{U_1} \sin \varphi \quad (16)$$

Генератор учларидаги кучланиш миқдори – магнитланиш шахобчасининг реактив ўтказувчанлиги b_0 га бевосита боғлиқ бўлиб, сиғимнинг ўзгармас ($C = const$) қийматида юкламанинг ўзгариши b_0 ни ўзгаришини, бу еса кучланиш ўзгаришини келтириб чиқаради. Хусусан, асосий шахобча ўтказувчанлиги ва юкламанинг ошиши кучланишнинг камайишига, аксинча, уларнинг камайиши эса кучланишнинг ошишига сабабчи бўлади.

Бундан, автоном АГ роторининг ўзгармас айланиш частотасида ва ўзгармас конденсатор сиғимида, статор чулғамида ҳосил бўлувчи ЭЮК E_l нинг қиймати – юклама қийматига ва унинг характерига боғлиқлиги маълум бўлади.

АГ да $f_l = const$ ва $C = const$ бўлганда, унинг юкламасини ошиши – ЭЮК E_l нинг камайишини, шунингдек статордаги кучланиш тушувининг ортишини ҳосил қилганлиги учун АГ учидаги кучланишнинг камайишини келтириб чиқаради.

ЭЮК E_l нинг камайиши – асосий магнит оқимнинг заифлашишидан юзага келади.

Шунингдек роторнинг ўзгармас ($\omega = const$) айланиш частотасида, генератор юкламасининг кўпайиши сирпаниш s ортишини, натижада чиқиш

частотаси f_l нинг камайишини келтириб чиқарганлигидан ЭЮК E_l нинг ҳам бир оз камайиши содир бўлади.

Асосий магнит оқимининг заифлашувига – иккиламчи токнинг магнитсизловчи таъсири, юклама реактив ташкил этувчисининг кўпайиши ва сиғимий токнинг камайиши сабабчи бўлади.

Юқорида келтирилганлардан, роторнинг ўзгармас айланиш частотасида АГ нинг чиқишидаги кучланиш – магнитловчи шахобчанинг ўтказувчанлиги b_0 асосида аниқланганлиги учун, кучланиш ўзгармаслигини таъминлаш куйидаги шартга боғлиқ:

$$b_0 = b_c - b_{к,с} - (b'_2 \pm b) = const \quad (17)$$

Демак, актив–индуктив юклама бўлганда:

$$b_0 = b_c - b_{к,с} - (b'_2 + b) = const \quad (18)$$

актив юклама бўлганда:

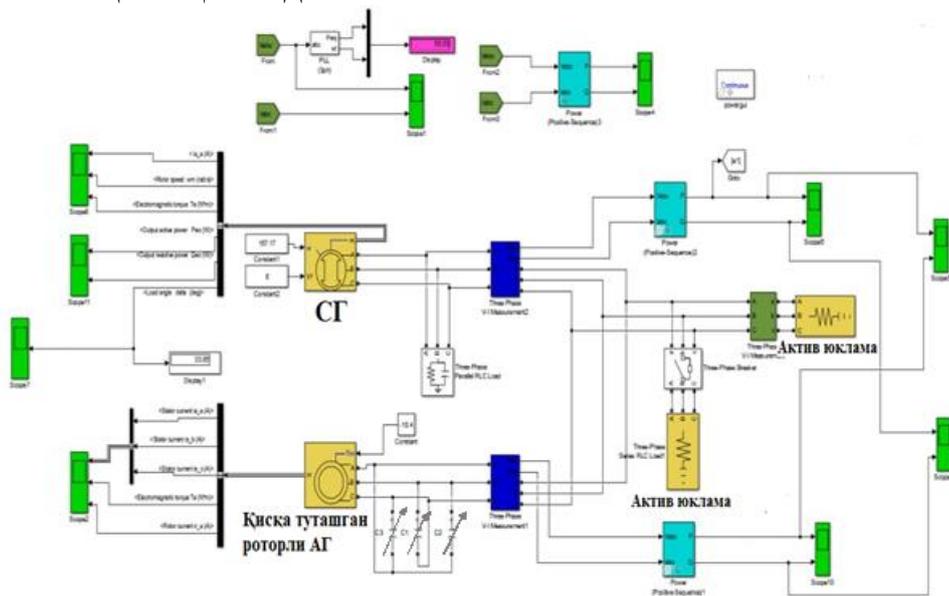
$$b_0 = b_c - b_{к,с} - b'_2 = const \quad (19)$$

Реактив ўтказувчанлик b_c конденсаторларнинг реактив қувватига мос келади, яъни:

$$Q_K = m_1 \omega_1 C U_\phi^2 \quad (20)$$

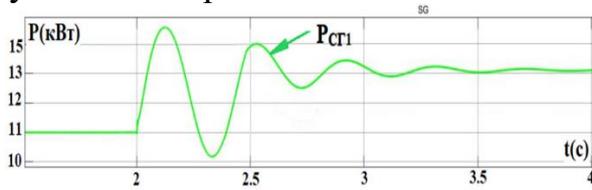
бу ерда C , U_ϕ – конденсаторларнинг сиғими ва фазавий кучланиши. Ушбу ифодадан, АГ ҳар қандай юкламасига мос келувчи зарур реактив қувватни ҳосил қилиш, конденсаторларнинг сиғими C ёки кучланиш U_ϕ ни ростлаш орқали таъминланиши мумкинлигини кўрсатади.

Диссертациянинг «АГ кучланиши ва частота ўзгаришлари юкламага боғлиқлигини имитацион модел асосидаги тадқиқи» дан ташкил топган иккинчи бобида, фақат автоном режимдаги асинхрон генератор имитацион модели, автоном ҳолатда параллел ишлаётган СГ ва АГ нинг имитацион модели, шунингдек турли номинал қувватли АГ лар ротор тоқлари частотасининг актив юкламага боғлиқлигига доир тадқиқот натижалари келтирилди ва таҳлил қилинди.

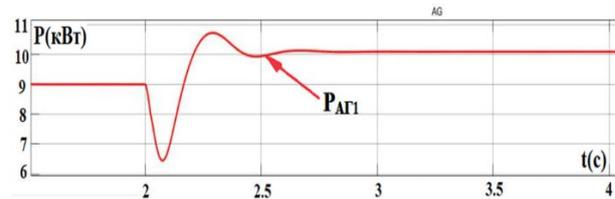


4–расм. Параллел ишлаётган АГ ва СГ дан иборат станциянинг автоном ишлаш ҳолатида, станцияга актив юклама уланган ҳолатининг имитацион модели

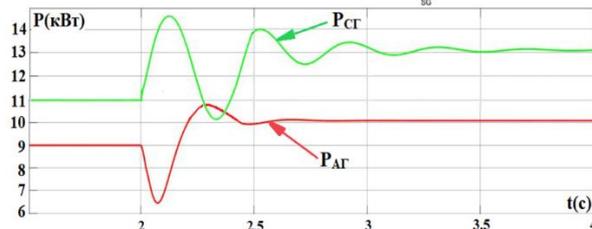
АГ ва СГ дан иборат станцияга актив юклама уланган ҳолатларига мос, чиқувчи ҳолат параметрларининг вақт бўйича ўзгариш осциллограммалари куйида келтирилган:



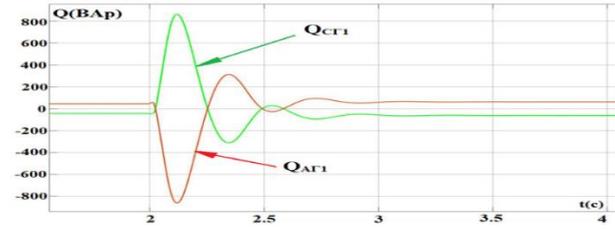
5-расм. СГ чиқишидаги актив қуввати – $P_{CГ}$



6-расм. АГ чиқишидаги актив қуввати – $P_{AГ}$



7-расм. СГ ва АГ нинг чиқишидаги актив қувватлари – $P_{CГ}$, $P_{AГ}$



8-расм. СГ ва АГ нинг чиқишидаги реактив қувватлари – $Q_{CГ}$, $Q_{AГ}$

СГ ва АГ параллел ишлаётган станцияга бирор ташқи туртки таъсир этганда, СГ бурчак характеристикаси $P_{CГ}=(E_q \cdot U) \cdot \sin \delta / X_0$ га асосан СГ роторида чайқалиш пайдо бўлади, натижада $P_{CГ}$ ва $\delta_{Г}$ нинг тебраниши бир томонга ўзгариб, қувватнинг ошиши билан генератор шинасидаги кучланишнинг пасайиши кузатилади. АГ нинг актив қуввати шинадаги кучланиш квадратига пропорционал бўлганлиги учун шинадаги пасайиши АГ узатаётган қувватининг пасайишини келтириб чиқаради. Келтирилган осциллограммаларда СГ ва АГ дан иборат станцияга актив юклама уланган ҳолатига мос ўтиш жараёнларидаги ҳолат параметрларининг тебранишлари тасвирланган бўлиб, тебранишлар 0,2 сек давом этган. АГ ҳолат параметрларини сўндириш билан бир қаторда СГ ротори ва қуввати чайқалишларини камайишини таъминлайди. Шундай қилиб, генератор қувватлари максимумлари қарама – қарши фазаларда ўзгарганлиги ҳисобига ҳолат параметрларининг ўтиш жараёнларидаги тебранишлари асосан станция шинасига етмасдан баргараф этилганлиги учун станцияда параллел ишлаётган СГ ва АГ ўз – ўзидан ростланувчи тизим ҳосил қилиши маълум бўлди.

Диссертациянинг «АГ юкламасининг чиқиш кучланиши ва частотасига таъсирига доир тажриба тадқиқотлари» деб номланган учинчи бобида автоматик ростлагичга эга бўлмаган АГ кучланиши ва частотасининг юкламага боғлиқлиги, АГ режим параметрларини барқарорлашувида микропроцессорли реактив қувват автоматик ростлагичининг аҳамияти, АГ ни кўзгатиш ва юкламаларни қўшиш вақтидаги ўткинчи жараёнларда ҳолат параметрларининг ўзгаришлари бўйича тажриба натижалари келтирилган.

Республикамизда янги бунёд этилаётган иқтисодий зоналар ҳудудлари, шунингдек энерготизим тармоқларидан узоқ масофаларда жойлашган халқ

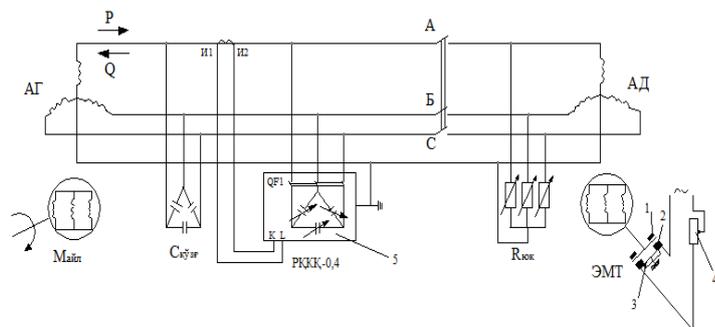
хўжалиги объектларининг электр энергияга бўлган эҳтиёжлари учун, статор чулғамига уланадиган конденсатор батареяларидан реактив қувват узатиш ҳисобига ўз – ўзидан қўзғатиладиган АГ ларнинг автоном иш ҳолатларидан кенг фойдаланилиши, истеъмолчиларни электр энергияга бўлган талабини қондиришдаги энг муҳим самарали омиллардан бири ҳисобланади.

Тадқиқот натижалари, Қорақалпоқ давлат университети “Электр энергетикаси” кафедраси тажриба хонасида ўрнатилган асинхрон двигател (АД) – АГ дан иборат синов стендида экспериментал усулда аниқланди ва таҳлил қилинди.

Бирламчи двигател сифатида - қуввати 7,5 кВт, айланиш частотаси 1500 айл/мин бўлган АД ўрнатилган, АГ сифатида эса - қуввати 4 кВт, частотаси 1500 айл/мин, номинал кучланиши 380 В бўлган қисқа туташган анъанавий роторли асинхрон машинадан фойдаланилди.

АГ ни ишга тушириш схемасида статор чулғамига конденсатор батареяларини учбурчак усулда улаш билан сиғимнинг кичик қийматларида АГ ни қўзғалиши таъминланади.

Тадқиқот ўтказиш давомида, “Электр энергетикаси” кафедрасида, АГ истеъмол қиладиган контакторлар ва микропроцессордан иборат автоматик ростловчи қурилма (РҚАРҚ) ишлаб чиқилди ва тажрибага тадбиқ қилинди. Қурилмадаги мавжуд конденсаторлар батареялари сиғимларини контакторлар ёрдамида автоматик ростланиши ҳисобига АГ нинг турли юкламаларида унинг чиқиш кучланишини номинал кучланиш даражасида ўзгармасдан қолиши таъминланди. Қурилманинг асосий элементи бўлиб, ростловчи блок (PFR-12 power factor relay -12) хизмат қилади.



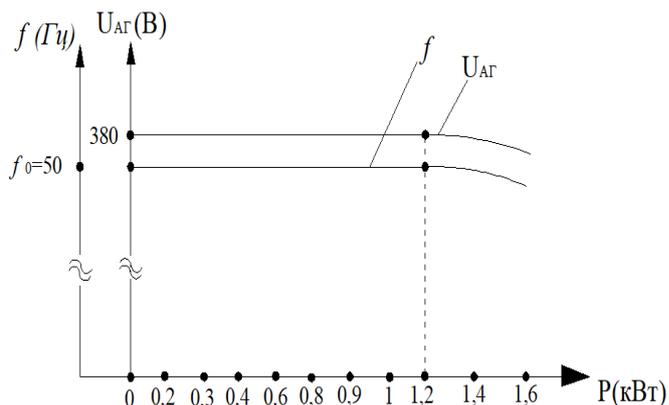
9-расм. АГ нинг турли юкламасида чиқиш кучланиши ўзгармаслигини таъминловчи автоматик ростлаш схемаси:

- 1-пўлат ўзак, 2-чулғам, 3-қўзғалмас диск, 4-реостат, 5- контакторлар ва микропроцессордан иборат автоматик ростловчи қурилма бошқарув элементи

АГ юкламасининг чиқиш кучланиши ва частотага таъсирини ўрганишга доир тажриба куйидаги тартибда ўтказилди: дастлаб 4 кВт ли, АГ ни салт ишлаш ҳолатида ишга туширилгандан сўнг, АГ нинг чиқишига ҳисоблаш йўли билан аниқланган фазавий сиғим $C_{кўзғ} = 17 \text{ мкФ}$ ни улаш орқали 380 В га тенг номинал кучланиш ҳосил қилинди. Салт ишлаш ҳолатида АГ чиқишидаги

частота эса $f = 50 \text{ Гц}$ ни ташкил этди.

АГ қўзғатилгандан ($C_{кўзғ} = 17 \text{ мкФ} = \text{const}$) сўнг, қайси қийматдаги актив юкламагача АГ нинг чиқиш кучланиши ва частотасини ўзгармасдан қолишига доир ўтказилган тажриба натижаларидан, ушбу миқдор $P = 1,2 \text{ кВт}$ ни ташкил этиши маълум бўлди (10- расм):

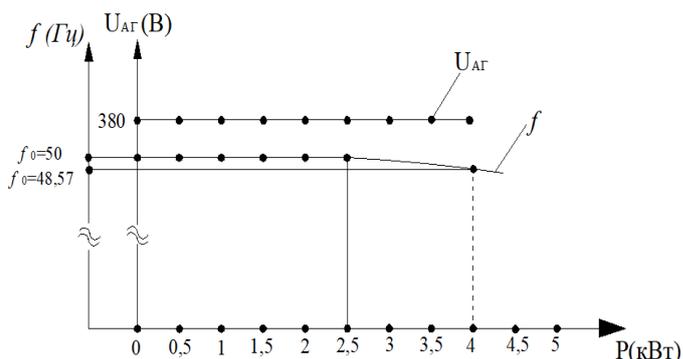


10–расм. АГ номинал кучланишда кўзгатилганда АГ чиқиш кучланиши ва частотасининг актив юкламага боғлиқ графиги

АГ сифатида танланган АМ нинг номинал қуввати, унинг валидаги механик қувват 4 кВт эканлигини ҳисобга олганда, АГ нинг электр қуввати $P_{AG} = P_{MEH} \cdot \eta = 4 \text{ кВт} \cdot 0,86 = 3,44 \text{ кВт}$ эканлиги маълум бўлади. Келтирилган графикдан, АГ юкламаси номинал юкламанинг 30 фоизигача чиқиш кучланиш ва частота қийматлари ўзгаришсиз, яъни номинал кучланиш ва номинал частота микдорларига тенглиги

сақланади.

Сўнгра АГ чиқишига РҚАРҚ улаиб, чиқиш кучланиши ва частотасини актив юкламага боғланишига доир тажриба ўтказилди. Ушбу тажрибага доир боғланиш графиги 11 - расмда келтирилган.



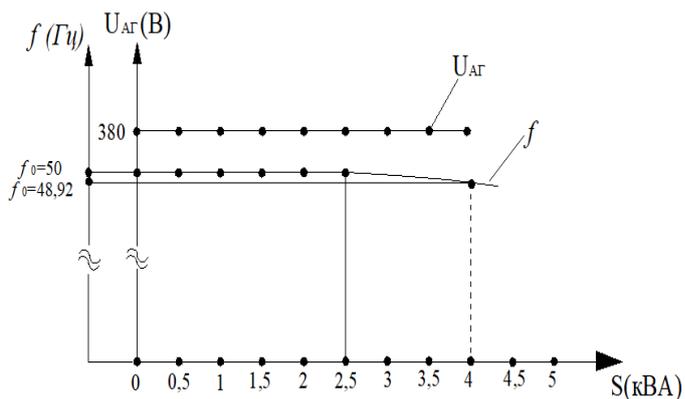
11–расм. РҚАРҚга эга АГ кучланиш ва частотасининг актив юкламага боғлиқ графиги

Графикдан, АГ чиқишига уланган 4 кВт гача ортиб боровчи актив юкламада, РҚАРҚ ҳисобига чиқиш кучланишининг номинал қиймати даражасида ўзгаришсиз қолиши, шунингдек, чиқиш частотаси эса 2,5 кВт юкламагача $f = 50 \text{ Гц}$ микдорида сақланиши маълум бўлди. Бундан, РҚАРҚ частотани ўзгармаслигига ижобий

таъсирини кўрсатади, хусусан, АГ юкламаси номинал юкламанинг 70 фоизигача ($2,5 \text{ кВт} / 3,44 \text{ кВт}$) унинг частотаси $f = 50 \text{ Гц}$ микдорида, ўзгаришсиз қолишини, 4 кВт га тенг юкламада эса $f = 48,57 \text{ Гц}$ ни ташкил этди.

Навбатдаги тажриба, РҚАРҚга эга АГ нинг чиқишига 1,5 кВт қувватли АД ва 2,5 кВт актив юкламадан иборат аралаш характердаги юклама улаш билан ўтказилди. АД юкламаси унинг роторига уланган электромагнит тормоз (ЭМТ) ёрдамида оширилиб борилди.

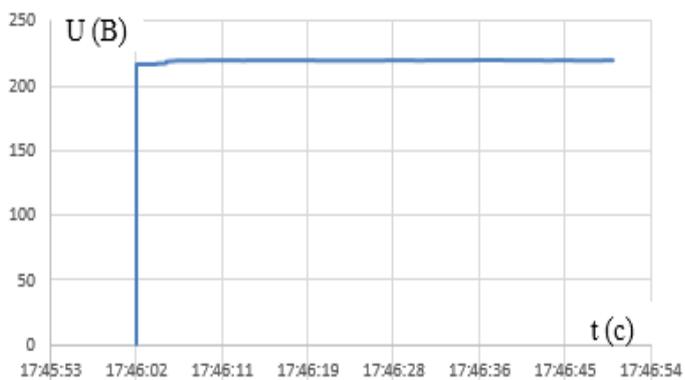
Мазкур тажрибага доир, АГ кучланиши ва частотасининг аралаш характердаги юкламага, яъни АГ тўла қуввати - S дан иборат юкламага боғланиш графиги 12 - расмда келтирилган.



12–расм. РҚАРҚга эга АГ кучланиш ва частотасининг аралаш (актив ва индуктив) характердаги юкламага боғлиқ графиги

аралаш характердаги юкламаларида, частотанинг актив юкламага қараганда аралаш юкламаларда кичик миқдорда камайиши маълум бўлди.

Қуйида, АГ ни қўзғатилиши ва унга турли юкламаларни қўшиш вақтларидаги АГ кучланиши қийматларининг ўтиш жараёнларини акс эттирган осциллограммалар келтирилади:



13-расм. Қуввати $P=4$ кВт бўлган АГ ни салт ишлаш ҳолатидаги қўзғатилиш жараёни ($C_{қўзғ}=17$ мкФ) осциллограммаси



14-расм. РҚАРҚ дан иборат автоматик ростловчи қурилмага эга бўлган АГ га 0,45 кВт 0,9 кВт ва 3 кВт актив қувватли юкламалар кетма-кет уланганида чиқиш кучланишининг ўзгариши осциллограммаси

Графикдан, АГ чиқишига уланган, 4 кВА гача ортиб борувчи юкламада РҚАРҚ ҳисобига, олдинги тажрибадагидек, чиқиш кучланишининг ўзгаришсиз, шунингдек 2,5 кВА юкламагача $f = 50$ Гц миқдорда сақланиши маълум бўлди. АГ нинг юкламаси 4 кВА га етганда $f = 48,92$ Гц ни ташкил этди.

Бундан, АГ нинг тенг миқдорлардаги, актив ва

13-расмдан, АГ нинг тўғридан-тўғри қўзғатилиш жараёнида, унинг чиқишидаги фазавий кучланиш барқарор $U=220$ В га тенг бўлганлиги маълум бўлади.

14-расмдан, АГ чиқишига 4 кВт гача ортиб борувчи уч фазали актив юклама уланганда, чиқиш кучланиши контакторлар ва микропроцессордан иборат автоматик ростловчи қурилма ҳисобига, ўзининг номинал қиймати даражасида ўзгаришсиз қолиши маълум бўлди. Осциллограммадан, АГ чиқишига 3 кВт юклама уланганда ўша фаза кучланишининг 3 сек давомида 200 В гача тушиб, контакторлар ва микропроцессордан иборат

автоматик ростловчи қурилма ҳисобига қайта тикланганлиги маълум бўлди.

Юқоридагилардан хулоса шуки, РҚАРҚ дан фойдаланиш ҳисобига АГ юкламасининг миқдор ёки характер жихатидан ўзгарганида ҳам, АГ даги ўтиш жараёни тугагандан сўнг яна чиқиш кучланишининг ўзгармасдан қолиши, номинал юкламанинг 70 % гача эса частотанинг $f = 50$ Гц миқдорда ўзгаришсиз қолиши маълум бўлди.

Диссертациянинг «АГларга эга бўлган электроэнергетик тизимлардаги электромеханик тебранишлар тадқиқи» деб номланган тўртинчи бобида чексиз қувватли тизимга ишлаётган АГ ва СГ дан иборат электроэнергетик тизим элементларининг математик модели, тадқиқ қилинаётган тизим элементларининг чизиқлантирилган тенгламалари, АГ нинг электр тизимлари частотали характеристикасига таъсири, Автоном ҳолатида ишлаётган қисқа туташган роторли АГ дан ва СГ дан иборат микро ГЭС ларнинг техник-иқтисодий кўрсаткичлари таҳлилига бағишланган.

АГларни ўз ичига олган электр энергия тизимининг (ЭЭТ) тебраниш хусусиятлари тадқиқоти $d-q$ координаталарида ифодаланган Парк–Горев тенгламалари асосида олиб борилди, айланувчи элементлар тенгламалари ўз хусусий ўқларида, статик элементлар – узатиш линиялари, юкламалар ва бошқалар – ихтиёрий тезлик билан айланувчи ва етакловчи сифатида танланган СГ ўқида келтирилган нисбий бирликлар тизимида ифодаланади.

ЭЭТ элементларини тенгламаларини алоҳида–алоҳида келтирамыз:

Синхрон генератор:

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{d\Psi_{dc}}{dt} - \frac{\Psi_{qc}d\delta}{dt} - i_{dc}r_c \\
 U_q &= \frac{d\Psi_{qc}}{dt} - \frac{\Psi_{dc}d\delta}{dt} - i_{qc}r_c \\
 0 &= r_{1dc}i_{1dc} + \frac{d\Psi_{1dc}}{dt} \\
 &\dots\dots\dots \\
 0 &= r_{1qc}i_{1qc} + \frac{d\Psi_{1qc}}{dt} \\
 &\dots\dots\dots \\
 \frac{T_{jc}d^2\delta}{dt^2} &= M_T - M_C \\
 \Psi_d &= x_{ad}(\sum i_{ndc} + i_f) - i_{dc}x_d \\
 \Psi_q &= x_{aq}\sum i_{nqc} - i_{qc}x_q \\
 \Psi_f &= x_{ad}(\sum i_{ndc} - i_{dc}) + i_f x_f \\
 \Psi_{CO} &= L_0 i_{CO} \\
 \Psi_{1d} &= x_{1d}i_{1dc} + x_{ad}(\sum i_{ndc} + i_f - i_{dc}) \\
 \Psi_{1q} &= x_{1q}i_{1qc} + x_{aq}(\sum i_{nqc} + i_f - i_{qc}) \\
 &\dots\dots\dots
 \end{aligned} \tag{21}$$

Асинхрон генератор:

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{d\Psi_{dA}}{dt} - \Psi_{qA}\omega_K - i_{dA}r_s \\
 U_q &= \frac{d\Psi_{qA}}{dt} - \Psi_{dA}\omega_K - i_{qA}r_s
 \end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
U_0 &= \frac{d\Psi_{A0}}{dt} + i_{A0}r_s \\
0 &= \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - (S_K - S_a)\Psi_{qr} + i_{dr}r_r \\
0 &= \frac{d\Psi_{qr}}{dt} - (S_K - S_a)\Psi_{dr} + i_{qr}r_r \\
\frac{T_{jA}dS_A}{dt} &= M_{TA} - M_A \\
\Psi_{dA} &= x_m \sum i_{rnd} - x_s i_{dA} \\
\Psi_{qA} &= x_m \sum i_{rnq} - x_s i_{qA} \\
\Psi_{A0} &= L_{A0} i_{A0} \\
\Psi_{rd1} &= x_{1d} i_{r1d} + x_m (\sum i_{rnd} - i_{dA}) \\
&\dots\dots\dots \\
\Psi_{rq1} &= x_{1q} i_{r1q} + x_m (\sum i_{rnq} - i_{qA}) \\
&\dots\dots\dots
\end{aligned}$$

Юқоридаги тенгламалар қуйидагича белгиланишлар киритилган: $U_d, U_q, \Psi_{dc}, \Psi_{qc}, \Psi_{dA}, \Psi_{qA}$ - СГ ва АГ лар статорлари кучланиши ва оқим илашувчанликларининг бўйлама ва кўндаланг ва ташкил этувчилари; r_s, r_c, r_f - АГ ва СГ ларнинг ва кўзғатувчи чулғамларининг актив қаршиликлари; r_{1dc}, r_{1qc} , - СГ демпфер чулғамларининг d ва q ўқларидаги актив қаршилиги.

$\Psi_f, \Psi_{nd}, \Psi_{nq}, \Psi_{rdn}, \Psi_{rqn}$ - кўзғалиш чулғами ва СГ, АГ лар роторлари эквивалент ёпиқ контурларининг оқим илашувчанликлари; $i_f, i_{dc}, i_{qc}, i_{dA}, i_{qA}$ - СГ нинг кўзғалиш токи, машина статорлари тоқларининг бўйлама ва кўндаланг ташкил этувчилари; $i_{ndc}, i_{nqc}, i_{rnd}, i_{rnq}$ - генератор роторларининг эквиваленти қисқа туташган роторидаги тоқларнинг бўйлама ва кўндаланг ташкил этувчилари; $x_a, x_q, x_f, x_{1d}, x_{1q}, x_{ad}, x_{aq}$ - статор ва демпфер контурлари ва кўзғатиш чулғамининг умумий индуктив қаршилиги ва СГ статори ва роторининг d ва q ўқларидаги ўзаро индуктив қаршилиги; $x_s = x_m + x_{se}, x_{1d} = x_{1q} = x_m + x_{re}, x_{md} = x_{rnq} = x_m + x_{rnde}$ - умумий индуктив қаршилик, статор ва ротор контурларининг d ва q ўқларидаги умумий ўзаро индуктив қаршиликлари, шунингдек, тегишли АГ нинг контурларининг сочилиш қаршилиги (x_{se} - статор, $x_{re} = x_{rnde} = x_{rnqe}$ - ротор), 0 индексли параметрлар - нолинчи кетма -кетлик ташкил этувчилари; T_{jc}, T_{jA} - генераторларнинг инерцион доимийлари; δ, S_A - генератор режимида мусбат қабул қилинган СГ нинг юклама бурчаги ва АГ нинг сирпаниши; S_K - етакловчи сифатида қабул қилинган ўқнинг силжиши; M_{TC}, M_{TA} - турбина агрегатлари моментлари; M_C, M_A - қуйидаги формулалар билан аниқланадиган электромагнит моментлар:

- СГ учун:

$$M_C = X_{ad} [i_{qc}(i_f + i_{1d}) - i_{dc}i_{1qc}] (1 + S_K) \quad (23)$$

- АГ учун:

$$M_A = X_m [i_{qA}i_{dr} - i_{dA}i_{qr}] (1 + S_K) \quad (24)$$

Баъзи ҳолларда, умуман қабул қилинган формуладан фойдаланилади:

$$M = \Psi_d i_q - \Psi_q \quad (25)$$

Статик элементларнинг тенгламалари.

Электр узатиш линияси:

$$\begin{aligned}
 U_{dm} &= U_{dn} + r_l i_{ld} + \frac{x_l di_{ld}}{dt} - x_l i_{lq} (1+S_K) \\
 U_{qm} &= U_{qn} + r_l i_{lq} + \frac{x_l di_{lq}}{dt} - x_l i_{ld} (1+S_K) \\
 U_{m0} &= U_{n0} + r_l i_{l0} + \frac{x_{l0} di_{l0}}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Юклама:

$$\begin{aligned}
 U_{dm} &= r_H i_{Hd} + \frac{x_H di_{Hd}}{dt} - x_H i_{Hq} \cdot (1 + S_K) \\
 U_{dm} &= r_H i_{Hq} + \frac{x_H di_{Hq}}{dt} - x_H i_{Hd} \cdot (1 + S_K) \\
 U_{m0} &= r_H i_{H0} + \frac{x_H di_{H0}}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

Шунтловчи реактор:

$$\begin{aligned}
 U_{dm} &= \frac{x_p di_{pd}}{dt} - x_p i_{pq} \cdot (1 + S_K) \\
 U_{qm} &= \frac{x_p di_{pq}}{dt} - x_p i_{pd} \cdot (1 + S_K) \\
 U_{dm} &= \frac{x_p di_{p0}}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

Кўндаланг сифим:

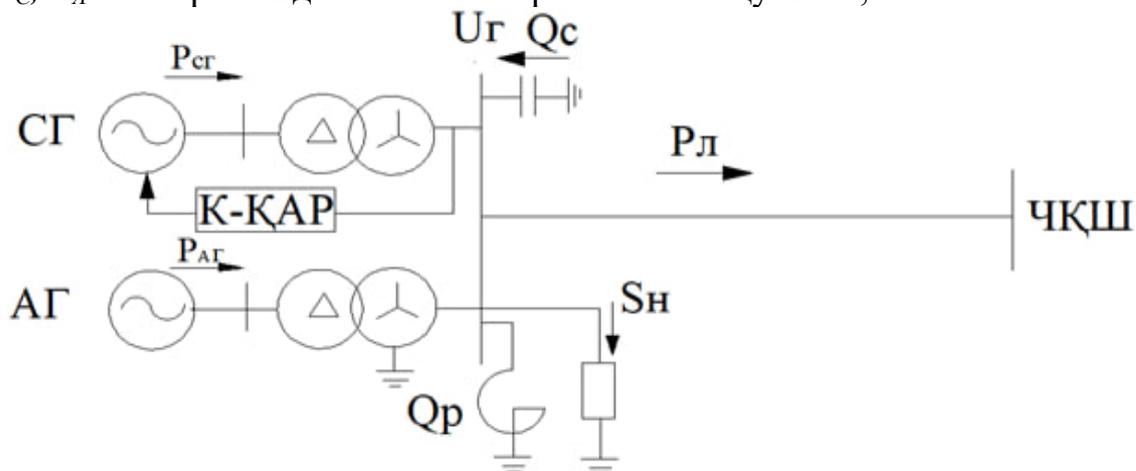
$$\begin{aligned}
 \frac{dU_{dm}}{dt} + U_{qm}(1+S_K) &= x_c i_d \\
 \frac{dU_{qm}}{dt} + U_{dm}(1+S_K) &= x_c i_q \\
 U_{m0} &= \frac{1}{C_0} \int i_0 dt
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Нисбий бирликлар тизими сифатида X_{ad} ишлатилди. Нисбий бирликларнинг ушбу ўзаро тизимида статорнинг базис токи статор фазаси номинал токининг амплитудасига тенг, базавий кучланиш – номинал фаза кучланишининг амплитудасига ва базис бурчак частотаси – синхрон бурчак частотасига тенг. Қолган базис катталиклар юқоридагилар асосида аниқланади.

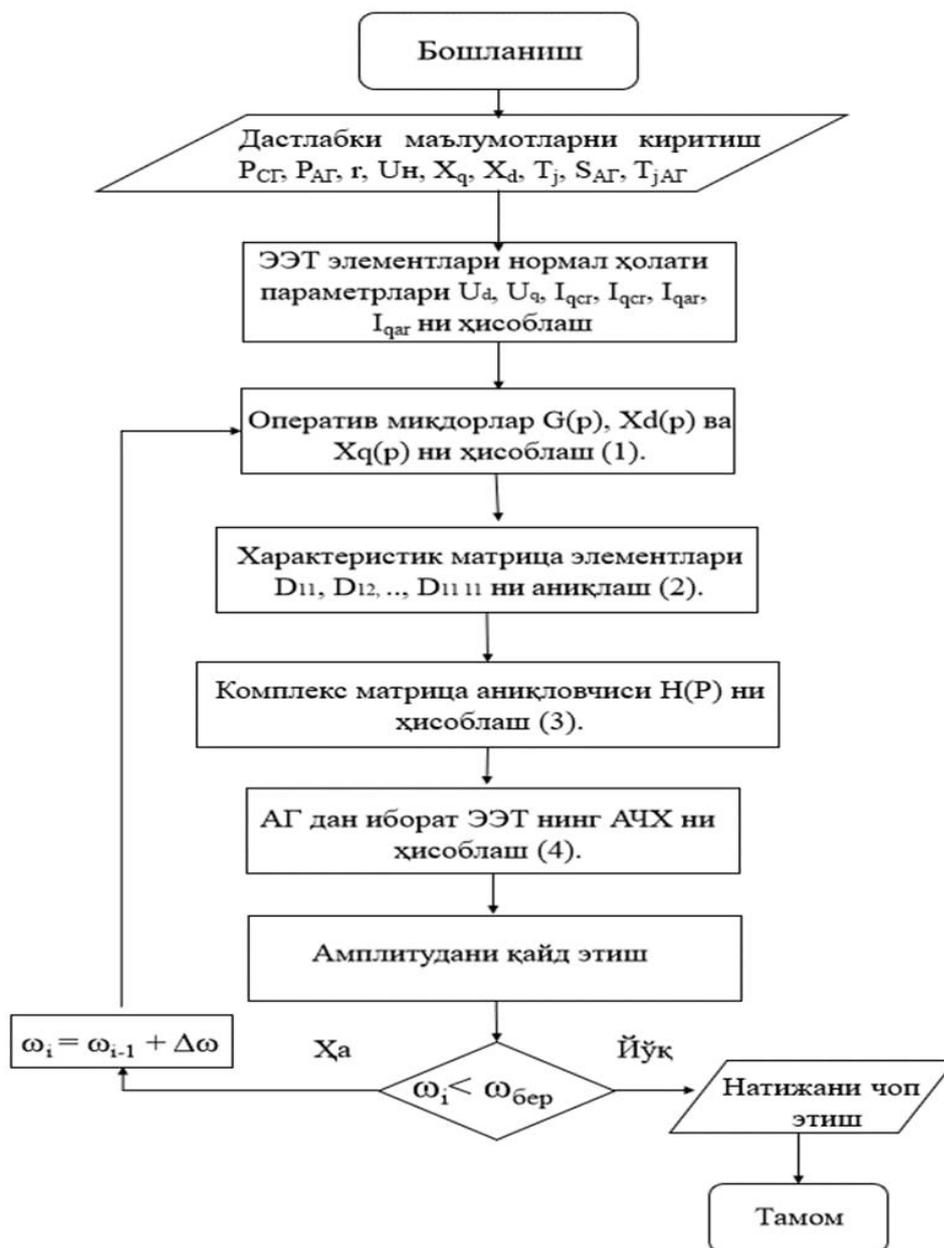
СГ ва АГ битта станцияда параллел ишлаганда, узатиш линиясининг бошидаги актив қувват қўйидагича аниқланади:

$$P_L = P_C + P_A - P_{\text{Ю}} \tag{30}$$

P_C, P_A – мос равишда СГ ва АГ ларнинг актив қуввати;



15–расм. Станцияда АГ ва СГ нинг ЧҚШ га параллел ишлаш схемаси

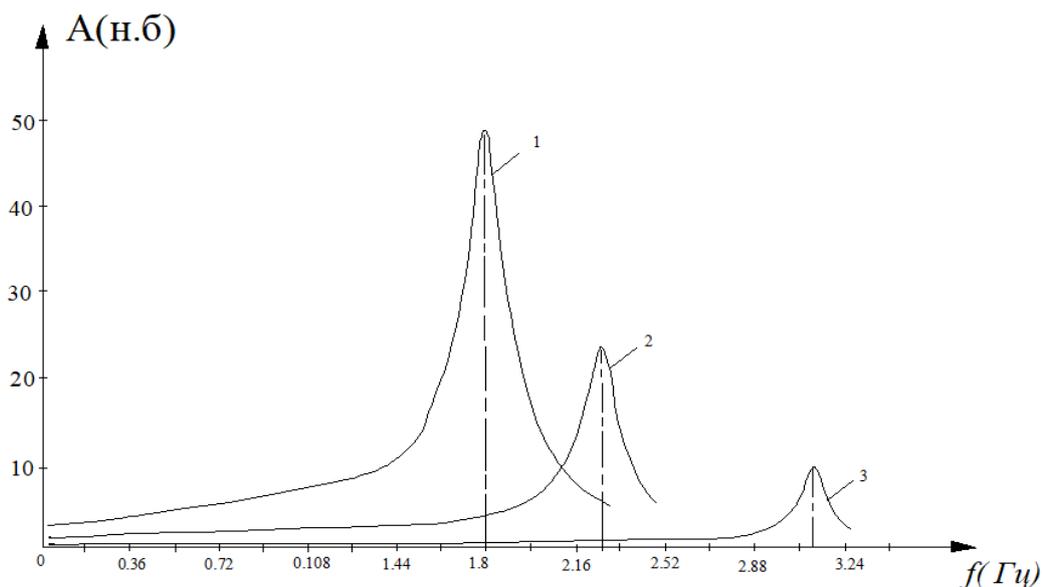


16–расм. Ҳисоблаш дастурининг блок схемаси

Маълумки, ҳозирги ЭЭТ лардаги барча СГ лар кўзғатишни автоматик ростлаш (ҚАР) қурилмалари билан жиҳозланган. Уларнинг асосий вазифаси СГ лар шинасидаги кучланишни талаб даражасида ушлаб туриш, узатилаётган қувват чегарасини ошириш, ҳамда статик ва динамик турғунлик сақланишини таъминлашдан, шунингдек, турли турткилар ҳисобига келиб чиқадиган электромеханик тебранишларни ҳам сўндириш иборат.

Электр станциядаги СГ ва АГ лардан иборат куйидаги 3 та ҳолат учун, уларнинг ҳисобланган амплитуда–частотавий ҳарактеристикалари бўйича электромеханик тебранишлар частотаси ва амплитудаларининг ўзгаришлари аниқланиб (17 - расм) таҳлил қилинди:

1. Станция фақат СГ лардан иборат бўлганда;
2. Станция СГ ва АГдан иборат бўлганда;
3. Станция фақат АГлардан иборат бўлганда.



17–расм. Станцияда СГ ва АГдан иборат ЭЭТ нинг амплитуда–частота характеристикалари

1. Станция фақат СГдан иборат; 2. Станция параллел уланган СГ ва АГдан иборат; 3. Станция фақат СГдан иборат

Характеристикалардан, электр узатиш линияси орқали узатилаётган актив қувват миқдорини ўзгартирмаган ҳолда, станциядаги АГ нинг улуши ортиши билан ташқи турткилар ҳисобига ЭЭТ да пайдо бўладиган электромеханик тебранишлар амплитудасининг камайишини, станциядаги СГ ларни тўлиқ АГ га алмаштириш натижасида эса электромеханик тебранишларнинг содир бўлиши деярли кузатилмаслиги маълум бўлади.

Бундай ҳолат, АГ да электромеханик тебранишларни сўндириш хусусиятлари мавжудлиги, тебранишларни ЭЭТ га узатилмаслиги, тизимда синхронизмдан чиқиб кетиш хавфи кузатилмаслигидан далолат беради.

ЭЭТ нинг юқорида келтирилган амплитуда–частотавий хусусиятларидан шуни таъкидлаш лозимки, станция таркибига АГ нинг киритилиши билан, ЭЭТ нинг резонанс частотасининг қиймати, унинг ортиб бориш тарафига силжиганлиги кузатилади, масалан, станциянинг фақат АГдан иборат бўлгандаги резонанс частотаси қиймати, станция фақат СГдан иборат бўлгандагидан тахминан икки барабар катта эканлиги, паст частотали заиф сўнувчи тебранишлар натижасида юзага келадиган тизим аварияларининг олдини олишга ёрдам беради.

ХУЛОСА

“Қисқа туташган роторли асинхрон генератор режимларини тадқиқ қилиш” мавзусидаги фалсафа доктори (PhD) диссертацияси бўйича ўтказилган тадқиқот натижалари асосида қуйидаги хулосалар тақдим этилади:

1. АГ параметрларини ростлаш схемаси ўзгарувчан сиғимли конденсатор шахобчасини киритиш асосида таклиф этилди. Натижада генераторнинг ҳар қандай юкламасида унинг чиқиш кучланишини барқарорлигини таҳлил қилиш имкони яратилган.

2. АГ ва СГ лардан иборат автоном иш ҳолатидаги станция имитацион модели ишлаб чиқилди. Натижада ташқи таъсирлар ҳисобига АГ ва СГ да ҳосил бўладиган электромеханик тебранишлар қарама-қарши фазаларда ўзгарганлигидан, АГ нинг станциядаги иштироки электромеханик тебранишлар учун табиий сўндиргич эканлиги аниқланиқлаш имкони яратилган.

3. Автоном иш ҳолатидаги АГ га конденсатор батареяларидан иборат микропроцессорли РҚАРҚ ни улаб унинг кучланиш каналидан фойдаланиш таклиф этилган. Натижада генераторнинг ҳар қандай юкламасида чиқиш кучланишини номинал миқдордан ўзгармаслигини таъминланлаш имкони яратилган.

4. Тажрибадан, номинал кучланишда кўзғатилган АГ юкламасининг 30% гача, микропроцессорли РҚАРҚ татбиқ этиш натижасида, АГ юкламасининг миқдор ва характер жиҳатдан ҳар қандай ўзгаришида кучланишининг ўзгаришсиз қолиши шунингдек, 70% юкламагача АГ нинг частота бўйича барқарорлиги таъминланлаш имкони яратилган.

5. Тадқиқот натижалари “Ҳудудий электр тармоқлари” АЖ нинг Хоразм ҳудудий филиали тармоқларидан таъминланувчи улгуржи истеъмолчига тадбиқ қилинган бўлиб, илмий-тадқиқот натижаларининг амалиётга жорий этилишидан кутилаётган иқтисодий самарадорлик йилига 155 520 000 (бир юз эллик беш миллион беш юз йигирма минг) ни 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**

**КАРАКАЛПАКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ БЕРДАХА**

СЕЙТМУРАТОВ БАЙРАМБАЙ ТУРГАНБАЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С
КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

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

**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 B2021.1.PhD/T2108.

Диссертация выполнена в Каракалпакском государственном университете имени Бердаха. Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице научного совета (www.tdtu.uz) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Научный руководитель:

Бобожонов Юнус Матризаевич
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Бобожанов Махсуд Қаландарович
доктор технических наук, профессор

Мирзаев Абдурашид Тухтасинович
кандидат технических наук, доцент

Ведущая организация:

**Ташкентский государственный
транспортный университет**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2024 г. в _____ 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 ____). Адрес: 100095, Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 207-14-70.

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2024 года.

(протокол рассылки № «__» от «__» _____ 2024 года).

К.Р.Аллаев

Председатель научного совета
по присуждению ученых степеней,
доктор технических наук, профессор, академик

И.У.Рахмонов

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

Т.Ш. Гайилов

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 вопросам сохранения существующих энергетических ресурсов, рационального использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и разработки новых альтернативных источников энергии уделяется особое внимание. На сегодняшний день в развитых странах «Обзору ключевых показателей эффективности за 2020 год по развитым странам, наибольшие доли ВИЭ приходятся на Швецию — 60,1% от общего энергопотребления, Финляндию — 43,8% и Латвию — 42,1%. Основными источниками производства энергии в этих странах являются ГЭС и ВЭС, а также переработка биомассы»³. В этом направлении, в частности, уделяется особое внимание повышению требований к источникам мощности автономных систем, таким как простота конструкции, удобство технического обслуживания, относительно малая масса (кВА/кг) и объем, а также стабильность выходных параметров.

В развивающихся странах мира научные исследования и проекты, связанные с использованием автономных систем электроснабжения, до настоящего времени в большей степени сосредоточены на асинхронных генераторах (АГ) с фазным ротором. В данном направлении приоритетными считаются исследования, посвящённые надёжности электроснабжения потребителей, особенно в части устройств источников электроэнергии. Одновременно важным фактором удовлетворения потребностей потребителей в электроэнергии являются научные исследования, направленные на производство электроэнергии нетрадиционными методами, в то время как доля ВИЭ в объёме общей выработки электроэнергии в этих странах составляет 30-40%, данный показатель в нашей республике находится на уровне 10-12%. С учётом этого, проведение исследований, направленных на увеличение доли ВИЭ до 40% за счёт их широкого внедрения к 2030 году, является актуальной задачей.

В нашей республике реализуются масштабные меры, направленные на создание, совершенствование и внедрение новых технологических решений с целью снижения энергоёмкости отраслей экономики в полтора раза к 2030 году. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы, в частности, поставлены задачи по «активному внедрению технологии «зелёной экономики» во все сферы, с целью повышения энергоэффективности экономики на 20% и сокращения объёма выбросов вредных газов на 20% к 2026 году»⁴. В реализации этих задач особое значение в последние годы приобретает внедрение маломощных возобновляемых источников энергии, особенно станций, состоящих из маломощных автономных генераторов, приводимых в движение с помощью

³ <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tendentsii-razvitiya-zelenoy-energetiki>

⁴ Ўзбекистон Республикаси Президентининг “2022 — 2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида” 2022 йил 28 январдаги ПФ – 60 сонли фармони.

гидравлических и ветряных турбин. На этих станциях могут быть установлены синхронные генераторы (СГ), асинхронные генераторы (АГ), генераторы постоянного тока и другие. Исследования показывают, что, принять во внимание такие основные параметры, как высокие энергетические показатели АГ, превосходство динамических и статических характеристик, высокая надежность, простота конструкции и низкая стоимость, по использованию АГ в автономных станциях, приводимых в действие любыми типами первичных двигателей, в том числе как бесконечно мощными энергетическими системами, становится важной научно-исследовательской задачей.

Результаты данного диссертационного исследования в определенной степени будут способствовать выполнению задач, установленных в нормативно-правовых актах, таких документах как Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», Указ от 9 сентября 2022 года № УП-220 «О дополнительных мерах по внедрению энергоэффективных технологий и развитию маломощных возобновляемых источников энергии», а также в Постановлении Президента Республики Узбекистан от 16 февраля 2023 года № ПП-57 «О мерах по ускоренному внедрению возобновляемых источников энергии и энергоэффективных технологий в 2023 году» и других нормативных правовых документах, касающихся данной деятельности.

Соответствие исследования приоритетным направлениям 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. Учитывая, что широкое применение ВИЭ для производства электроэнергии является одной из наиболее актуальных задач современности, результаты измерений параметров ветра, проведенные компаниями Германии «Inter Gora» и «Geonet» на территории республики, показывают, что энергетический потенциал ветра в Узбекистане составляет более 512 ГВт, что открывает возможности для строительства тысяч ветровых электрических станций в стране. Точно так же, согласно результатам исследований, проведенных немецкой компанией «Fichtner», гидроэнергетический потенциал малых рек предгорий Узбекистана составляет более 4 ГВт, что позволяет удовлетворить растущие потребности потребителей электроэнергии за счет широкого применения ВИЭ и окончательно устранить дефицит энергии в энергетической системе.

С начала XX века в решении таких задач, как исследование короткозамкнутых роторных АГ, большой вклад внесли ряд известных зарубежных ученых, в том числе: И.М. Постников, М.А. Тагиров, Ю.Г. Толстов, А.А. Иванов, А.В. Иванов-Смоленский, А.И. Важнов, Л.Г. Мамиконянц, М.П. Костенко, В.Г. Китушин, Н.И. Соколов, Ю.Г. Шакарян, А. Klimann (А. Климанн), Р. Richardson (П. Ричардсон), De Mello (Де Мелло), L.N. Hannett (Л.Н. Ханнетт), J.M. Elder (Ж.М. Элдер), J.T. Bous (Ж.Т. Боус),

J.L. Woodward (Ж.Л. Вудвард), M.P. Rapin (М.П. Рапин), R. Bonert (Р. Бонерт), G. Hoops (Г. Хоопс) и др.

В решении научных проблем, таких как повышение статической и динамической устойчивости станций с массивами роторных АГ и СГ, работающих параллельно в бесконечно мощных системах, значительный вклад внесли научные работы известных ученых Узбекистана. В рамках научной школы, созданной под руководством академиков Ташкентского государственного технического университета Х.Ф. Фазылова и К.Р. Аллаева, проводятся теоретические и экспериментальные исследования, направленные на определение влияния различных конструкций ротора на технические параметры АГ, их энергетические показатели и рабочие характеристики. В этой научной школе участвуют П.П. Зимаков, С.Ж. Хайдаров, К.Х. Курбаниязов, Н.Б. Пирматов, А.Ф. Ан, Ю.М. Бобожонов, Ю.М. Клименко, А.Т. Мирзаев. В результате проведённых научных исследований, благодаря внедрению массивных роторных АГ в станции, работающих параллельно с бесконечными мощностями, были достигнуты значительные результаты в решении задач повышения устойчивости станции.

Несмотря на значительные успехи, научные проблемы, связанные с изменениями выходного напряжения и частоты при номинальных, максимальных и различных типах нагрузок в короткозамкнутых традиционных роторных АГ ещё недостаточно изучены. В данной диссертационной работе предложено усовершенствование обеспечения постоянства выходного напряжения при различных значениях нагрузки автономного АГ за счет применения устройства автоматической настройки ёмкости конденсаторов.

Связь темы диссертации с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Исследование темы диссертации было выполнено в рамках научно-исследовательского плана Каракалпакского государственного университета “Моделирование электрических энергетических систем, анализ их стационарных состояний и разработка современных методов и алгоритмов оптимального управления” и научно-исследовательского плана практических проектов Ташкентского государственного технического университета: В рамках практического проекта А-3-96 “Оптимальное управление нагрузками потребителей электрической энергии энергетической системы Республики Узбекистан” (2015-2017).

Цель исследования заключается в изучении рабочих режимов короткозамкнутого роторного асинхронного генератора и совершенствовании системы управления выходным напряжением.

Задачи исследования:

совершенствование схемы регулировки параметров АГ за счет введения в неё ветви с конденсатором с переменной емкостью;

разработка имитационной модели для исследования зависимости

изменений параметров состояний в автономном режиме и в режиме параллельной работы СГ с АГ от значения нагрузки и емкости конденсатора;

усовершенствование за счет внедрения устройства автоматической регулировки емкости конденсаторов для обеспечения стабильности выходного напряжения при различных значениях нагрузки на АГ в автономном режиме;

определение изменений напряжения и частоты в зависимости от величины и характера нагрузки на опытно - испытательном стенде, основанное на эксперименте с АГ.

Объектом исследования являются АГ, работающие в параллельном режиме с СГ в автономной и бесконечной мощностной системе.

Предметом исследования является математическая модель АГ, работающего в бесконечной мощностной системе, имитационная модель в программе MATLAB и экспериментальная модель.

Методы исследования. В процессе исследования для решения поставленных задач использовались методы анализа стационарных и переходных режимов электрических энергетических систем на основе уравнений Парк-Горева, а также опытно-испытательной стендовой и имитационной моделей.

Научная новизна исследования:

разработан метод обеспечения стабильности напряжения шины путем подключения конденсатора соответствующей емкости к разным нагрузкам, подключаемым к шине станции, в автономных режимах асинхронного генератора и параллельной работе с синхронным генератором;

на основе включения ветви с переменной емкостью конденсатора усовершенствована схема замещения асинхронного генератора, что создало возможность анализа обеспечения стабильности выходного напряжения при переменных нагрузках;

на основе использования канала напряжения устройства автоматического регулирования реактивной мощности на базе микропроцессора обосновано поддержание напряжения асинхронного генератора на номинальных значениях при переменных нагрузках;

на основе разработки микропроцессорного устройства автоматического регулирования обоснована стабильность выходного напряжения асинхронного генератора при любой характерной нагрузке, а также устойчивость частоты выхода до 70% нагрузки без изменения выходного напряжения.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан алгоритм определения амплитудно-частотной характеристики электрической системы, состоящей из асинхронных турбогенераторов, а также программный продукт для ЭВМ, реализующий данный алгоритм;

разработана расчетная модель режимов параллельной работы СГ и АГ на электростанции, а также создан программный продукт для ЭВМ,

реализующий эту модель;

разработан метод расчета параметров для автоматического регулирования потребления реактивной мощности АГ с короткозамкнутым ротором в автономном режиме, а также создан программный продукт для ЭВМ, реализующий данный метод.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов исследования объясняется тем, что результаты, полученные с помощью имитационного метода, были подтверждены практическими результатами, полученными экспериментальным путем, то есть взаимной согласованностью исследовательских результатов, а также тем, что экспериментальные исследования были проведены с использованием современных методов и средств.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научное значение результатов исследования заключается в возможности анализа изменений параметров состояния электрических энергетических систем, состоящих из параллельно работающих короткозамкнутых роторных АГ и СГ, на основе математических и имитационных моделей, в зависимости от конструктивных параметров системы и величины нагрузки, а также в теоретическом обосновании принципа работы устройства регулирования выходного напряжения АГ, предназначенного для работы в автономном режиме, в соответствии с усовершенствованной схемой преобразования генератора.

Практическое значение результатов исследования заключается в том, что предложенное микропроцессорное устройство мощностью 4 кВт, состоящее из короткозамкнутого роторного АГ, приводимого в движение механической энергией воды, и устройства автоматического регулирования реактивной мощности, было внедрено в филиал «Региональные электрические сети» АО в Хорезмской области. При этом, несмотря на изменения в величине и характере нагрузки на АГ, выходное напряжение АГ оставалось постоянным.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных научных результатов по исследованию режимов короткозамкнутого роторного асинхронного генератора, разработки его экспериментальных, математических моделей и алгоритмов:

была внедрена установка с использованием канала напряжения микропроцессорной системы автоматической регулировки реактивной мощности, состоящая из короткозамкнутого роторного асинхронного генератора мощностью 4 кВт, приводимого в движение механической энергией воды, в филиале акционерного общества «Региональные электрические сети» в Хорезмской области (Справка №01-21 04/1414 от 26.08.2023 года АО «Региональные электрические сети»). В результате, благодаря применению в микро ГЭС асинхронного генератора вместо синхронного, создана возможность увеличения экономической эффективности в 2,4 раза в течение года.

внедрена система на основе разработки микропроцессорного автоматического регулятора, состоящая из асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором, обеспечивающая неизменность выходного напряжения при любых характерных нагрузках. Она внедрена на основе типового проектно-сметного документа в 5 потребителей, расположенных вблизи каналов, рек и ручьев, пересекающих территорию области (Справка №01-21 04/1414 от 26.08.2023 года АО “Региональные электрические сети”). В результате внедрения асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором, годовая экономическая эффективность составила 155 520 000 (сто пятьдесят пять миллионов пятьсот двадцать тысяч) сумов.

Апробация результатов исследований. Результаты исследования были обсуждены на 5 международных и 3 республиканских научно-технических и научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследований. По теме диссертации опубликованы 20 научных работ, из них 1 монография, 5 статей в научных изданиях, рекомендованных для публикации основных научных результатов диссертаций доктора философии (PhD) по решению Высшей аттестационной комиссии Республики Узбекистан, включая 4 статьи в республиканских и 1 статью в зарубежном научном журнале, а также 3 статьи в сборниках, индексируемых в базе данных Scopus, получены 3 сертификата программ для ЭВМ.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В **введении** обосновываются актуальность, необходимость проведенного исследования, цели и задачи исследования, описываются объект и предмет исследования, указывается соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и техники в республике, описываются научная новизна и практические результаты исследования, научно-практическая значимость полученных результатов, сведения о внедрении результатов исследования, об опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации под названием **«Возможности и перспективы использования асинхронных генераторов в настоящее время»** приведено сравнение генераторов, используемых в электрических энергетических системах, характеристики работы асинхронной машины в качестве генератора, самовозбуждение АГ, математическая модель станции, состоящей из АГ, а также анализ изменений режимных параметров АГ с короткозамкнутым ротором на основе его схемы замещения.

Система уравнений Парка-Горева, состоящая из нелинейных уравнений электромагнитных и электромеханических моментов движения,

отражающих связь режимных параметров АГ с внешними воздействиями, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \omega_K - i_d r_s \\
 U_q &= \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \omega_K - i_q r_s \\
 U_0 &= \frac{d\Psi_0}{dt} + i_0 r_s \\
 0 &= \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - (S_K - S_A) \Psi_{qr} + i_{dr} r_r \\
 0 &= \frac{d\Psi_{qr}}{dt} - (S_K - S_A) \Psi_{dr} + i_{qr} r_r \\
 \frac{T_j dS_A}{dt} &= M_T - M_A \\
 \Psi_d &= x_m i_{rd} - x_s i_d \\
 \Psi_q &= x_m i_{rq} - x_s i_q \\
 \Psi_0 &= L_0 i_0 \\
 \Psi_{rd1} &= x_{1d} i_{r1d} + x_m (i_{r1d} - i_d) \\
 \Psi_{rq1} &= x_{1q} i_{r1q} + x_m (i_{r1q} - i_q)
 \end{aligned} \tag{1}$$

В приведённых выше уравнениях введены следующие обозначения: U_d, U_q, Ψ_d, Ψ_q – продольные и поперечные составляющие напряжения статора АГ и потокосцеплений; r_s, r_r, r_{r1} – активные сопротивления статора, ротора и демпферной обмотки генератора;

x_{1d}, x_{1q}, x_m – продольные и поперечные составляющие индуктивного сопротивления демпферной обмотки и её взаимная индуктивность;

$i_d, i_q, i_{dr}, i_{qr}, i_{r1d}, i_{r1q}$ – продольные и поперечные составляющие токов статора, ротора и демпферных обмоток генератора;

Электромагнитный момент АГ: $M_A = X_m [i_q i_{dr} - i_d i_{qr}] (1 + S_K)$;

M_T – момент вращения первичного двигателя (турбины);

$S_A = \frac{\omega_r - \omega_0}{\omega_0}$ – скольжение АГ; $\omega_r = \omega_0 (1 + S_A)$ – скорость вращения ротора;

ω_0 – синхронная скорость; S_K – скольжение относительно координатных осей.

Из-за небольшого возмущения в системе, в АГ происходят незначительные изменения мощности и скольжения: $P_A = P_{A0} \pm \Delta P, S_A = S_{A0} \pm \Delta S$.

Скольжение АГ состоит из двух составляющих: скольжения, связанного с изменением напряжения на шине, и скольжения, обусловленного скоростью вращения первичного двигателя. $S_A = S_{Af} + S_{AT}$; Выражение в другом виде: $\delta_{\delta A} = \delta_f + \delta_r$.

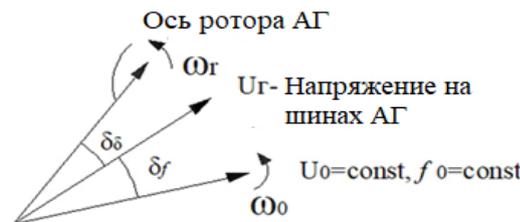


Рис. 1. Скольжение на АГ

Для линеаризации приведённой системы нелинейных уравнений путём разложения в ряд Тейлора для малых колебаний была получена следующая характеристическая уравнения автономной системы с одним генератором:

$$\lambda^3 + (-C_1 - P_1 - D_2)\lambda^2 + (P_1C_1 + C_1D_2 + P_1D_2 - C_2D_1)\lambda + (C_2P_1D_1 - C_1P_1D_1) = 0.$$

где

$$P_1 = j\omega - \frac{EU}{\omega x_1} \sin\delta; \quad C_1 = \frac{EU}{x_1} \cos\delta; \quad C_2 = \frac{EU}{x_1} \sin\delta;$$

$$D_1 = \frac{U^2}{R_H}; \quad D_2 = U^2 \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_H} + \frac{1}{x_{\text{воз}}} + \frac{1}{x_C} \right);$$

j – инерционная постоянная приведённая к угловой частоте ω ;

E, U – Э.Д.С и напряжение генератора; x_1 – индуктивное сопротивление АГ; δ – внутренний угол генератора (угол между векторами напряжения и Э.Д.С); $x_H, x_{\text{воз}}, x_C$ – соответственно индуктивное сопротивление нагрузки, сопротивление возбуждения и сопротивление конденсатора с переменной ёмкостью.

Устойчивость станции по критерию Гурвица определяется следующим условием: $a_1 = (-C_1 - P_1 - D_2) > 0$;

$$a_1 a_2 - a_0 a_3 = C_1 P_1 D_1 + (C_1 + P_1)(D_1 D_2 + C_1 P_1 + C_2 D_1) - C_2 D_1^2 + D_2(C_1 + P_1)^2 + P_1(C_2 D_1 - C_1 D_2) < 0. \quad (2)$$

$C_2 P_1 D_1 - C_1 P_1 D_2 = 0$ запас устойчивости из условия:

$$D_2 = U^2 \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_H} + \frac{1}{x_{\text{воз}}} + \frac{1}{x_C} \right) \quad (3)$$

При этом: $\text{tg} \delta = \frac{R_H}{X} = R_H \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_H} + \frac{1}{x_{\text{воз}}} + \frac{1}{x_C} \right)$ и становится очевидно, что для повышения устойчивости необходимо уменьшить ёмкостное сопротивление. Значение ёмкостного сопротивления определяется на основе параметров АГ и величины нагрузки. Меры по обеспечению устойчивости, определённые из решения уравнений, соответствуют анализу, выполненному на основе эквивалентной “Т” образной схемы замещения АГ, приведённой на рис. 2.

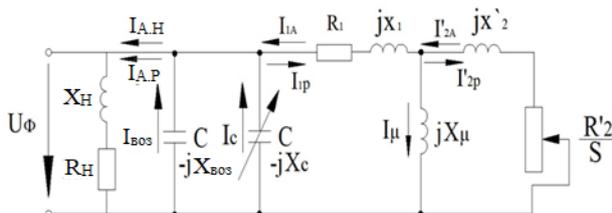


Рис. 2. Эквивалентная “Т” образная схема замещения

Схема замещения состоит из следующих ветвей:

1. Реактивная проводимость магнитной ветви, состоящей из X_μ , равна $1/X_\mu = b_0$;
2. Реактивная проводимость главной ветви, состоящей из R'_2/S , равна $1/X'_2 = b'_2$;
3. Реактивная проводимость ветви, состоящей из конденсатора с переменной ёмкостью, равна $1/X_C = b_C$;
4. Реактивная проводимость возбуждающей ветви, состоящей из постоянного конденсатора, равна $1/X_{\text{воз}} = b_{\text{воз}}$;
5. Реактивная проводимость ветви, состоящей из смешанной нагрузки, равна $1/X_H = b_H$;

При этом: I_{1A} – активная составляющая тока АГ.

I_{1P} – реактивная составляющая тока АГ.

I'_{2A} – активная составляющая тока ротора АГ.

I'_{2P} – реактивная составляющая тока ротора АГ.

$I_{A.H}$ – активный ток нагрузки АГ.

$I_{\text{воз}}$ – ток возбуждения конденсатора.

I_{μ} – реактивный ток намагничивающей ветви АГ.

При изменении нагрузки АГ его исходные номинальные параметры можно стабилизировать путем регулирования частоты вращения первичного двигателя или управлением магнитным потоком АГ с помощью батарей конденсаторов.

Выходное напряжение АГ зависит от реактивного тока I_{μ} в намагничивающей ветви схемы замещения, при этом;

$$I_{\mu} = I_K - I_2 \sin \alpha - I \sin \varphi \quad (4)$$

$I_K = U_1 \omega_1 C$ – ток конденсатора.

Выходная частота АГ:

$$f = \frac{E}{ce\Phi} = \frac{E}{ce(I_{\mu})}; \quad (5)$$

где; E - Э.Д.С. индуктируемая в фазе статора.

Φ - основной магнитный поток, создаваемый Э.Д.С. E .

Из вышеизложенного следует, что сохранение постоянными выходной частоты напряжения АГ при изменении нагрузки происходит за счёт обеспечения неизменности основного потока Φ , путем автоматической регулировки ёмкости подключённого конденсатора.

Исследования проведенные в последние годы показывают, что использование АМ в качестве генератора, в том числе для электроснабжения 3-фазных потребителей 0,4 кВ, имеет большое значение. АГ имеют способность генерировать активную мощность при любых условиях, когда имеется источник реактивной мощности.

Из широко масштабно проводимой исследований доказаны, что АГ могут работать как в параллельном режиме с энергосистемой бесконечной мощностью, так и в автономном режиме. В частности, АГ как генераторы пиковых нагрузок они могут использоваться в малых электростанциях, не требующих обслуживающего персонала, таких как ветровые электростанции и гидроэлектростанции, поскольку их можно эксплуатировать без системы регулировки напряжения и частоты.

В автономных системах электроснабжения при использовании АГ, возбуждаемого с помощью конденсатора, важным условием является обеспечение стабильности напряжения и частоты при различных нагрузках.

Решение поставленных условий, с одной стороны, обусловлено необходимостью улучшения качества электроэнергии, с другой стороны, исходит из требований стабильности. Обеспечение стабильности в АГ соответствует рабочей точке на линейной части характеристики намагничивания.

Причины изменения выходного напряжения при изменении нагрузки АГ приведены на рис. 3, анализ был проведён с использованием реактивных проводимостей ветвей на основе эквивалентной схемы замещения АГ.

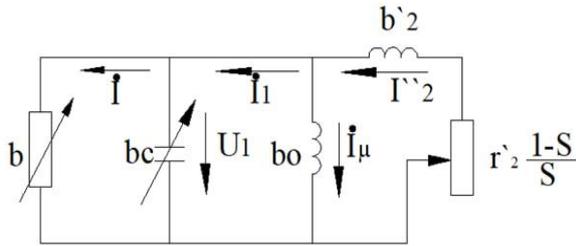


Рис. 3. “Г” образная упрощённая эквивалентная схема замещения АГ

Векторное уравнение токов ветвей следующее:

$$I_1 = I_\mu + (-I_2'') \quad (6)$$

где: I_{00} – ток генератора в режиме холостого хода.

Потери в стали были исключены из учёта, учитывая их малые величины.

Величина напряжения на выходе АГ, зависит от баланса

реактивных проводимостей системы.

1. Если нагрузка АГ имеет активный характер, то реактивная проводимость намагничивающей ветви b_0 , проводимость главной ветви b'_2 и проводимость ветви, состоящей из конденсатора b_c , выражаются следующей связью:

$$b_0 + b'_2 - b_c - b_{\text{воз}} = 0 \quad (7)$$

Из этого следует, что реактивная проводимость намагничивающей ветви b_0 и проводимость основной ветви b'_2 компенсируются проводимостью ветви, состоящей из конденсатора, который является источником реактивной мощности, то есть проводимости b_0 и b'_2 всегда находятся в балансе с b_c и $b_{\text{воз}}$. Выражение вышеуказанного соотношения через реактивные токи:

$$I_\mu = I_K - I_2'' \sin \alpha$$

Из схемы замещения:

$$\left\{ \begin{array}{l} b_0 \approx \frac{1}{X_1} \\ b_2 = \left(\frac{I_2''}{U_1} \right)^2 \cdot \text{Im} \left(\frac{U_1}{I_2''} \right) = \left(\frac{I_2''}{U_1} \right) \cdot \left(\frac{I_2''}{U_1} \right) \cdot \text{Im} \left(\frac{U_1}{I_2''} \right) = \left(\frac{I_2''}{U_1} \right) \cdot \left(\frac{\text{Im} \left(\frac{U_1}{I_2''} \right)}{\left(\frac{U_1}{I_2''} \right)} \right) = \left(\frac{I_2''}{U_1} \right) \cdot \sin \alpha \\ b_c = \omega_1 \cdot C \end{array} \right. \quad (8)$$

(8) выражаем следующим образом: $b_0 = b_c - b_2 \equiv U_1$

$$\frac{I_\mu}{U_1} = \omega_1 \cdot C - \frac{I_2''}{U_1} \sin \alpha \equiv U_1 \quad (9)$$

При этом: угол сдвига фаз между напряжением U_1 и током I_2 :

$$\alpha = \arctg \frac{\text{Im} \frac{U_1}{I_2}}{\text{Re} \frac{U_1}{I_2}} \quad (10)$$

Напряжение генератора зависит от реактивной проводимости намагничивающей ветви b_0 , при $C = \text{const}$, b_0 зависит от нагрузки генератора. Изменение нагрузки вызывает обратное изменение реактивной проводимости намагничивающей ветви.

Таким образом, с увеличением нагрузки усиливается реактивная проводимость основной ветви, а проводимость намагничивающей ветви и напряжение на выводах генератора уменьшаются, и наоборот, снижение нагрузки генератора приводит к обратному результату. При холостом ходе

$I_2 = 0$ и реактивная проводимость намагничивающей ветви достигает наибольшего значения, в результате чего: $b_0 = b_c$, то есть:

$$\frac{I_\mu}{U_1} = \omega_1 C \quad (11)$$

В общем случае баланс реактивных проводимостей выражается следующей формулой:

$$\sum_{k=1}^n b_k = 0 \quad (12)$$

Из этого соотношения баланс реактивных токов в цепях выражается уравнением:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

Из вышеизложенного следует, что алгебраическая сумма реактивных проводимостей системы, состоящей из асинхронного генератора и нагрузки, равна нулю.

2. Если нагрузка АГ имеет смешанный характер, то:

$$b_0 + b_2 - b_c - b_{\text{воз}} \pm b = 0 \quad (13)$$

При этом: b – реактивная проводимость нагрузки, которая может иметь индуктивный ($b > 0$) или емкостной ($b < 0$) характер.

Если нагрузка имеет активно-индуктивный характер, то реактивная проводимость нагрузки:

$$b = \frac{I_L}{U_1} \quad (14)$$

при этом: $I_L = I \cdot \sin\varphi$ – реактивная составляющая тока нагрузки. В этом случае уравнение баланса реактивных проводимостей примет следующий вид:

$$b_0 + b_2 - b_c - b_{\text{воз}} + b = 0 \quad (15)$$

из этого следует: $b_0 = b_c - b_2 - b$, то есть:

$$\frac{I_\mu}{U_1} = \omega_1 C - \frac{I_2}{U_1} \sin\alpha - \frac{I}{U_1} \sin\varphi \quad (16)$$

Величина напряжения на выводах генератора напрямую зависит от реактивной проводимости намагничивающей ветви b_0 и при неизменном значении ёмкости ($C = \text{const}$) изменение нагрузки вызывает изменение b_0 , что, в свою очередь, приводит к изменению напряжения. В частности, увеличение проводимости основной ветви и нагрузки приводит к снижению напряжения, и наоборот, их уменьшение вызывает повышение напряжения.

Из этого следует, что при постоянной частоте вращения ротора автономного АГ и постоянной ёмкости конденсатора, величина Э.Д.С E_1 , возникающая в обмотке статора, зависит от величины и характера нагрузки.

При $f_1 = \text{const}$ и $C = \text{const}$ увеличение нагрузки АГ приводит к снижению Э.Д.С E_1 , а также вызывает повышение падения напряжения в статоре, что, в свою очередь, приводит к снижению напряжения на выводах АГ.

Снижение Э.Д.С E_1 возникает из-за ослабления основного магнитного потока.

Также при постоянной частоте вращения ротора ($\omega = \text{const}$) увеличение нагрузки генератора приводит к увеличению скольжения s , что, в свою

очередь, вызывает снижение выходной частоты f_l , и, соответственно, небольшое снижение Э.Д.С E_l .

Ослабление основного магнитного потока вызвано влиянием вторичного тока, который демагнетизирует увеличением реактивной составляющей нагрузки и уменьшением ёмкостного тока.

Из вышеизложенного следует, что напряжение на выходе АГ при постоянной частоте вращения ротора определяется проводимостью намагничивающей ветви b_0 , поэтому обеспечение постоянства напряжения зависит от следующего условия:

$$b_0 = b_c - b_{\text{воз}} - (b'_2 \pm b) = \text{const} \quad (17)$$

Таким образом, при активной-индуктивной нагрузке:

$$b_0 = b_c - b_{\text{воз}} - (b'_2 + b) = \text{const} \quad (18)$$

при активной нагрузке:

$$b_0 = b_c - b_{\text{воз}} - b'_2 = \text{const} \quad (19)$$

Реактивная проводимость b_c соответствует реактивной мощности конденсаторов, то есть:

$$Q_K = m_1 \omega_1 C U_\phi^2 \quad (20)$$

где: C , U_ϕ - ёмкость конденсаторов и фазное напряжение. Из этого выражения следует, что обеспечение необходимой реактивной мощности для АГ с различной нагрузкой может быть достигнуто путём регулирования ёмкости конденсаторов C или напряжения U_ϕ .

Вторая глава диссертации, озаглавленная «Исследование зависимости изменения напряжения и частоты АГ от нагрузки на основе имитационной модели», посвящена исследованию имитационной модели станции состоящей из асинхронного генератора в автономном режиме, имитационной модели параллельной работы синхронного генератора и АГ в автономном режиме, а также исследованию зависимости частоты тока ротора от активной нагрузки для АГ с различной номинальной мощностью.

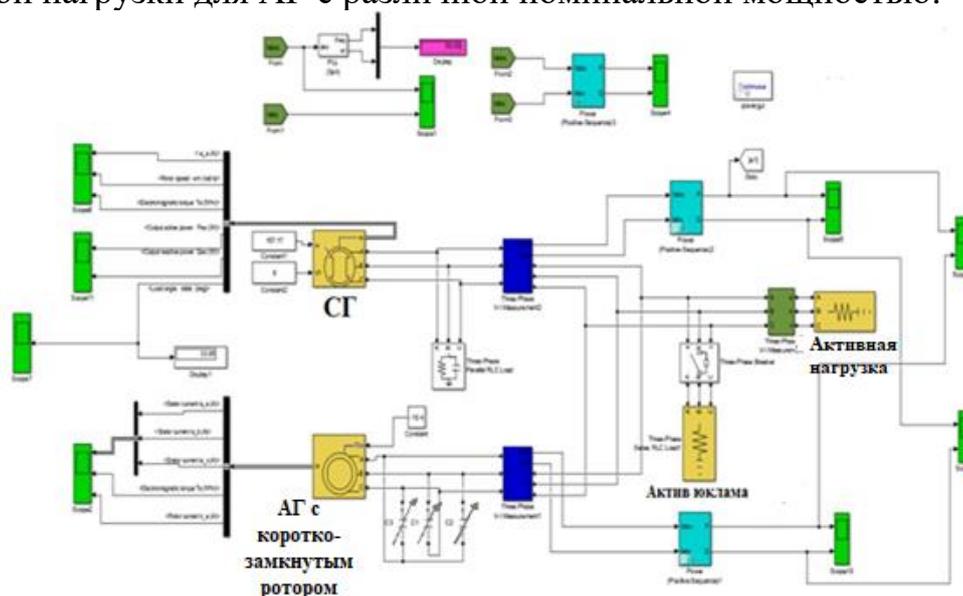


Рис. 4. Имитационная модель станции, состоящей из параллельно работающих АГ и СГ, в автономном режиме с подключенной активной нагрузкой

Соответствующие изменения выходных режимных параметров во времени для станции, состоящей из АГ и СГ с активной нагрузкой, приведены на следующих осциллограммах:

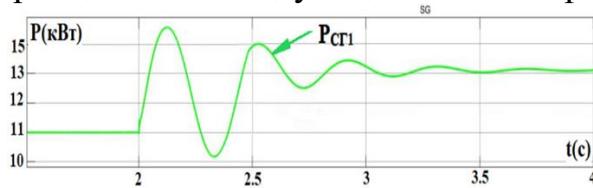


Рис. 5. Активная мощность на выходе СГ – $P_{СГ}$

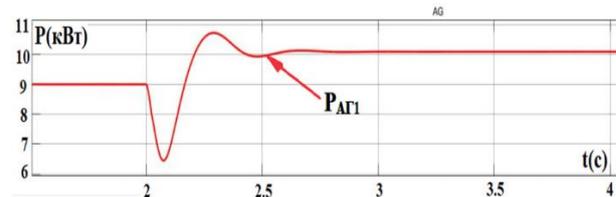


Рис. 6. Активная мощность на выходе АГ – $P_{АГ}$

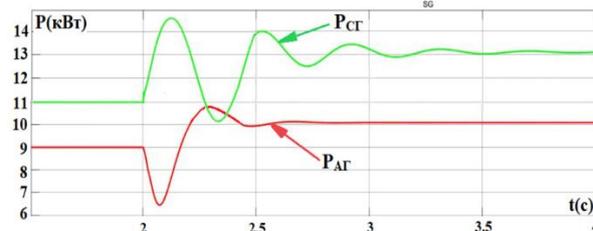


Рис. 7. Активные мощности на выходе СГ и АГ – $P_{СГ}$, $P_{АГ}$

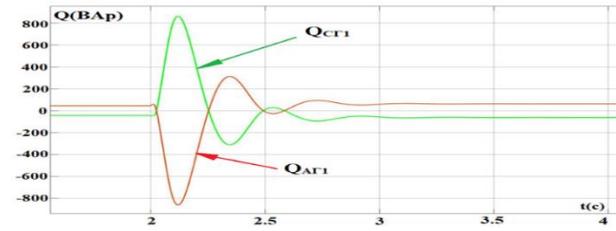


Рис. 8. Реактивная мощность на выходе СГ и АГ – $Q_{СГ}$, $Q_{АГ}$

При воздействии внешнего возмущения на станцию, с СГ и АГ, на основе угловой характеристики СГ, $P_{СГ}=(E_q \cdot U) \cdot \sin \delta / X_0$ возникает колебание на роторе СГ, в результате чего колебания $P_{СГ}$ и $\delta_{Г}$ изменяются в одну сторону, что приводит к снижению напряжения на шине генератора с увеличением мощности. Так как активная мощность АГ пропорциональна квадрату напряжения на шине, её снижение приводит к уменьшению мощности, передаваемой АГ. На приведённых осциллограммах изображены колебания режимных параметров в переходных процессах для станции, состоящей из СГ и АГ с подключенной активной нагрузкой, при этом продолжительность колебания составляет 0,2 секунд. Одновременно с затуханием режимных параметров АГ снижается колебания ротора СГ и мощности. Таким образом, благодаря тому, что максимумы мощностей генераторов изменяются в противофазах, колебания режимных параметров в переходных процессах были устранены не доходя до шины станции, и было установлено, что параллельно работающие СГ и АГ образуют саморегулирующуюся систему.

В третьей главе диссертации, озаглавленной «**Экспериментальные исследования влияния нагрузки АГ на выходные напряжения и частоту**» приведены зависимости напряжения и частоты от нагрузки АГ без автоматического регулятора, значение микропроцессорного регулятора реактивной мощности в стабилизации режимных параметров АГ, результаты экспериментов по изменению режимных параметров в переходных процессах при возбуждении АГ и подключении нагрузок.

Для удовлетворения нужды в электроэнергии потребителей новых экономических зон а также объектов народного хозяйства нашей республики, расположенных на значительном расстоянии от энергосистемы, широкое использование автономных режимов работы самовозбуждающихся

асинхронных генераторов и подключаемые к их статорной обмотке конденсаторные батареи для питания реактивной мощности является одним из наиболее эффективных средств в обеспечении потребностей в электроэнергии.

Результаты исследования были получены и проанализированы экспериментальным методом на испытательном стенде, состоящем из асинхронного двигателя (АД) и асинхронного генератора (АГ), установленного в кафедре “Электроэнергетика” Каракалпакского государственного университета.

В качестве первичного двигателя установлен АД мощностью 7,5 кВт с частотой вращения 1500 об/мин, а в качестве АГ использована короткозамкнутая традиционная роторная асинхронная машина мощностью 4 кВт, с частотой вращения 1500 об/мин и номинальным напряжением 380 В.

В схеме запуска АГ обеспечение его возбуждения при малых значениях ёмкости достигается подключением конденсаторных батарей к статорной обмотке по треугольной схеме.

В процессе проведения исследования на кафедре «Электроэнергетика» была разработана и внедрена экспериментальная установка автоматического регулирования реактивной мощности (УАРРМ), состоящая из контакторов и микропроцессора. За счет автоматической регулировки емкости конденсаторных батарей с помощью контакторов обеспечено поддержание выходного напряжения АГ на уровне номинального, независимо от величины нагрузок. Основным элементом устройства является регуляторный блок (PFR-12 power factor relay-12).

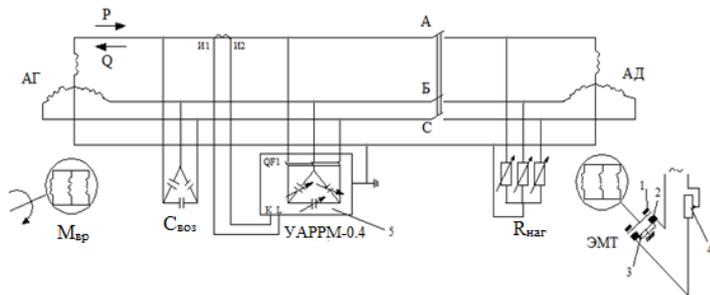


Рис. 9. Автоматическая схема регулировки, обеспечивающая неизменность выходного напряжения асинхронного генератора при различных нагрузках:

- 1-стальной сердечник, 2-обмотка, 3-неподвижный диск, 4-реостат, 5- управляющий элемент автоматической регуляторной системы, состоящей из контакторов и микропроцессора

Эксперимент по исследованию влияния нагрузки АГ на выходное напряжение и частоту был проведен в следующем порядке: в начале, после запуска АГ мощностью 4 кВт без нагрузки, для достижения номинального напряжения 380 В был подключен фазный конденсатор с ёмкостью $C_{воз} = 17$ мкФ, значения которой определено расчетным путем. В холостом ходу выходная

частота АГ составила $f = 50$ Гц.

После запуска АГ с постоянной емкостью ($C_{воз} = 17$ мкФ = const) в результате проведённого эксперимента было установлено, что до активной

нагрузки величиной $P = 1,2$ кВт выходное напряжение и частота АГ остаются неизменными (рис. 10):

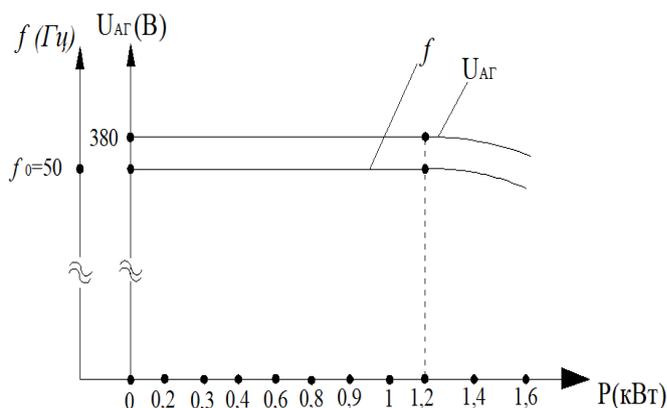


Рис. 10. График зависимости выходного напряжения и частоты АГ от активной нагрузки, при запуске АГ с номинальным напряжением

Учитывая номинальную мощность выбранной АМ и её валовую механическую мощность 4 кВт, электрическая мощность АГ вычисляется по формуле $P_{АГ} = P_{МЕХ} \cdot \eta = 4 \text{ кВт} \cdot 0,86 = 3,44$. Из приведенного графика видно, что при нагрузке АГ до 30% от номинальной нагрузки значения выходного напряжения и частоты остаются неизменными, то есть сохраняется равенство номинальному напряжению и

номинальной частоте.

Затем к выходу АГ был подключен УАРРМ, и был проведён эксперимент по зависимости выходного напряжения и частоты от активной нагрузки. График зависимости для этого эксперимента представлен на рис. 11.

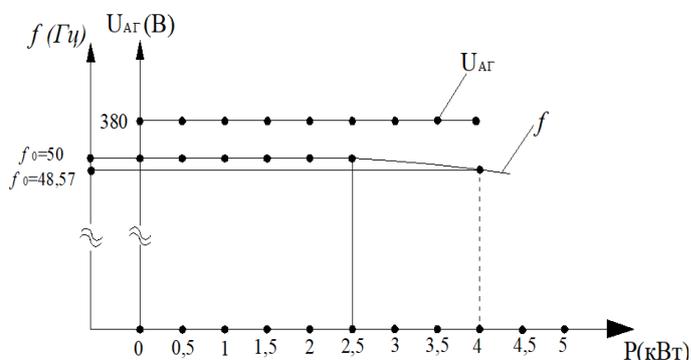


Рис. 11. График зависимости напряжения и частоты АГ с УАРРМ от активной нагрузки

Из графика видны, что при увеличении активной нагрузки до 4 кВт, подключенной к выходу АГ, благодаря УАРРМ, выходное напряжение остаётся неизменным на уровне номинального значения, а выходная частота сохраняется на уровне $f = 50$ Гц до нагрузки 2,5 кВт. Из этого следует, что УАРРМ

оказывает положительное влияние на сохранение частоты, в частности, при нагрузке АГ до 70 процентов от номинальной (2,5 кВт/3,44 кВт) его частота остаётся неизменной на уровне $f = 50$ Гц, а при нагрузке 4 кВт частота составляет $f = 48,57$ Гц.

Следующий эксперимент был проведён с подключением к выходу АГ с УАРРМ смешанной нагрузки, состоящей из АД мощностью 1,5 кВт и активной нагрузки мощностью 3,9 кВт. Нагрузка АД увеличивалась с помощью электромагнитного тормоза (ЭМТ), подключённого к его ротору.

В рамках данного эксперимента график зависимости напряжения и частоты АГ от комбинированной нагрузки, то есть нагрузки, состоящей из полной мощности АГ - S , представлен на рис. 12.

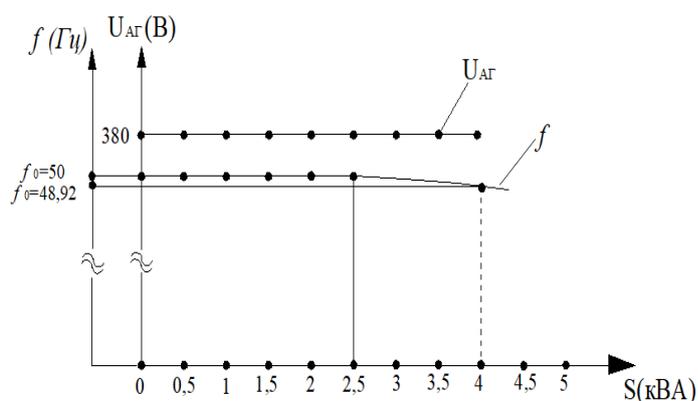


Рис. 12. График зависимости напряжения и частоты АГ с УАРРМ от смешанной (активной и индуктивной) нагрузки

активной и смешанной нагрузки частота при смешанных нагрузках уменьшается в меньшей степени по сравнению с активной нагрузкой.

Ниже приведены осциллограммы, отражающие переходные процессы значений напряжения АГ при его запуске и подключении различных нагрузок.

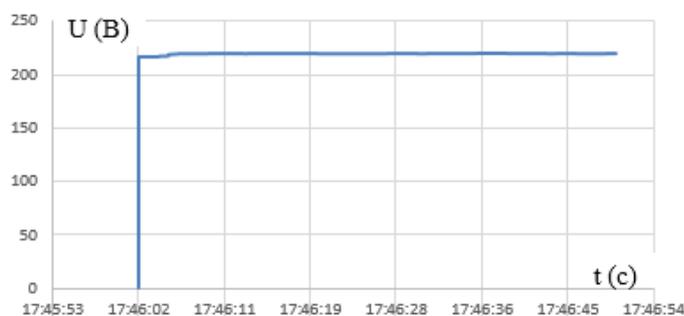


Рис. 13. Осциллограмма процесса возбуждения АГ мощностью $P=4$ кВт в режиме холостого хода ($C_{воз}=17$ мкФ)

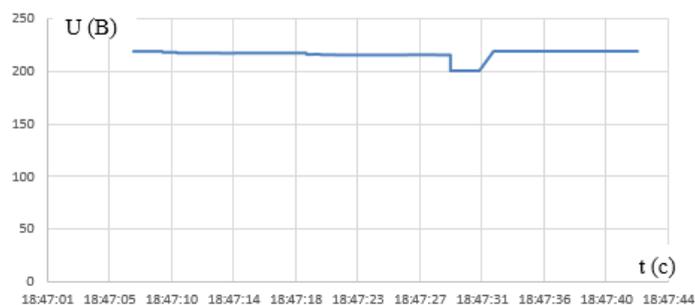


Рис. 14. Осциллограмма изменения выходного напряжения при последовательном подключении активных нагрузок мощностью 0,45 кВт, 0,9 кВт и 3 кВт к АГ с автоматическим регулятором УАРРМ

Из графика видны, что при увеличении нагрузки, подключённой к выходу АГ до 4 кВА, благодаря УАРРМ, как и в предыдущем эксперименте, выходное напряжение остаётся неизменным, а частота сохраняется на уровне $f = 50$ Гц до нагрузки 2,5 кВА. При нагрузке АГ 4 кВА, частота составила $f = 48,92$ Гц.

Из этого следует, что при одинаковых величинах

при одинаковых величинах

Из рисунка 13 видно, что в процессе прямого возбуждения АГ фазное напряжение на его выходе стабилизируется на уровне $U = 220$ В.

Из рисунка 14 видны, что при подключении трёхфазной активной нагрузки до 4 кВт к выходу АГ, благодаря автоматическому регулятору, состоящему из контакторов и микропроцессора, выходное напряжение остаётся неизменным на уровне номинального значения. Из осциллограммы видны, что при подключении нагрузки 3 кВт к выходу АГ фазное напряжение в течение 3 секунд снизилось до 200 В,

после чего было восстановлено благодаря автоматическому регулятору, состоящему из контакторов и микропроцессора.

Из вышеизложенного следует, что благодаря использованию УАРРМ, даже при изменении величины или характера нагрузки АГ, после завершения переходного процесса выходное напряжение остаётся неизменным, а частота до 70 % от номинальной нагрузки сохраняется на уровне $f = 50$ Гц.

Четвертая глава диссертации под названием «**Исследование электромеханических колебаний в электроэнергетических системах с асинхронными генераторами**» посвящена рассмотрению математической модели элементов электроэнергетической системы, состоящей из АГ и СГ, работающих на систему с бесконечной мощностью, линеаризованных уравнений элементов исследуемой системы, влияния АГ на частотную характеристику электрических систем, а также анализу технико-экономических показателей микроГЭС, состоящих из АГ короткозамкнутых роторов и СГ, работающих в автономном режиме.

Исследование колебательных характеристик электроэнергетической системы (ЭЭС), включающей АГ, проведено на основе уравнений Парка–Горева, представленных в d - q координатах. Уравнения вращающихся элементов выражены в их собственных осях, а статические элементы — линии передачи, нагрузки и другие — описаны в системе относительных единиц, приведённых к оси СГ, выбранной в качестве ведущей с произвольной скоростью вращения.

Приведём уравнения элементов ЭЭС по отдельности:

Синхронный генератор:

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{d\Psi_{dc}}{dt} - \frac{\Psi_{qc}d\delta}{dt} - i_{dc}r_c \\
 U_q &= \frac{d\Psi_{qc}}{dt} - \frac{\Psi_{dc}d\delta}{dt} - i_{qc}r_c \\
 0 &= r_{1dc}i_{1dc} + \frac{d\Psi_{1dc}}{dt} \\
 &\dots\dots\dots \\
 0 &= r_{1qc}i_{1qc} + \frac{d\Psi_{1qc}}{dt} \\
 &\dots\dots\dots \\
 \frac{T_{jc}d^2\delta}{dt^2} &= M_T - M_C \\
 \Psi_d &= x_{ad}(\sum i_{ndc} + i_f) - i_{dc}x_d \\
 \Psi_q &= x_{aq}\sum i_{nqc} - i_{qc}x_q \\
 \Psi_f &= x_{ad}(\sum i_{ndc} - i_{dc}) + i_f x_f \\
 \Psi_{CO} &= L_0 i_{CO} \\
 \Psi_{1d} &= x_{1d}i_{1dc} + x_{ad}(\sum i_{ndc} + i_f - i_{dc}) \\
 \Psi_{1q} &= x_{1q}i_{1qc} + x_{aq}(\sum i_{nqc} + i_f - i_{qc}) \\
 &\dots\dots\dots
 \end{aligned} \tag{21}$$

Асинхронный генератор:

$$U_d = \frac{d\Psi_{dA}}{dt} - \Psi_{qA}\omega_K - i_{dA}r_s \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
U_q &= \frac{d\Psi_{qA}}{dt} - \Psi_{dA}\omega_K - i_{qA}r_s \\
U_0 &= \frac{d\Psi_{A0}}{dt} + i_{A0}r_s \\
0 &= \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - (S_K - S_a)\Psi_{qr} + i_{dr}r_r \\
0 &= \frac{d\Psi_{qr}}{dt} - (S_K - S_a)\Psi_{dr} + i_{qr}r_r \\
\frac{T_{jA}dS_A}{dt} &= M_{TA} - M_A \\
\Psi_{dA} &= x_m \sum i_{rnd} - x_s i_{dA} \\
\Psi_{qA} &= x_m \sum i_{rnq} - x_s i_{qA} \\
\Psi_{A0} &= L_{A0} i_{A0} \\
\Psi_{rd1} &= x_{1d} i_{r1d} + x_m (\sum i_{rnd} - i_{dA}) \\
&\dots\dots\dots \\
\Psi_{rq1} &= x_{1q} i_{r1q} + x_m (\sum i_{rnq} - i_{qA}) \\
&\dots\dots\dots
\end{aligned}$$

В приведённых выше уравнениях введены следующие обозначения: $U_d, U_q, \Psi_{dc}, \Psi_{qc}, \Psi_{dA}, \Psi_{qA}$ - продольные и поперечные составляющие напряжений и потокосцеплений статоров СГ и АГ; r_s, r_c, r_f - активные сопротивления СГ и АГ, а также их возбуждательных обмоток; r_{1dc}, r_{1qc} - активные сопротивления демпферных обмоток СГ по осям d и q.

$\Psi_f, \Psi_{nd}, \Psi_{nq}, \Psi_{rnd}, \Psi_{rnq}$ - потокосцепление обмоток возбуждения и эквивалентных замкнутых контуров роторов СГ и АГ; $i_f, i_{dc}, i_{qc}, i_{dA}, i_{qA}$ - ток возбуждения СГ, составляющих продольные и поперечные компоненты токов обмоток машины; $i_{ndc}, i_{nqc}, i_{rnd}, i_{rnq}$ - составляющие продольные и поперечные компоненты токов в роторе генератора с короткозамкнутым ротором; $x_a, x_q, x_f, x_{1d}, x_{1q}, x_{ad}, x_{aq}$ - общее индуктивное сопротивление статорных и демпферных контуров, а также возбуждающего обмотка и взаимное индуктивное сопротивление статорных и роторовых обмоток СГ по осям d и q; $x_s = x_m + x_{se}, x_{1d} = x_{1q} = x_m + x_{re}, x_{rd} = x_{rnq} = x_m + x_{rnde}$ - общее индуктивное сопротивление, а также общее взаимное индуктивное сопротивление контуров статора и ротора по осям d и q, а также соответствующее сопротивление рассеяния контуров АГ (x_{se} - статор, $x_{re} = x_{rnde} = x_{rnqe}$ - ротор), где параметры с индексом 0 - элементы нулевой последовательности; T_{jc}, T_{jA} - инерционные постоянные генераторов; δ, S_A - в режиме генератора положительно принятый угол нагрузки СГ и скольжение АГ; S_K - смещение оси, принятое в качестве ведущей; M_{TC}, M_{TA} - моменты турбинных агрегатов; M_C, M_A - электромагнитные моменты, определяемые следующими формулами:

- для СГ:

$$M_C = X_{ad} [i_{qc}(i_f + i_{1d}) - i_{dc}i_{1qc}] (1 + S_K) \quad (23)$$

- для АГ:

$$M_A = X_m [i_{qA}i_{dr} - i_{dA}i_{qr}] (1 + S_K) \quad (24)$$

В некоторых случаях используется общепринятая формула:

$$M = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d \quad (25)$$

Уравнения статических элементов.

Линия электропередачи:

$$\begin{aligned} U_{dm} &= U_{dn} + r_L i_{ld} + \frac{x_L di_{ld}}{dt} - x_L i_{lq} (1 + S_K) \\ U_{qm} &= U_{qn} + r_L i_{lq} + \frac{x_L di_{lq}}{dt} - x_L i_{ld} (1 + S_K) \\ U_{m0} &= U_{n0} + r_L i_{l0} + \frac{x_{L0} di_{l0}}{dt} \end{aligned} \quad (26)$$

Нагрузка:

$$\begin{aligned} U_{dm} &= r_H i_{nd} + \frac{x_H di_{nd}}{dt} - x_H i_{nq} \cdot (1 + S_K) \\ U_{dm} &= r_H i_{nq} + \frac{x_H di_{nq}}{dt} - x_H i_{nd} \cdot (1 + S_K) \\ U_{m0} &= r_H i_{n0} + \frac{x_H di_{n0}}{dt} \end{aligned} \quad (27)$$

Шунтирующий реактор:

$$\begin{aligned} U_{dm} &= \frac{x_p di_{pd}}{dt} - x_p i_{pq} \cdot (1 + S_K) \\ U_{qm} &= \frac{x_p di_{pq}}{dt} - x_p i_{pd} \cdot (1 + S_K) \\ U_{dm} &= \frac{x_p di_{p0}}{dt} \end{aligned} \quad (28)$$

Поперечная емкость:

$$\begin{aligned} \frac{dU_{dm}}{dt} + U_{qm}(1 + S_K) &= x_c i_d \\ \frac{dU_{qm}}{dt} + U_{dm}(1 + S_K) &= x_c i_q \\ U_{m0} &= \frac{1}{C_0} \int i_0 dt \end{aligned} \quad (29)$$

В качестве системы относительных единиц использовалась система X_{ad} . В этой системе относительных единиц базовый ток статора равен амплитуде номинального фазного тока статора, базовое напряжение - амплитуде номинального фазного напряжения, а базовая угловая частота - синхронной угловой частоте. Оставшиеся базовые величины определяются на основе вышеуказанных.

Когда СГ и АГ работают параллельно на одной станции, активная мощность в начале линии определяется следующим образом:

$$P_L = P_C + P_A - P_H \quad (30)$$

P_C, P_A - соответственно, активная мощность СГ и АГ;

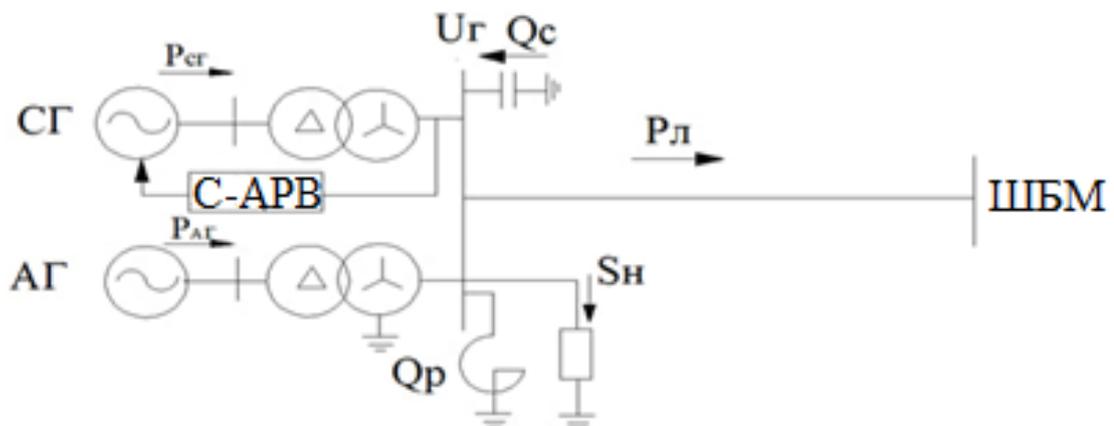


Рис. 15. Схема параллельной работы АГ и СГ на ШБМ на станции

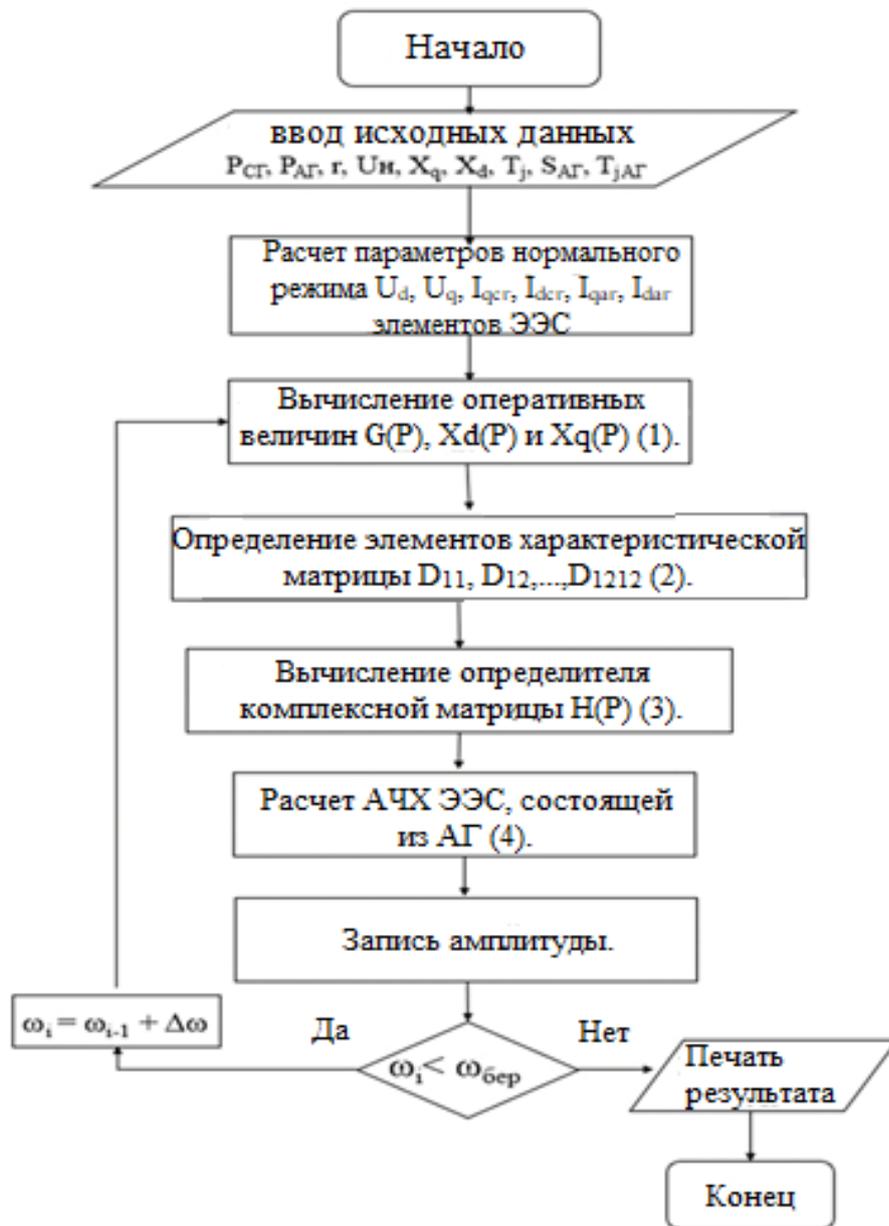


Рис. 16. Блок-схема вычислительной программы

Известно, что все СГ в современных ЭЭС оборудованы устройствами автоматического регулирования возбуждения (АРВ). Их основная задача заключается в поддержании напряжения на шинах синхронных генераторов на требуемом уровне, увеличении передаваемой мощности, обеспечении сохранения статической и динамической устойчивости, а также в подавлении электромеханических колебаний, возникающих под воздействием различных возмущений.

Для следующих 3 случаев, состоящих из СГ и АГ на электростанции, были определены изменения частоты и амплитуды электромеханических колебаний по их рассчитанным амплитудно-частотным характеристикам (рис. 17), и проведен анализ:

1. станция состоит только из СГ;
2. станция состоит из СГ и АГ;
3. станция состоит только из АГ.

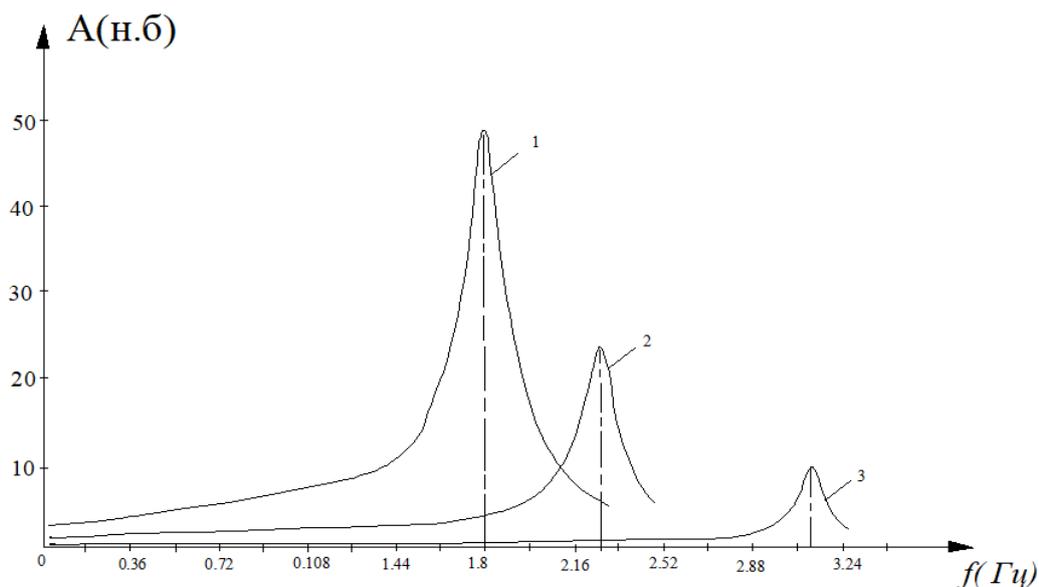


Рис. 17. Амплитудно-частотные характеристики ЭЭС, состоящей из СГ и АГ:

1. Станция состоит только из СГ; 2. Станция состоит из параллельно работающих СГ и АГ; 3. Станция состоит только из АГ

Из характеристик видны, что при неизменном количестве активной мощности, передаваемой через электрическую линию, с увеличением доли АГ на станции амплитуда электромеханических колебаний, возникающих в ЭЭС под воздействием внешних возмущений, уменьшается, а при полном замещении СГ на станции АГ, колебания практически не наблюдаются.

Приведенные характеристики свидетельствуют о наличии у АГ свойств гашения электромеханических колебаний, о невозможности передачи колебаний в ЭЭС, а также об отсутствии риска выхода из синхронизма в системе.

Из вышеупомянутых амплитудно-частотных характеристик ЭЭС следует подчеркнуть, что с введением АГ в состав станции наблюдается сдвиг значения резонансной частоты системы в сторону её увеличения. Например, резонансная частота станции, состоящей только из АГ, примерно в два раза выше, чем у станции, состоящей только из СГ, что способствует предотвращению аварий системы, вызванных низкочастотными слабыми колебаниями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований, проведенных в диссертации доктора философии (PhD) на тему «Исследование режимов АГ с короткозамкнутым ротором», представлены следующие выводы:

1. Схема регулирования параметров АГ была предложена с введением ветви с переменной ёмкостью конденсатора. В результате была создана возможность анализа стабильности выходного напряжения генератора при любых нагрузках.

2. Была разработана имитационная модель станции в автономном режиме, состоящей из АГ и СГ. В результате было установлено, что

электромеханические колебания, возникающие в АГ и СГ под воздействием внешних факторов, изменяются в противоположных фазах, что позволило выяснить, что участие АГ в станции является естественным демпфером для электромеханических колебаний.

3. Предложено подключение микропроцессорного УАРРМ с конденсаторными батареями к АГ в автономном режиме и использование его напряженческого канала. В результате была создана возможность обеспечения неизменности выходного напряжения генератора при любой нагрузке, поддерживая его на номинальном уровне.

4. Из эксперимента установлено, что при запуске АГ с номинальным напряжением до 30% нагрузки, благодаря применению микропроцессорного УАРРМ, напряжение остается неизменным при различных изменениях величины и характера нагрузки. Кроме того, обеспечена стабильность частоты АГ до 70% нагрузки.

5. Результаты исследования были внедрены в сеть розничных потребителей, обеспечиваемых Хорезмским региональным филиалом АО “Региональные электрические сети”. Ожидаемый экономический эффект от внедрения научных результатов в практику составляет 155 520 000 (сто пятьдесят пять миллионов пятьсот двадцать тысяч) сум в год.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING DEGREE OF DOCTOR OF
SCIENCE DSc.03/10.12.2019.T.03.03 AT TASHKENT STATE
TECHNICAL UNIVERSITY NAMED AFTER ISLAM KARIMOV**

KARAKALPAK STATE UNIVERSITY NAMED AFTER BERDAKH

SEITMURATOV BAYRAMBAY TURGANBAEVICH

**STUDY OF THE MODES OF AN ASYNCHRONOUS GENERATOR
WITH A SQUIRREL-CAGE ROTOR**

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

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

Tashkent – 2024

The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) in technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science, and Innovations of the Republic of Uzbekistan under number B2021.1.PhD/T2108.

The dissertation has been prepared at Karakalpak State University named after Berdakh.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian and english (resume)) on the website (www.tdtu.uz) and on the website of «ZiyoNet» Information and education portal (www.ziynet.uz).

Academic leader: **Bobojonov Yunus Matrizayevich**
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Official opponents: **Bobojanov Makhsud Kalandarovich**
Doctor of technical sciences, professor

Mirzaev Abdurashid Tukhtasinovich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Leading organization: **Tashkent State Transport University**

The defense of dissertation will take place on “__” ____ 2024 at ____ o'clock at a meeting of the Scientific council No. DSc.03/10.12.2019.T.03.03 under Tashkent State Technical University named after Islam Karimov. Address: 100095, Tashkent, Universitet st., 2. Tel./fax: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32, e-mail: tstu_info@tdtu.uz.

The doctoral dissertation can be reviewed at the Information-resource center of Tashkent State Technical University named after Islam Karimov (is registered number No____). Address: 100095, Tashkent, Universitet st., 2. Tel.: (99871) 227-03-41.

Abstract of the dissertation sent out on “__” ____ 2024

(Protocol of the delivery No _____ dated “__” _____ 2024)

K.R.Allaev
Chairman of Scientific Council
on awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Professor Academician

I.U.Rakhmonov
Scientific secretary of scientific council
on awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Sciences, Professor

T.Sh.Gayibov
Chairman of scientific seminar under scientific council
for awarding scientific degrees
Doctor of Technical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

Relevance and necessity of the dissertation topic. In the modern world, special attention is paid to the issues of conserving existing energy resources, the rational use of renewable energy sources (RES), and the development of new alternative energy sources. Currently, according to the «2020 Key Performance Indicators Review for developed countries, the highest shares of renewable energy usage are observed in Sweden (60,1% of energy consumption), Finland (43,8%), and Latvia (42,1%). The primary sources of energy production in these countries include hydropower plants, wind power plants, and biomass processing». In this field, particular attention is paid to increasing the requirements for the structural simplicity of power sources for autonomous systems, ease of maintenance, relatively low weight (kVA/kg) and volume, as well as the stability of output parameters under operating conditions.

In developing countries, scientific research and projects related to the use of autonomous power supply systems have so far been primarily focused on asynchronous generators (AG) with a wound rotor. In this area, priority is given to research focused on the reliability of power supply to consumers, particularly with respect to devices used as energy sources. At the same time, a key factor in meeting the electricity demands of consumers is scientific research aimed at producing electricity using unconventional methods. In these countries, renewable energy sources (RES) accounts for 30-40% of the total electricity volume, whereas in our country this figure stands at 10-12%. Given the goal of increasing the share of RES to 40% by 2030, research in this area remains a pressing task.

The purpose of the study. Study the operating modes of an asynchronous generator with a short-circuit rotor and to improve the output voltage control system.

Research objectives:

the scheme for regulating the parameters of the asynchronous generator has been improved by incorporating a branch consisting of a variable capacitor into the circuit;

develop a simulation model for studying the changes in the parameters of the mode in the autonomous mode and in the parallel mode of operation of the synchronous generator and the asynchronous generator at the station depending on the load and capacitance of the capacitor;

improvement by applying a device for automatic regulation of capacitors, which ensures the stability of the output voltage of the AG operating autonomously at different load values;

experimental determination of voltage and frequency changes in an experimental test stand consisting of an asynchronous generator depending on the magnitude and nature of the load.

The object of the study was an AG operating parallel to the SG in an autonomous and infinite power system.

The subject of research is the mathematical model of an AG operating on an

infinite power system, the simulation model in the Matlab program, and the experimental model.

Research methods. To solve the tasks set, the research employed methods of analyzing the established and transient modes of electric power systems based on the Park-Goryev equations and experimental stand and simulation model.

The scientific novelty of the research is:

in the modes of autonomous operation of the asynchronous generator and its parallel operation with the synchronous generator, a method has been developed to ensure the stability of the station's tire voltage based on connecting the corresponding capacitor for any loads connected to the tire;

based on the introduction of a branch with variable capacitance of the capacitor, the substitution scheme of the asynchronous generator was improved, and it was possible to analyze the provision of the output voltage stability under variable loads;

based on the use of a microprocessor-based reactive power automatic control device voltage channel, it is justified to maintain the asynchronous generator voltage at nominal values under variable loads;

based on the development of a microprocessor automatic control device, the stability of the output voltage at any characteristic load of the asynchronous generator with an output frequency of up to 70% of the load is justified.

The scope and structure of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The total volume is 119 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Бобожонов Ю.М., Ушаков В.Я., Хакимов Т.Х. Сейтмуратов Б.Т. Исследования колебательных свойств и частотных характеристик электроэнергетических систем, содержащих асинхронные турбогенераторы // Монография, Моя строка - Россия, Санкт-Петербург, 2021. – 74 с.

2. Y.M. Bobojonov, K.M. Reymov, B.T. Seitmuratov. Asynchronous turbogenerator with a massive rotor with short-closed copper cells as a natural damper of electromechanical oscillations and a reliable source of Active Power // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. India, 2023. Vol. 10, Issue 7, July 2023. ISSN: 2350-0328. PP. 20819-20824. (05.00.00; №8).

3. Ю.М. Бобожонов, К.М. Реймов, Б.Т. Сейтмуратов. Асинхрон генератор чиқишидаги кучланиш ва частотанинг актив юкламага боғлиқлигини тажрибавий таҳлили // «Энергия ва ресурс тежаш муаммолари» Илмий-техника журнали. Тошкент, 2022. -№ 83. 102-106 б (05.00.00; №21).

4. Ю.М. Бобожонов, К.М. Реймов, Б.Т. Сейтмуратов. Қисқа туташган роторли асинхрон генератор режим параметрлари ўзгаришларининг алмаштириш схемаси асосидаги таҳлили // «Энергия ва ресурс тежаш муаммолари» Илмий-техника журнали. Тошкент, 2022. № 41. 369-375 б (05.00.00; №21).

5. Y.M. Bobojonov, K.M. Reymov, B.T. Seitmuratov. Asynchronous generator with automatic reactive power controller // Science and Education in Karakalpakstan. Nukus, 2023. №2/2 (33). pp. 43-46.

6. К.М. Реймов, Ю.М. Бобожонов, Б.Т. Сейтмуратов. Шамол электр станциялари электр таъминоти барқарорлиги ва тежамкорлигини таъминлашда қисқа туташган роторли асинхрон генератордан фойдаланишнинг аҳамияти // «Энергия ва ресурс тежаш муаммолари» Илмий-техника журнали. Ташкент, 2023. - № 84. С. 305-313 (05.00.00; №21).

II бўлим (Часть II; PartII)

7. Bobojonov Y.M., Seitmuratov B.T., Muxambetaliev R.Q., Ernazarov M.N. Elektr stantsiyadagi sinxron generator rotorini chayqalishlarining tabiiy so'ndirilishini stantsiya tarkibiga asinxron generatorni parallel ulab ishlatish orqali ta'minlash uchun dastur «Zatux_vib» // Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги интеллектуал мулк агентлиги № DGU 24754 11.04.2023.

8. Bobojonov Y.M., Reymov K.M., Seitmuratov B.T. Avtonom rejimda ishlayotgan qisqa tutashgan rotorli asinxron generator reaktiv quvvat iste'molini avtomatik roslash orqali kuchlanish o'zgarishligini ta'minlash uchun dastur

«U_CONST» // Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги интеллектуал мулк ағетлиги № DGU 24755 11.04.2023.

9. Bobojonov Y.M., Seitmuratov B.T., Najmatdinov R. K., Berdanov T.T., Asinxron turbogeneratorlardan iborat elektr tizimning amplituda – chastotaviy xarakteristikasini aniqlash uchun dastur. «ATG_ACH» // Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги ҳузуридаги интеллектуал мулк ағетлиги № DGU 29421 07.09.2023.

10. Yu. Bobozhonov, B. Seitmuratov, B. Fayzullaev and A. Sulstonov. Study of the influence of different designs of massive rotor of asynchronous generator on their maximum power // E3S Web of Conf. Volume 216. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems”. (RSES 2020). doi: 10.1051/e3sconf/202021601177.

11. Yu.M. Bobozhonov, K. M. Reymov, B. Seitmuratov and T.Kh. Khakimov. Research of the dependence of the resistance of asynchronous generators with massive rotors on their design // E3S Web of Conf. Volume 216. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems”. (RSES 2020). doi: 10.1051/e3sconf/202021601168.

12. Yunus Bobojonov, Bayram Seytmuratov, A N Sultanov, Bayram Fayzullaev and Husanov Shahobiddin Hayrullo oglu. Calculated studies of the vibrational properties of the mode parameter of the electric power system containing asynchronous turbogenerators by their frequency characteristics // E3S Web of Conf. Volume 289. International Conference of Young Scientists “Energy Systems Research 2021”. (RSES 2021). doi: 10.1051/e3sconf/202128907025.

13. Бобожонов Ю.М., Хазратов И. Х., Сейтмуратов Б.Т. Асинхрон генераторга уланган аралаш юклама микдори узгаришининг генератор чиқиш кучланишига таъсири тахлили // «Иқтисодий ва рақамлаштириш шароитларида энергетиканинг долзарб муаммолари» мавзусидаги халқаро илмий-амалий конференция. -Бухоро: 24-26 ноябр 2022 й. БухИТИ, 2022. 505-507 бетлар.

14. Ю.М. Бобожонов, Б.Т. Сейтмуратов, Т. Берданов. Автоном режимда ишлаётган қисқа туташган роторли асинхрон генераторнинг matlab дастурий таъминоти асосидаги модели // Международная научно-техническая конференция “Актуальные проблемы системы электроснабжения”. - Тошкент: 11-12 ноября 2020 г. ТошГТУ, 2020. 126-128 с.

15. Бобожонов Ю.М., Сейтмуратов Б.Т., Қуатбаев П.К. Исследование влияния сопротивлений массивного ротора различных конструкций на основные параметры асинхронного турбогенератора // Международная научно-техническая конференция “Актуальные проблемы системы электроснабжения”. - Тошкент: 25-26 ноября 2021 г. ТошГТУ, 2021. 428-429 с.

16. Yu. M. Bobojonov, B.T. Seitmuratov, T.T. Berdanov, B.B.Qalmuratov. Qisqa tutashgan rotorli asinxron dvigateldan shamol generatori sifatida qo'llash istiqbollari // IV Международную научно-техническую конференцию “Актуальные проблемы систем электроснабжения” проводимую 3-4 октября

2024 года совместно Ташкентским государственным техническим университетом им Ислама Каримова и Каракалпакским государственным университете им. Бердаха. – С. 434-435.

17. Бобожонов Ю.М., Сейтмуратов Б.Т., Юлдошов Т., Исмандияров А. Исследование влияния различных конструкций массивного ротора асинхронного генератора на их максимальной мощности // Monografia pokonferencyjna. - Gdańsk, 30- май 2020 г. Warszawa, 2020. 75-78 с.

18. Dots. Bobojonov Y.M., ass. Seitmuratov B.T. SHamol elektr stansiyasida qisqa tutashgan rotorli asinxron generatordan foydalanish istiqbollari // “Energetika sohasini rivojlantirishda muqobil energiya manbalarining roli” mavzusida vazirlik miqyosidagi ilmiy-amaliy konferensiyasi. – Namangan. 21-28-29 aprel 2022 y. NamMQI, 2022. 229-230 b.

19. Бобожонов Ю.М., Сайдходжаев А.Г., Сейтмуратов Б.Т., Куатбаев П.К. Асинхрон генераторни кичик кувватли гидроэлектр станцияларда қўллаш ва унинг энерго тизим турғунлигига таъсири // Физика фанининг техника соҳасидаги тутган ўрни Республика илмий-амалий конференция. - Нукус, 28-май 2021 й. ҚДУ, 2021. 196-197 б.

20. Ю.М.Бобожонов, Б.Т. Сейтмуратов. Қисқа туташган роторли асинхрон машинани генератор ҳолатида ишлатишнинг аҳамияти ва чиқишидаги кучланишнинг юкламага боғлиқлигини модул ва тажриба асосида аниқланган хусусиятлари // “Energiya va resurs tejamkor innovatsion texnologiyalarni rivojlantirishning dolzarb muammolari” Respublika ilmiy-amaliy anjumani. – Qarshi, 23-24- Sentabr 2022 y. QarMII, 2022. 47-51 b.