

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.03/10.12.2019.Т.03.03 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ҚУЁШ ЭНЕРГИЯСИ ХАЛҚАРО ИНСТИТУТИ

МАТЧАНОВ НУРАДДИН АЗАДОВИЧ

**ФОТОЭНЕРГЕТИК ТИЗИМЛАР ВА УЛАРНИНГ ЭЛЕКТР
ТАРМОҒИГА ИНТЕГРАЦИЯСИНИ КОМПЛЕКС ТАДҚИҚ ҚИЛИШ**

05.05.01 - Энергия тизимлари ва мажмуалари

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент - 2020

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of the of Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Матчанов Нураддин Азадович

Фотоэнергетик тизимлар ва уларнинг электр тармоғига интеграциясини комплекс тадқиқ қилиш..... 3

Матчанов Нураддин Азадович

Комплексное исследование фотоэнергетических систем и их интеграции к электрической сети..... 29

Matchanov Nuraddin Azadovich

Comprehensive research of photoenergy systems and their integration into the electrical grid55

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works 59

**ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.03/10.12.2019.Т.03.03 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ҚУЁШ ЭНЕРГИЯСИ ХАЛҚАРО ИНСТИТУТИ

МАТЧАНОВ НУРАДДИН АЗАДОВИЧ

**ФОТОЭНЕРГЕТИК ТИЗИМЛАР ВА УЛАРНИНГ ЭЛЕКТР
ТАРМОҒИГА ИНТЕГРАЦИЯСИНИ КОМПЛЕКС ТАДҚИҚ ҚИЛИШ**

05.05.01 - Энергия тизимлари ва мажмуалари

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент - 2020

Фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий Аттестация комиссиясида №B2019.4.DSc/T324 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси “Қуёш энергияси халқаро институти” да бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг вебсаҳифасида (www.iplt.uz) ва «ZiyoNet» Ахборот таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:

Мирзабаев Акрам Маҳкамович
техника фанлари доктори

Расмий оппонентлар:

Мисриханов Мисрихан Шапиевич
техника фанлари доктори, профессор

Гайибов Тулкин Шерназарович
техника фанлари доктори, профессор

Рахимов Рустам Хақимович
техника фанлари доктори

Етакчи ташкилот:

«Теплоэлектропроект» АЖ

Диссертация химояси Тошкент давлат техника университети ҳузуридаги DSc.03/10.12.2019.T.03.03. рақамли Илмий кенгашнинг 2020 йил «09» 12 соат 13⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100095, Тошкент шаҳри, Олмазор тумани, Университет кўчаси, 2-уй.


Тел./факс: (99871) 246-46-00, Факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz.

Диссертация билан Тошкент давлат техника университети Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (37 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, 100095, Тошкент шаҳри, Олмазор тумани, Университет кўчаси, 2-уй. Тел./факс: (99871) 246-03-41.

Диссертация автореферати 2020 йил «27» ноябрь да тарқатилди.
(2020 йил «27» ноябрь даги 13 рақамли реестр баёнига асосан)

**К.Р. Аллаев**
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси т.ф.д., профессор

О.Х. Ишназаров
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби,
т.ф.д., к.и.х.

**М.Н. Ибодуллаев**
Илмий даража берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси т.ф.д., профессор

КИРИШ (Фан доктори (DSc) диссертация аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда қайта тикланадиган энергия манбалари, айниқса, шамол ва қуёш энергиясидан фойдаланишни кенгайтириш асосида бутун дунёда яшил энергетикани ривожлантириш, хусусан, қайта тикланувчи энергия манбалари асосидаги энергия тизимларни электр тармоғига хавфсиз ва ишончли улаш асосида мамлакат ёқилғи-энергетика баланси юкламасини камайтиришга алоҳида аҳамият қаратилмоқда. Ҳозирги кунда ривожланган мамлакатларда электр тармоғига интеграцияланган фотоэлектрик тизимлар кўрсаткичларини аниқлаш ва уларни тармоқ талабларига мослаштириш, тарқатиш тармоғида фотоэнергетик тизимлардан фойдаланиш бўйича мақбул иш режимларини аниқлаш борасида турлича ёндашувлар мавжуд¹. Бу борада, жумладан, қуёш ва шамол станциялари ишлаб чиқариш қувватининг беқарорлиги туфайли энергия тизимларида юзага келадиган муаммоларни тизимли ўрганиш борасида қилишда янгича ёндашувларни ишлаб чиқишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда қайта тикланувчи энергия манбалари асосидаги энергия тизимларининг чиқиш кўрсаткичларини бошқариш усулларини ишлаб чиқишга қаратилган тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, қайта тикланадиган энергия манбалари асосидаги энергия тизимларини тармоққа интеграция қилишда, қаралаётган тармоқнинг хусусий жиҳатларини ҳамда муайян ҳудуднинг иқлим кўрсаткичларини инобатга олган ҳолда, уларнинг техник, ресурс, иқтисодий ва экологик кўрсаткичларини бир бутун сифатида баҳолаш бўйича тадқиқотлар устувор ҳисобланади. Бунда, фотоэлектрик тизимларни электр тармоғига хавфсиз ва ишончли улаш мақсадида мазкур тизимларни ва уларнинг иш режимларини комплекс тадқиқ этиш республикада қуёш энергиясидан саноат миқёсида фойдаланиш самарадорлигини оширишдаги муаммоларни ҳал қилишда янгича ёндашувларни талаб қилувчи долзарб вазифалардан бири бўлиб ҳисобланади.

Республикада иқтисодиётнинг муҳим тармоқларидан бири ҳисобланган энергетика соҳасида энергия самарадорликни ошириш, энергия тежовчи технологияларни жорий этиш ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантириш бўйича тадқиқотлар ва жорий қилиш чора-тадбирлари амалга оширилмоқда. 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар Стратегиясида, жумладан, “иқтисодиётда энергия ва ресурслар сарфини камайтириш, ишлаб чиқаришга энергия тежайдиган технологияларни кенг жорий қилиш, қайта тикланадиган энергия манбаларидан фойдаланишни кенгайтириш” каби вазифалар белгиланган. Мазкур вазифаларнинг ўз вақтида ва сифатли амалга оширилишини

¹ www.sciencedirect.com, www.scopus.com, www.literature.rockwellautomation.com

таъминлаш мақсадида қайта тикланадиган энергия манбалари асосидаги фотоэнергетик тизимларни электр тармоғига интеграциялаш жараёнини комплекс тадқиқ қилиш муҳим вазифалардан бири ҳисобланади.

Диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси Президентининг 07.02.2017 даги “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”ги ПФ-4947-сонли, 21.09.2018 даги “2019-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини инновацион ривожлантириш стратегиясини тасдиқлаш тўғрисида”ги ПФ-5544-сонли Фармонлари ҳамда 22.08.2019 йилда “Иқтисодиёт тармоқлари ва ижтимоий соҳанинг энергия самарадорлигини ошириш, энергия тежовчи технологияларни жорий этиш ва қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантиришнинг тезкор чора-тадбирлари тўғрисида”ги ПҚ-4422-сонли ва 04.10.2019 йилдаги “2019-2030 йиллар даврида Ўзбекистон Республикасининг «яшил» иқтисодиётга ўтиш стратегиясини тасдиқлаш тўғрисида” ги ПҚ-4477-сонли Қарорларида ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига боғлиқлиги. Мазкур тадқиқот Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар ривожланишининг “II.Энергетика, энергия ва ресурсларни тежаш” устувор йўналишига мувофиқ бажарилди ва IV: Қайта тикланадиган энергия манбаларидан фойдаланиш усулларини ривожлантириш, нанотехнологиялар, фотоника ва бошқа замонавий илғор технологиялар асосида қурилмалар ва технологияларни яратиш² йўналишини ривожлантиришга хизмат қилади.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи. Жаҳонда бугунги кунда қайта тикланадиган энергия манбалари асосидаги тизимларни тармоққа интеграциялаш, мазкур турдаги энергия тизимларининг чиқиш кўрсаткичларини бошқариш усулларини тадқиқ қилишга йўналтирилган илмий тадқиқотлар етакчи илмий тадқиқот марказлари ва олий таълим муассаларида, жумладан: Миллий қайта тикланувчи энергияси лабораторияси (NREL), Фраунгофер қуёш энергетикаси тизимлари институти (FISES), Берлин фотовольтаика институти (PI-Berlin), Мичиган давлат университети (MSU), Пекин қуёш энергияси илмий текшириш институти (BSERI), Корея энергетика илмий текшириш институти (KIER), Сингапур қуёш энергияси илмий текшириш институти (SERIS), Малайзия миллий университети Қуёш энергияси илмий текшириш институти (SERI), Ҳиндистон ва АҚШ қуёш энергияси илмий текшириш институти (SERI), Москва энергетика институти; «Июффе номидаги физика-техника институти»,

² Ўзбекистон Республикаси Президентининг 21.09.2018 даги “2019-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини инновацион ривожлантириш стратегиясини тасдиқлаш тўғрисида”ги ПФ-5544-сонли Фармони.

Тошкент давлат техника университети, Қуёш энергияси халқаро институти (ҚЭХИ) ва бошқа кўпгина марказларда олиб борилмоқда.

Фотоэлектрик тизимларини ишлаб чиқиш ҳамда мазкур тизимларни тармоққа хавфсиз улаш мақсадида уларнинг асосий кўрсаткичларини танлаш бўйича етакчи илмий марказларда олиб борилган тадқиқотлар натижасида қатор долзарб муаммолар ҳал қилинди ва қуйидаги муҳим илмий натижаларга эришилди: фотоэлектрик тизимларни электр тармоғига улаш бўйича назарий-ҳисобий ва тажрибавий тадқиқотлар асосида углеводород ёқилғиси ҳамда қайта тикланадиган энергия манбалари асосида энергия ишлаб чиқариш тақсимоли таҳлил қилинди; электр тармоқларига хавфсиз уланиш кўрсаткичларининг зарурий мезонлари аниқланди ва уларни баҳолаш учун дастурий маҳсулотлар ишлаб чиқилди.

Қайта тикланадиган энергия манбалари асосидаги энергия тизимларини тармоққа интеграция қилишда, қаралаётган тармоқнинг хусусий жиҳатларини инобатга олган ҳолда, уларнинг техник, ресурс, иқтисодий ва экологик кўрсаткичларини баҳолаш имконини берувчи динамик моделлар ишлаб чиқилди; заҳира таъминот тизимига эга бўлган, марказлашган ва маҳаллий тармоққа уланган ўзгарувчан қайта тикланадиган энергия манбаларига асосланган йирик станциялар яратилди; мазкур турдаги тизимлардан фойдаланишнинг самарадор иш режимлари, шунингдек, уларнинг ишчи кўрсаткичларини бошқариш усуллари ишлаб чиқилди.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Қуёш энергиясини фотоэлектрик тизимлар ёрдамида электр энергиясига айлантириш муаммолари ҳозирга қадар АҚШ, Испания, Германия, Хитой, Ҳиндистон, Россия Федерациясининг миллий лабораторияларида, шамол энергиясини электр энергиясига айлантириш эса – Голландия, Дания, Испания, Хитой Халқ Республикаси ва Германиянинг миллий лабораторияларида ўрганилган. Масалан, NREL да кўп қаррали концентрация усулидан фойдаланган ҳолда кўп ўтишларга эга бўлган гетероструктуралар асосида самарадорлиги 47,1% ли қуёш элементларини яратиш орқали янги рекорд ўрнатилди³. FISES олимлари ўзгартириш самарадорлиги 99,3%га тенг бўлган инвертор яратдилар⁴. Морокколик Абдулмалик Эссади университети олимлари ишлаб чиқарувчанлик коэффициенти 98%га тенг бўлган тармоққа уланган фотоэлектрик тизим яратишга муваффақ бўлдилар⁵.

Қайта тикланадиган ва анъанавий энергияни оқилона мужассамлаштириш услубияти масалалари, қуёш, шамол ва гидравлик электр станциялари кўрсаткичларини энергия истеъмоли ва тармоқ кўрсаткичларига

³ John F. Geisz, Ryan M. France, Kevin L. Schulte, Myles A. Steiner, Andrew G. Norman, Harvey L. Guthrey, Matthew R. Young, Tao Song, Thomas Moriarty // Six-junction III–V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration // Nature Energy volume 5, pages 326–335 (2020).

⁴ <https://www.renewableenergyfocus.com/view/2938/fraunhofer>

⁵ Kamal Attari, Ali Elyakoubi, Adel Asselman // Performance analysis and investigation of a grid-connected photovoltaic installation in Morocco // Energy reports, Volume 2, November 2016, Pages 261–266.

кўра баҳолаш усуллари, қайта тикланадиган энергетикадан фойдаланишга асосланган корхоналарнинг ўзига хос электр энергия истеъмоли, электр таъминоти тизимларининг таснифи ва таҳлиллари ҳамда интеграциялашган тармоқларнинг энергетик самарадорлиги кўрсаткичларига бағишланган муаммолар С.К. Шерязов⁶, С.М. Воронин⁷, Б.В. Лукутин⁸ ва бошқаларнинг ишларида атрофлича ўрганилган. Қайта тикланадиган энергия манбалари асосидаги энергия тизимларини электр тармоғига улашдаги техник ва потенциал муаммолар, энергетик хавфсизликни таъминлаш кўрсаткичлари ва мезонларини баҳолашнинг назарий қоидаларини ишлаб чиқишга катта ҳисса қўшган етакчи хорижий ва маҳаллий олимлар тадқиқотларини ўрганишнинг услубий асослари В.В. Бушуев, Н.И. Воропай, Д.С. Стребков, E.D. Spooner, В. Kroposki, I. MacGill, M.A. Eltawil, P.A. Зоҳидов, К.Р. Аллаев ва бошқаларнинг ишларида кўриб чиқилган. Бу ишларда, фотоэнергетик тизимларни электр тармоғига улашда тарқатиш тармоғининг хусусиятлари, актинометрик ҳамда атроф-муҳитнинг иқлимий кўрсаткичларини инобатга ҳолда, қуёш элементларидан тортиб то электр тармоғига уланган фотоэлектрик тизимларгача мукамал тадқиқ этиш жуда кам ўрганилган.

Республикада 2012 йилга қадар бўлган даврда, фотоэлектрик тизимлар кўрсаткичларини ўрганиш уларни умумий тармоққа интеграциялашни ҳисобга олмаган ҳолда амалга оширилди, мазкур тизимларда кечадиган жараёнларни уларни умумий электр тармоғига улаш мақсадида моделлаштириш масалалари ТА 8008 “Ўзбекистонда қуёш энергетикасини ривожлантириш”⁹ лойиҳаси доирасида ўрганила бошланди. ЎзРда электр тармоғига интеграцияланган фотоэлектрик тизимларни яратиш, лойиҳалаш ва ишлаб чиқиш соҳасидаги илк амалий ишлар Қуёш энергияси халқаро институтида амалга оширилган лойиҳалар доирасида бошланди. Тармоқ бўйича хорижий ва маҳаллий мутахассислар тажрибаси шуни кўрсатадики, қуёш ва шамол станциялари ишлаб чиқариш қувватининг беқарорлиги туфайли энергия тизимларида юзага келадиган муаммолар тизимнинг умумий ўрнатилган қувватидаги улуши таркибида қуёш ва шамол станциялари ишлаб чиқариш қувватининг улуши 20-25% га етгандан сўнг бошланади. Шу билан бирга, дунёда фотоэлектрик модуллар нархларининг тушиши ҳамда қуёш энергияси соҳасида технологияларнинг такомиллашуви тенденцияси кузатилмоқда, бу эса ўз навбатида, тарқатиш тармоқларига интеграцияланган фотоэлектрик тизимлар сони глобал миқёсда ортишига олиб келди.

⁶ Шерязов С.К. Выбор рационального сочетания традиционных и возобновляемых энергоресурсов в системе энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей (на примере Челябинской области): рекомендации для руководителей энергетических служб АПК / С.К. Шерязов. – Челябинск: ЧГАА, 2010. – 40 с.

⁷ Воронин, С.М. Анализ направлений совершенствования солнечных электростанций / А.А. Таран, С.М. Воронин // Вестник Сумского национального аграрного университета. – 2012. – №16. – с. 137-139.

⁸ Лукутин Б.В., Муравлев И.О. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. Томск: Томский политехнический университет, 2015. 112 с.

⁹ <https://www.adb.org/projects/45120-001/main>

Юқорида келтирилганларни инобатга олган ҳолда, тақдим этилаётган диссертация ишида ҳал қилинадиган асосий муаммо электр тармоғига интеграцияланган фотоэлектрик тизимлар кўрсаткичларини, фойдаланиш бўйича иш режимларини аниқлаш, қуёш элементлари ва фотоэлектрик модулларнинг самарадорлигини ошириш йўллари кидириш, уларнинг энергетик кўрсаткичларига қуёш нурланишининг ўзгариши ва иқлимий омиллар таъсирини тадқиқ қилиш, шунингдек халқаро ва миллий стандартлар, меъёрлар ва талаблар асосида, республика ҳудудида ўрнатиладиган, электр тармоғига интеграцияланган “резидентал” ва “тижорий” фотоэлектрик тизимлар лойиҳалари бўйича меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатлар ҳамда намунавий ечимларни ишлаб чиқишдан иборат.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Қуёш энергияси халқаро институтида амалга оширилаётган ОТ-Атех-2018-517 рақамли “Фотоэлектрик тизимларни марказлашган электр таъминоти тармоғига интеграциялаш” (2018-2020 йй.) мавзусидаги ва Ўзбекистон Республикаси Бош вазир ўринбосарининг 12.02.2015 даги №06/1-123-сонли топшириғига мувофиқ), “Йирик фотоэлектрик станцияларни электр тармоқларига улаш бўйича илмий-техник ҳужжатлар ишлаб чиқиш” номли 06/01-2015-сонли хўжалик шартномаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади электр тармоғига интеграцияланган фотоэнергетик тизимларни ташқи иқлимий омиллар ҳамда Ўзбекистон энергия тизимининг хусусиятларини инобатга олган ҳолда комплекс тадқиқ этишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари: Қўйилган мақсадга эришиш учун қуйидаги вазифалар шакллантирилди:

фотоэлектрик тизимларни электр тармоғига интеграциялашнинг асосий тамойилларини шакллантириш;

электр тармоғига интеграцияланган фотоэлектрик модуллар ва улар асосидаги фотоэлектрик тизимлар энергия кўрсаткичларининг қуёш нурланиши интенсивлигининг ўзгариши ва иқлимий омиллар таъсирига боғлиқлигини ўрганиш;

электр тармоғига интеграцияланган, қайта тикланадиган энергия манбалари асосидаги энергия тизимларидан фойдаланишнинг самарали усулларини ўрганиш;

фотоэлектрик элементларда ток ўтказиш механизмларини назарий ва тажриба асосида ўрганиш ҳамда фотоэлектрик элементлар самарадорлигини ошириш усулларини ишлаб чиқиш;

электр тармоғига уланган фотоэлектрик тизимларнинг ресурс, техник-иқтисодий ва экологик кўрсаткичларини башорат қилиш асосида баҳолаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида электр тармоғига интеграцияланган фотоэлектрик тизимлар (станциялар) танланган.

Тадқиқотнинг предмети электр тармоғига интеграцияланган фотоэлектрик тизимларнинг асосий электроэнергетик кўрсаткичлари ва уларни тармоққа турли схемаларда улашда режим кўрсаткичларидан иборат.

Тадқиқот усуллари: диссертация ишида қуёш энергиясини электр энергиясига айлантириш жараёнларини математик моделлаштириш ҳамда тармоққа интеграцияланган фотоэлектрик тизимлардаги иш жараёнларини симуляциялаш, тизимли ёндашув усуллари ва энергия тизимларини ҳисоблашнинг замонавий назариясини таҳлил қилиш усулларида фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги:

фотоэлектрик элементлар асосидаги тизимларнинг ресурс кўрсаткичларини яхшилаш имконини берувчи нисбатан юқори чиқиш кўрсаткичларига эга бўлган, самарадор фотоэлектрик элементларни олиш учун фотогенерация жараёнларини бошқариш услубияти такомиллаштирилган;

кичик қувватли фотоэлектрик тизимларни комплекс мониторинг қилиш услубияти ишлаб чиқилган;

паст кучланишли маҳаллий электр тармоғига интеграцияланган фотоэлектрик тизимларнинг ўртача кунлик, ўртача ойлик ва ўртача йиллик ўрнатилган қувватдан фойдаланиш коэффициенти иқлим шароитини ҳисобга олган ҳолда баҳоланган;

паст кучланишли маҳаллий электр тармоғига интеграцияланган фотоэлектрик тизимларнинг самарадорлик коэффициенти ҳисобий-тажрибавий йўл билан баҳоланган ва шу асосда ўртача йиллик ишлаб чиқариш қувватининг башорат кўрсаткичлари аниқланган;

маҳаллий электр тармоғига интеграцияланган фотоэлектрик тизимлар актив қувватининг беқарорлигини ҳисобга олган ҳолда электр энергияси ишлаб чиқиш ва истеъмоли жараёнларини моделлаштириш услубияти ишлаб чиқилган;

фотоэлектрик тизимлар актив қуввати ортиб бориши билан тармоқдан истеъмол қилинадиган энергия бир текисда камайиб бориши кўрсатилган;

электр тармоғига интеграцияланган йирик фотоэлектрик тизимларни ўрнатиш бўйича мақбул ҳудудларни аниқлаш мезонлари ишлаб чиқилган ва ушбу ҳудудларда мазкур турдаги фотоэлектрик тизимларнинг техник-иқтисодий ва экологик кўрсаткичлари башорат қилиш асосида баҳоланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

тармоққа интеграцияланувчи фотоэлектрик тизимларнинг электроэнергетик ва техник кўрсаткичларини ҳисобга олган ҳолда уларни ЎЗР энергия тизимида хавфсиз интеграциялаш учун рухсат этиладиган қувватлар

аниқланган, шунингдек, электр тармоқларига интеграцияланган фотоэлектрикларни ўрнатиш учун Ўзбекистон Республикасининг энг қулай ҳудудлари аниқланган ҳамда мазкур турдаги фотоэлектрик тизимларнинг техник, иқтисодий ва экологик кўрсаткичлари аниқланган;

атроф-муҳит ҳарорати $t=25^{\circ}\text{C}$ бўлганда ўзгармас кучланишни ўлчашнинг юқори чегараларини сошлашда, кучланишни ўлчаш оралиғини 5% гача (610В гача) кенгайтириш ва 10%гача аниқлик билан ўлчаш имконини берувчи автоматик кузатув таъминотига эга бўлган мониторинг тизими учун рақамли вольтметр яратилган ва ишлаб чиқаришга тайёрланган;

электр тармоққа уланган фотоэлектрик тизимнинг ишлаб чиқариш қувватининг йиллик башорат кўрсаткичлари республиканинг иқлим шароитида 8.3 дан 23.8% гача бўлган оралиқда ўзгариши аниқланган.

Тадқиқот натижаларининг ишончилиги муайян вақт оралиғида текширувдан ўтган тадқиқот усуллариининг қўлланилиши, атроф-муҳит кўрсаткичларининг кўп йиллик ўртача статистик маълумотларидан, энергетик тадқиқотлар натижалари ва лицензияланган дастурий таъминотлардан фойдаланилганлиги билан тасдиқланади. Ишда тавсия этилган техник ечимлар ва диссертация ишида олинган асосий қоидаларнинг илмий асосланганлиги тадқиқотларнинг юқори даражада ўтказилганлиги ва статистикаси билан тасдиқланган.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Натижаларнинг илмий аҳамияти электр тармоғига интеграцияланган фотоэлектрик тизимлар ресурс кўрсаткичларини тармоқ юқламасида режалаштириш учун ишончли башоратлаш имконини беришида акс этади.

Натижаларнинг амалий аҳамияти шундан иборатки, умумий характерли электр таъминоти тармоқларига уланувчи фотоэлектрик тизимлар учун стандартларнинг ишлаб чиқилган бўлиб, мазкур стандартлар тармоққа уланувчи фотоэлектрик тизимларнинг самарадорлиги ва ишончилигини ошириш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Электр тармоғига интеграцияланган фотоэлектрик тизимларни комплекс ўрганиш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

Қуёш фотоэлектрик станциялари, умумий электр таъминоти тармоқларига уланган тизимлар, станциялар (тизимлар)га қўйиладиган минимал талаблар, йўлланма ҳужжатлар, қабул қилиш ва текшириш бўйича Ўзбекистон давлат стандарти (O'zDSt 3076:2016) тасдиқланган ва давлат реестридан рўйхатдан ўтказилган («O'zstandart» агентлигининг 2020 йил 29 сентябрдаги декабрдаги 03/3000-сон маълумотномаси). Натижада, иқтисодиётнинг турли соҳаларида қуёш энергияси технологияларини кенг миқёсда жорий этиш, шунингдек, мазкур соҳадаги технологиялар импорти ва

экспорти қўламини кенгайтириш ҳамда республика қуёш энергияси саноатини ривожлантириш учун шароит яратилган;

кичик қувватли ФЭСни комплекс мониторинг қилиш услубияти ва шу асосда мониторингни амалга ошириш учун ишлаб чиқилган дастурий маҳсулот ҳамда рақамли вольтметр-қурилмаси Қашқадарё вилоятидаги “Solar Development Systems” МЧЖ объектларида умумий қуввати 20 кВт бўлган фотоэлектрик тизимларга жорий қилинган (“Ўзэлтехсаноат” ассоциациясининг 2020 йил 25 сентябрдаги 04-1/1749-сон маълумотномаси). Натижада, фотоэлектрик тизим ва унинг таркибий қисмлари ҳолати тўғрисидаги маълумотларни мунтазам йиғиб бориш ҳисобига станциялар ҳолатининг ўзгаришини аниқлаш ва юзага келиши мумкин бўлган салбий ҳолатларини эрта башоратлаш билан боғлиқ харажатларини йилига 307 944 000 сўм миқдорида тежаш имконини берган;

кичик қувватли фотоэлектрик тизимларни электр тарқатиш тармоғига улаш бўйича схемавий-технологик ечим Қуёш энергияси халқаро институтининг маҳаллий паст кучланишли электр тармоғига умумий қуввати 28 кВт бўлган фотоэлектрик тизимларни улашда жорий қилинган (Энергетика вазирлигининг 2020 йил 5 ноябрдаги 03-07-5945-сон маълумотномаси). Натижада, умумий қуввати 28 кВт бўлган фотоэлектрик тизимларда йилига ўртача 43800 кВт·соатдан электр энергияси ишлаб чиқарилишига, 15330 м³ табиий газни тежаш натижасида атмосферага 19 тонна СО₂ чиқишининг олди олинишига эришилган;

кичик қувватли фотоэлектрик тизимларни электр тарқатиш тармоғига улаш бўйича схемавий-технологик усули Бердақ номидаги Нукус давлат университети полигонидида жорий қилинган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 2020 йил 25 сентябрдаги 89-02-354-сон маълумотномаси). Натижада, бир йилда 4136.49 кВт·соат электр энергияси ишлаб чиқариш ва 5310200 “Электроэнергетика” йўналиши талабалари учун “Муқобил энергия манбалари” фани бўйича маърузалар ва амалий машғулотларида тажриба объекти сифатида фойдаланиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Ушбу тадқиқот натижалари 11 та халқаро ва 5 та республика илмий-амалий анжуманларида муҳокама қилинган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 40 та илмий иш чоп этилган бўлиб, шундан 17 таси илмий мақола, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертацияларининг асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия қилинган республика нашрларида 7 та ва хорижий нашрларда 10 та, 1 та фойдали моделга патент ва 4 та дастурий маҳсулотлар учун гувоҳномалар олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация таркиби кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг матни 232 бетда келтирилган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг биринчи боби **“Интеграцияланган электроэнергетик тизимлардан фойдаланишни ривожлантириш муаммолари”** деб номланиб, ушбу бобда қайта тикланадиган энергия манбаларидан (ҚТЭМ) дунёда ва ЎзРда фойдаланиш ҳолати ва тенденциялари ўрганилган. ҚТЭМ асосий турларининг техник салоҳияти, шу жумладан, қуёш энергияси ресурслари ер усти метеостанциялари ва сунъий йўлдош орқали кўп йиллик кузатувлар натижасида олинган актинометрик маълумотлар асосида таҳлил қилинган ва солиштирилган, шунингдек, ЎзР тарқатиш тармоқлари тадқиқ қилинган. Фотовольтаика технологиялари: қуёш элементлари (ҚЭ), фотоэлектрик модуллар (ФЭМ) ва инверторлар, шунингдек, ҚЭ ва ФЭМ лар самарадорлигини ошириш ва уларни электр тармоғига улаш бўйича тадқиқотлар ҳолати, фотоэлектрик тизимлар (ФЭС) ни электр тармоғига хавфсиз улаш ва уни самарали ишлатиш бўйича халқаро амалиёт ўрганилган. Электр тармоғига уланган ФЭСнинг ресурс, техник-иқтисодий ва экологик кўрсаткичлари кўриб чиқилган. Мавжуд тажрибавий ва назарий маълумотларни таҳлил қилиш асосида Ўзбекистон шароитида электр тармоғига интеграцияланган ФЭСларни комплекс тадқиқ этиш бўйича вазифалар шакллантирилган.

Диссертациянинг **“Қуёш элементларининг фотоэлектрик параметрларини баҳоловчи кўрсаткичлар хусусиятини аниқлаш услубиятини ишлаб чиқиш”** деб номланган иккинчи бобида, ҚЭ асосий электр ва фотоэлектрик кўрсаткичларини, турли ҚЭ ларни ҳисоблаш моделларини ўрганиш ва улардаги фототокни ошириш усулларини ишлаб чиқишга бағишланган. Si, α -Si, GaAs и CIGS асосидаги ҚЭ ларда турли даражада қуёш нури билан ёритиш шароитларида юкламавий вольтампер характеристикалари ва ток ўтказиш механизмларининг хусусиятлари ўрганилган. ФЭС ларни электр тармоғига интеграциялаш учун зарурий

шартларни аниқлаш мақсадида, юқори самарадор ҚЭ яратиш ва унинг негизида ФЭМ ва олдиндан берилган кўрсаткичлар асосида ишловчи тизим яратишга уринишлар қилинган.

ҚЭ да ток ўтиш механизмлари ҳамда Si ва GaAs ли ҚЭ ларида I_{ph} фототокка магнит майдоннинг таъсири ўрганилган. Стационар ҳолатда ток ташувчилар ва экситонлар концентрацияси учун тақсимот функцияси $N(x)$ куйидагича кўринишда бўлади:

$$N_{e,h}(x) = N_{e,h}(0)e^{-\frac{x}{L_{e,h}}}, \quad (1)$$

$$N_{exc}(x) = N_{exc}(0)e^{-\frac{x}{L_{exc}}}, \quad (2)$$

бу ерда $N_{exc}(0)$ – кристалл сирти яқинидаги концентрация, $L_{e,h}$ ва L_{exc} – мос равишда ток ташувчилар ва экситонларнинг диффузион узунлиги.

Қуёш элементининг фототоки I_{ph} асосий бўлмаган заряд ташувчилар ва экситонлар концентрациясига пропорционал бўлиши керак:

$$I_{ph} \sim N_{e,h}(L_{pn}) + N_{exc}(L_{pn}) = N_{e,h}(0)e^{-\frac{L_{pn}}{L_{e,h}}} + N_{exc}(0)e^{-\frac{L_{pn}}{L_{exc}}},$$

бу ерда, L_{pn} – p-n ўтиш чуқурлиги. Магнит майдон мавжуд бўлган ҳолда фототок куйидагиларга пропорционал бўлади:

$$I_{ph}(H) \sim N_{e,h}^H(0)e^{-\frac{L_{pn}}{L_{e,h}}}. \quad (3)$$

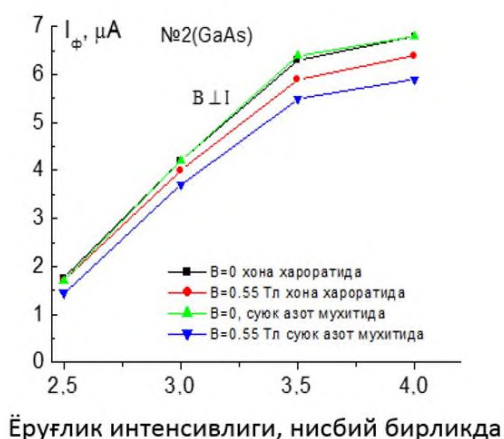
p-n ўтиш фототокининг ўзгариши ΔI куйидагича бўлади:

$$\Delta I = [I_{ph} - I_{ph}(H)] \sim N_{e,h}(0)e^{-\frac{L_{pn}}{L_{e,h}}} + N_{exc}(0)e^{-\frac{L_{pn}}{L_{exc}}} - N_{e,h}^H(0)e^{-\frac{L_{pn}}{L_{e,h}}}, \quad \text{ёки,}$$

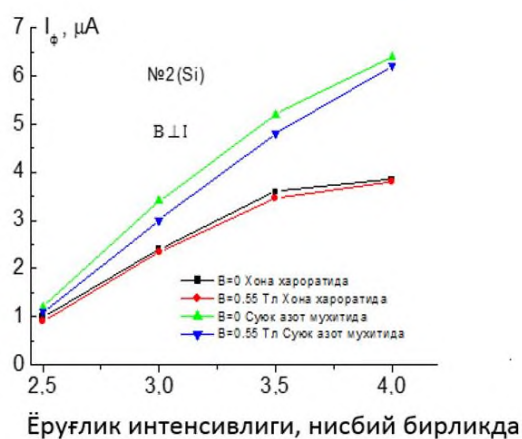
$$\Delta I = [I_{ph} - I_{ph}(H)] \sim N_{e,h}(0) \left[e^{-\frac{L_{pn}}{L_{exc}}} - e^{-\frac{L_{pn}}{L_{e,h}}} \right]. \quad (4)$$

(4) ифодадан кўриниб турибдики, ΔI катталиқ асосан ток ташувчилар ва экситонлар диффузион узунликларининг $L_{e,h}$ ва L_{exc} p-n ўтиш чуқурлиги L_{pn} га ва яримўтказгич сирти яқинидаги экситонлар концентрацияси (N_{exc}) га боғлиқ. Фототок I_{ph} қиймати $L_{exc}=L_{e,h}$ бўлганда ўзгармаслиги, $L_{exc} < L_{e,h}$ бўлганда ортиши ва $L_{exc} > L_{e,h}$ бўлганда камайиши лозим. Бундан ташқари, (4) дан кўриниб турибдики, турли p-n ўтиш чуқурлигига эга намуналарда бажарилган ўлчашлар L_{exc} нинг қийматини юқори аниқликда аниқлаш имконини беради. Бунда ФИК 23% бўлган GaAs №2 (1-расм) ва ФИК 15% бўлган Si №2 (2-расм) ҚЭ намуналарини ёритиш чўғланма лампа ва яримўтказгичли лазер нури (1 mW, $\lambda=0.63-0.68 \mu m$) ёрдамида амалга оширилди. (1-расм). ҚЭ негизидаги ташувчиларнинг диффузион узунлиги $\sim 3-4 \mu m$ ва кучли легирланган сиртга яқин соҳада ҚЭ паспорт маълумотларига кўра $L_{pn} \sim 1 \mu m$ га тенг. Ўлчовлар шуни кўрсатдики, хона ҳароратида ΔI қиймати 8-13% ни ташкл этди, $\Delta I = I_{ph} - I_{ph}(H) < 0$. Ўз навбатида, ҚЭ сиртга яқин соҳасида $L_{exc} > L_{e,h} \sim 1 \mu m$, ва

экситонлар ҳиссаси ~ 8-13% га тенг. Суюқ азот ҳароратида экситонлар ҳиссаси 14-17% га қадар ортади (1-расм).



1-расм. GaAs асосидаги ҚЭ да фототокнинг ёруғлик интенсивлигига боғлиқлиги



2-расм. Si асосидаги ҚЭ да фототокнинг ёруғлик интенсивлигига боғлиқлиги

2-расмда Si ли ҚЭ магнит майдонида фототокнинг ўзгариши тасвирланган. ҚЭ негизидаги ташувчиларнинг диффузион узунлиги ~ 60–80 μm ва кучли легирланган сиртга яқин р-соҳада $L_{e,h} \sim 0,6-0,9 \mu m$, $L_{pn} \sim 1 \mu m$ га тенг. Кремнийда фототашувчилар ва экситонлар генерацияси ҳамда кўчиши нафақат кристалл сирти яқинида, балки кристаллнинг бутун ҳажми бўйлаб юзага келади, чунки $\lambda = 0.63 \div 0.68 \mu m$ учун $1/\alpha$ нинг қиймати ~ 3 μm . Шу муносабат билан, етарлича “чуқур” р-п ўтишга эга бўлган Si ли ҚЭ ларда фототок асосан диффузия соҳасида шаклланади ва L_{exc} нинг қийматини шу соҳадаги $L_{e,h}$ қиймати билан таққослаш зарур $L_{exc} > L_{e,h}$, $\Delta I < 0$ (2-расм). Нисбатан “саёз” р-п ўтишларда ташувчилар генерацияси ва тўпланиши асосан ҚЭ негизида амалга ошади, бунда $L_{e,h} \sim 60-80 \mu m$ ва $L_{exc} < L_{e,h}$, $\Delta I > 0$.

Шундай қилиб, магнит майдон таъсирида яримўтказгичли ҚЭларида фототокнинг ўзгариши экситонларнинг диффузион узунлигининг камайиши билан боғлиқ бўлиши мумкинлиги аниқланди. Si ва GaAs ли ҚЭ ларида экситонлар ҳиссаси мос равишда 3÷6% ва 8÷13% эканлиги кўрсатилди. Ушбу натижадан ҚЭ ва улар асосидаги ФЭМлар, шунингдек, электр тармоғига интеграцияланган ФЭСлардаги фототок миқдорини ошириш мақсадида фойдаланиш мумкин.

Диссертациянинг **“Фотозлектрик тизимлар энергетик кўрсаткичларининг қуёш нурланиши интенсивлигининг ўзгариши ва иқлимий омиллар таъсирига боғлиқлигини тадқиқ қилиш”** деб номланган учинчи бобида, республиканинг табиий иқлим ҳамда қуёш нурланиши тушишининг ўзгариши ва атроф-муҳит ҳарорати таъсири шароитларида Si, α -Si, GaAs ва CIGS асосидаги ФЭМ чиқиш энергетик кўрсаткичларини аниқлаш бўйича тажриба тадқиқотлари натижалари келтирилган.

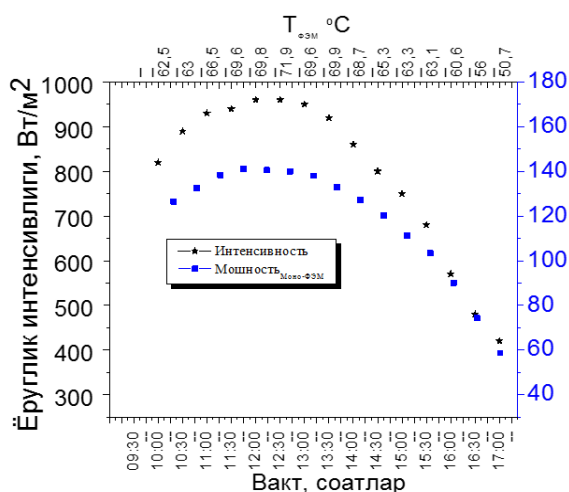
Тажрибаларда бир хил самарадорликка -15,5% эга бўлган монокристалл (Моно-ФЭМ) ва поликристалл (Поли-ФЭМ) кремний асосидаги модулар

ишлатилди. ФЭМ нинг уфққа нисбатан оғиш бурчагини ўлчаш бир вақтнинг ўзида 20° , 30° , 40° қийматларда амалга оширилди. 3-расмдан кўришиб турибдики, қувват эгри чизиги қуёш нурланиши интенсивлиги ўзгариши бўйича графигини қарийиб такрорлайди, бу Моно-ФЭМ қисқа туташув токи $I_{к.т.т.}$ нинг I_{ϕ} билан қарийиб мос келиши билан тушунтирилади. $I_{к.т.т.}$ ФЭМ чиқиш қувватига тўғридан-тўғри пропорционал ва ФЭМ чиқиш кўрсаткичлари қуёш нурланиши интенсивлигига жуда боғлиқ. Моно-ФЭМ учун модулнинг нормал ишчи ҳарорати (NMOT) қиймати баҳоланган ва у $47,8^\circ\text{C}$ ни ташкил қилади. Атроф муҳитнинг ҳарорати $T_{a,m}=36^\circ\text{C}$ ва $T_{\phi\text{ЭМ}}=69,6^\circ\text{C}$ бўлганда, моно-ФЭМ ($P_{ССШ}=200$ Вт, стандарт синов шароитида ўлчанган қувват) NMOT қиймати $47,8^\circ\text{C}$ га тенглиги аниқланган. Қуёш нурланиши интенсивлигининг нотурғунлиги ва модулнинг қизиб кетиши ($T_m = 72^\circ\text{C}$ гача) ФЭМ чиқиш кўрсаткичларига кучли таъсир қилади $G_t = 940$ Вт/м², атроф муҳитнинг ўртача ҳарорати $T_{a,m}=36^\circ\text{C}$ ва NMOT= $47,8^\circ\text{C}$ га тенг бўлганда, моно-ФЭМ фойдали иш коэффициенти (ФИК) $\eta = 13,34\%$ ва тўлдириш омили $FF=68,4\%$ бўлганда $141,1$ Вт электр қувватини ишлаб чиқарди. Бунда, моно-ФЭМ қувватининг максимал пасайиши $29,5\%$ ни ташкил қилди.

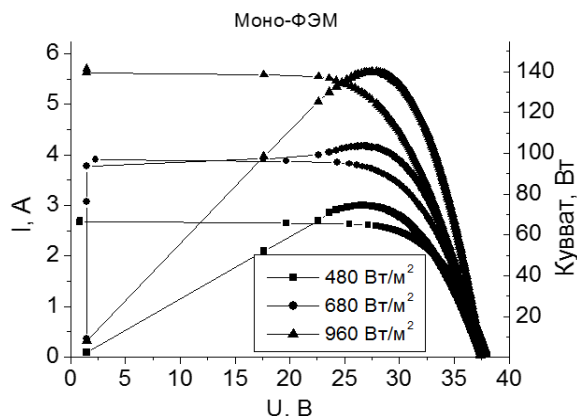
Тижорат миқёсидаги, етарлича юқори ФИК га эга бўлган моно-ФЭМ учун ФЭМ сирти $75-78^\circ\text{C}$ га қадар қизиганда қувватнинг пасайиши $18-22\%$ дан ошмайди, тўлдириш омили қиймати эса $0,75-0,85$ оралиғида бўлади. Бу ерда FF қийматининг пасайиши контакт олди соҳаларидаги иссиқлик кенгайиши, халақит қилувчи қаршиликларнинг мавжудлиги ва ФЭМ қизиб кетиши натижасида келиб чиқадиган бошқа таъсирлар сабабли кучланишнинг ошиши билан боғлиқдир. 4-расмда қуёш радиациясининг турли қувватларида моно-ФЭМ нинг ВАХ лари ва максимал кучланиш максимал қувват $P_{\text{макс}}$ га боғлиқ равишда ўзгариши тасвирланган. $I_{к.т.т.}$ ва V_{oc} нинг ўзгариши қийматларини аниқлаш мақсадида, $T_{\phi\text{ЭМ}}=72^\circ\text{C}$ ҳароратда ФЭМ шунт қаршилиги $R_{Ш}$ ва кетма-кет қаршилик $R_{к.к.}$ ларининг қийматлари баҳоланди ва мос равишда $27,3$ Ом ва $0,906$ Ом га тенг бўлди. Мавжуд услубият ёрдамида ўтказилган баҳолашлар шунини кўрсатдики, $R_{Ш} \geq 20 \div 30$ Ом қаршиликка эга бўлган ўрганилаётган ФЭМ ёруғликнинг нисбатан паст интенсивлик қийматларида электр энергияси ишлаб чиқаришни бошлайди ва нисбий ФИК $\geq 95\%$ га эга бўлади¹⁰. Моно-ФЭМ ва поли-ФЭМ учун қуёш нурланиши, қувват ва ВАХ нинг вақтга боғлиқлиги учун олинган графиклар шакли деярли бир хил бўлди. Поли-ФЭМ NMOT қиймати $33,3^\circ\text{C}$ ни ташкил этди. Олинган натижаларни таҳлил қилиш шунини кўрсатдики, бир хил шароитларда поли-ФЭМ ўртача ҳарорати моно-ФЭМ ўртача ҳароратидан 2°C га паст бўлди. Шунингдек, ФЭМ шунт

¹⁰ Grunow, S. Lust, D. Sauter, V. Hoffmann, C. Beneking, B. Litzenburger, L. Podlowski. Weak light performance and annual yields of pv modules and systems as a result of the basic parameter set of industrial solar cells//Materials 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France. pp.2190-2193

қаршилиги R_{III} ва кетма-кет қаршилиқ $R_{К.К.}$ ларининг қийматлари баҳоланди ва мос равишда 28,96 Ом ва 0,2 Ом га тенг бўлди.

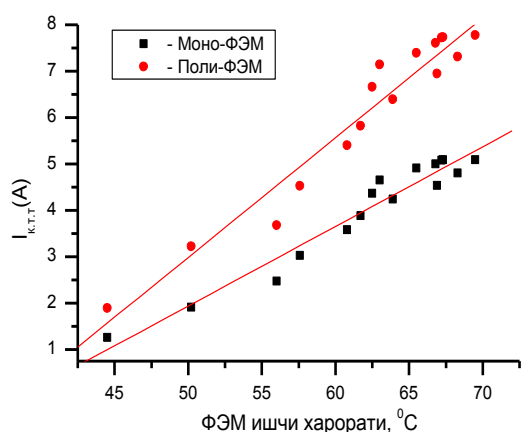


3-расм. Mono-FEM қуввати ва қуёш нурланиши интенсивлигининг вақт бўйича ўзгариши

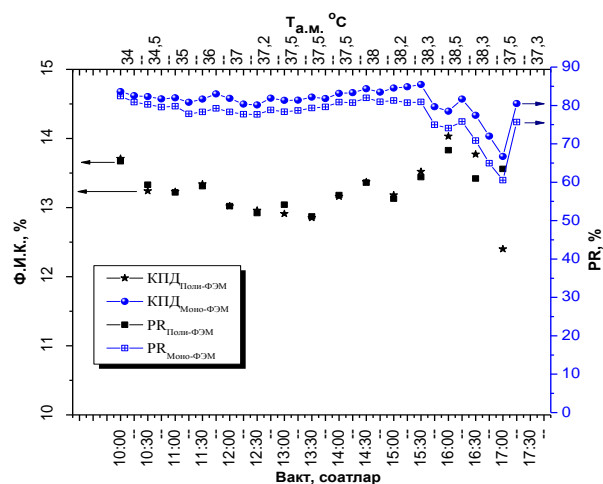


4-расм. Қуёш энергиясининг турли қувватларида Mono-FEM ВАХ си

5-расмда поли-ФЭМ ва моно-ФЭМ лар қисқа туташув токи $I_{к.т.т.}$ нинг ҳароратга боғлиқлиги тасвирланган. Моно- ва поли-ФЭМ лар $I_{к.т.т.}$ Моно- ва поли-ФЭМ лар $I_{к.т.т.}$ нинг ҳароратга боғлиқлиги чизикли боғлиқликдан четлашгани кузатилди, бу эса ФЭМнинг нурланишдан қизиши ҳамда ундаги рекомбинацион йўқотишлар туфайли юзага келади. Қуёш нурланиши интенсивлиги ошиши билан қисқа туташув токи қуёш ортиб бориши, ва унинг юқори қийматларида салт юриш кучланишининг нисбатан кам пасайиши кузатилди. Ҳар иккала турдаги ФЭМ учун PR қийматлари 0.74-0.82 оралиғида бўлади, бунда ҳар икки турдаги ФЭМ ўртача ФИК $\sim 13,3\%$ ни ташкил қилади (6 расм).



5-расм. Поли-ФЭМ ва моно-ФЭМ лар $I_{к.т.т.}$ қийматининг ФЭМ ишчи ҳароратга боғлиқлиги



6-расм. Поли-ФЭМ ва моно-ФЭМ лар ФИК ва PRларининг вақт бўйича ўзгариши

Изланишлар натижасида куйидагилар аниқланди: -моно-ФЭМ учун максимал қувват нуқтаси $P_{ССШ}=200$ Вт, $T_{o.c}=36^{\circ}\text{C}$, $T_m=69.6^{\circ}\text{C}$, $G_t=940$ Вт/м² ва шамол тезлигининг қиймати 1 м/с бўлган шароитда куйидаги кўрсаткичларга эришилди: $NMOT=47.56^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{макс}}=141.1$ Вт, $PR=0.75$, $\eta=13.34\%$, $FF=68.4\%$. - поли-ФЭМ учун максимал қувват нуқтаси $P_{ССШ}=88$ Вт, $T_{o.c}=36^{\circ}\text{C}$, $T_m=67.2^{\circ}\text{C}$, $G_t=940$ Вт/м² ва шамол тезлигининг қиймати 1 м/с бўлган шароитда куйидаги кўрсаткичларга эришилди: $NMOT=45.46^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{макс}}=63.95$ Вт, $PR=0.75$, $\eta=13.31\%$, $FF=67.54\%$. Табиий шароитларда ўтказилган тажрибалар натижасида, йилнинг иссиқ мавсумида моно-ФЭМ ва поли-ФЭМ қувватининг камайиши аниқланди, бу қийматлар мос равишда 30% ва 28% ни ташкил этди.

Дисертациянинг “**Фотоэлектрик тизимларни электр тармоғига интеграциялашнинг асосий тамойилларини шакллантириш**” деб номланган тўртинчи боби, кичик, ўрта ва йирик қувватли ФЭС ларни ЎзРда ягона энергия тизими таркибидаги энергия объектларига интеграциялашда DigSilent Power Factory, PVSyst 6.48, SAM, Solarius PV каби дастрий мажмуалардан фойдаланган ҳолда моделлаштириш ва тармоққа интеграцияланган ФЭС ларнинг иш режимларини симуляциялаш бўйича тадқиқотларга, шунингдек, интеграция жараёнида юзага келиши мумкин бўлган техник муаммоларни таҳлил қилиш ва уларни юмшатиш усулларига бағишланган.

Бугунги кунда, ҚТЭМ асосидаги, қуввати 50 кВт дан ошмайдиган, ўрнатилган электр станцияларининг кўпчилиги автоном (off-grid) хусусиятга эга. Маълумки, ФЭСни электр тармоғига интеграциялаш муаммолари Ўзбекистонда ҳали ривожланишнинг “бошланғич” босқичида. Мазкур босқичнинг якуний натижаси истеъмолчиларни кичик ва ўрта қувватли, қуёш энергияси асосидаги станцияларни электр тармоғига улаш учун меъёрий-ҳуқуқий базани яратиш бўлиб ҳисобланади. Электр тармоғига интеграцияланган ФЭС лар электр энергиясини ишлаб чиқариш объектларига кўйиладиган талабларга жавоб бериши зарур.

Биз ишлаб чиққан услубият асосида ҚЭХИ да ФЭСнинг актив қувват ишлаб чиқариш жараёнининг беқарорлигини ҳисобга олган ҳолда, электр энергиясини ишлаб чиқариш ва истеъмол қилиш жараёнларини моделлаштириш амалга оширилди (7-расм). ФЭС томонидан ишлаб чиқариладиган актив қувватнинг ортиши билан электр тармоғидан истеъмол қилинадиган энергия кундузги вақт оралиғида нол қийматга эришгунга қадар бир текисда камайиб бориши кузатилган. Бунда, иш кунлари ФЭСлар томонидан ишлаб чиқарилган электр энергияси институт юкламаси учун тўлиқ сарфланиши ва дам олиш кунлари ФЭСлар томонидан ишлаб чиқарилган электр энергиясининг ортиқча қисми умумий электр тармоғига етказиб берилиши аниқланган.

Қувват,
МВт.

Юклама профили



7-расм. ҚЭХИ да 18.11.2018 йилда ФЭСлар томонидан ишлаб чиқарилган ва истеъмол қилинган электр энергияси графиги

1-жадвалда бир фазали микроинверторлар орқали электр тармоғига уланган ФЭС (2,24 кВт) ишлаб чиқариш кўрсаткичлари ойма-ой келтирилган.

1-жадвал.

ФЭС нинг ойлик ва йиллик ишлаб чиқариш кўрсаткичлари ва уларни моделлаштириш натижалари билан таққослаш

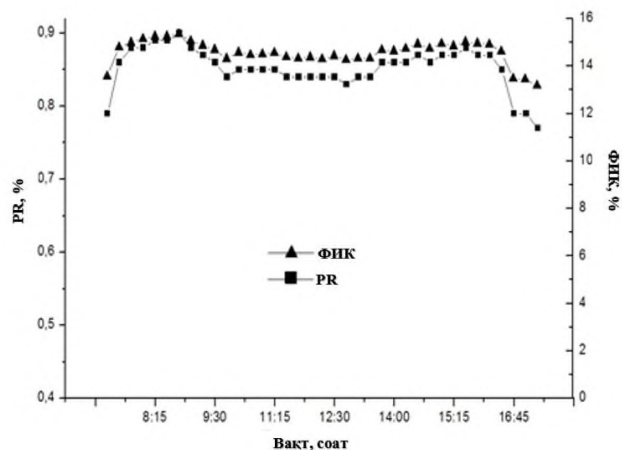
Ойлар	ФЭС ишлаб чиқарган энергия (кВт·соат)	ЎҚФК, %	PVsystда моделлаштириш натижаси (кВт·соат)	ЎҚФК, %	Фарқ, (%)
Январь	185.95	11,2	172.9	10,3	7.54
Февраль	209.79	13,9	199.7	13,3	5.05
Март	243.04	14,6	251.6	15,1	-3.40
Апрель	253.44	15,7	304.8	18,9	-16.85
Май	374.07	22,4	368.9	22,1	1.40
Июнь	347.83	21,5	384.7	23,9	-9.58
Июль	374.83	22,5	401.0	24,1	-6.52
Август	396.87	23,8	395.1	23,7	0.44
Сентябрь	339.35	21	352,9	21,9	-3.84
Октябрь	230.16	13,8	271,5	16,3	-15.22
Ноябрь	180.72	11,2	185,2	11,5	-2.41
Декабрь	138.29	8,3	145,5	8,7	-4.95
Жами	3273,89		3434,9		-4.68

ФЭС нинг ҳақиқий йиллик электр энергия ишлаб чиқариши 2018 йилда 3273,89 кВт/соатни ташкил этди ва PVsyst томонидан моделлаштириш натижасида қилинган башорат 3434,9 кВт/соатни ташкил этади, бунда -4,68% кичик қийматли четлашиш кузатилган. Апрель, июнь ва август ойлари учун ҳақиқий ўлчанган ва башорат қилинган қийматлар орасидаги фарқ бошқа ойларга нисбатан юқори. Сабабларини таҳлил қилиш натижасида бир ой давомида ишлаб чиқарилган энергия миқдорига институтнинг паст кучланишли маҳаллий тармоғидаги муаммолар ва булутлилик таъсири эканлиги аниқланди. Ҳисоб-китоблар шуни кўрсатдики, 2,24 кВт қувватга эга бўлган ФЭС нинг ўртача йиллик ўрнатилган қувватдан фойдаланиш коэффициенти (ЎҚФК) 16,6% ни ташкил этди (8-расм). Август ва декабр

ойларида электр тармоғига интеграцияланган ФЭС ЎҚФК нинг ўртача ойлик кўрсаткичлари мос равишда 23,8% ва 8,3% ни ташкил этди. ФЭС ЎҚФК нинг ўртача ойлик кўрсаткичининг декабрь ойидаги ФЭС ЎҚФК нинг ўртача йиллик кўрсаткичларидан максимал четлашиши 200% га тенг бўлди. Шу боис, электр тармоғига интеграцияланган йирик ФЭС ларни лойиҳалаштириш ва куришда, шунингдек, ФЭСнинг ишлаб чиқариш қуввати, ФИК, ва PR билан бирга ФЭСнинг ЎҚФКни ҳам ҳисобга олиш зарур.



8-расм. ФЭС PR ва ЎҚФКнинг вақтга боғлиқлиги



9-расм. ФЭС PR ва ФИКнинг вақтга боғлиқлиги

Тадқиқотлар натижасида, электр энергиясининг ишлаб чиқарилиши нафақат иқлим таъсирларига, балки энергия тизими билан ўзаро боғлиқ тармоқдаги электр энергиясининг сифатига (узилишлар, паст кучланиш ва ҳ.) боғлиқлиги аниқланди. 2018 йил августида қулай об-ҳаво шароитида, ФЭС томонидан максимал энергия ишлаб чиқариш қиймати 2,2 кВт*соат бўлди, бу эса PR = 95,3% га тўғри келди. Шу билан бирга, ФЭС PRнинг ўртача йиллик қиймати 79,7% ни ташкил этди. PVsyst томонидан башоратланган йўқотиш кўрсаткичлари таҳлили ФЭС нинг ҳарорат эффекти (-8.5%) ва инвертор ўчиб-ёнганда юзага келадиган йўқотишлар (-5.7%) эканлигини кўрсатди.

2-жадвалда электр тармоғига уч-фазали инвертор орқали интеграцияланган, ўрнатилган қувват қиймати 9 кВт бўлган саноат миқёсидаги ФЭСни эксплуатация қилиш кўрсаткичлари келтирилган (9 расм). Табиий иқлим шароитларида куннинг турли ёритилганлик даражаларига мос ораликлари учун: ФЭС максимал чиқиш қуввати 11:30 дан 12:00 гача бўлган ораликда кузатилди (7560 Вт), бунда қуёш нурланиши интенсивлиги энг катта қийматга эришди – 1000 Вт/м², ФЭМ орқа томонининг ҳарорати эса 59,7°C бўлди (2-жадвал). 9-расмдан кўринадик, ФЭС нинг қуёш нурланишини электр энергиясига айлантириш ўртача самарадорлиги 14,4% ни ташкил этади, ўртача PR = 84% ва бу Тошкент шаҳри учун жуда яхши кўрсаткичдир. Чиқиш токи, кучланиши ва қувватининг ҳароратга қараб ўзгариши ҳисоблаб чиқилди, уларнинг ҳарорат коэффицентлари α , β ва γ , мос равишда + 0,04%/°C, - 0,32%/°C, ва -0,47%/°C га тенг бўлди. Қуёш нурланиши тадқиқ қилинаётган

фотоэлектрик қурилманинг самарадорлигига чизиқли пропорционал таъсир кўрсатади, модулнинг юқори иш ҳарорати унинг чиқиш қувватини $0,47\%/^{\circ}\text{C}$ га пасайтиради ва ўлчанадиган кучланиш пасайишига ($-0,32\%/^{\circ}\text{C}$) ҳамда ток қийматининг сезилмас даражада ортишига ($+0,04\%/^{\circ}\text{C}$) олиб келади.

2-жадвал.

Тажриба давомида ФЭСнинг чиқиш кўрсаткичлари

Вакт (соат)	G_b ($\text{Вт}/\text{м}^2$)	ФЭМ орқа томон ҳарорати ($^{\circ}\text{C}$)	ФЭМ сирт ҳарорати ($^{\circ}\text{C}$)	$P_{\text{макс}}$ (Вт)	$I_{\text{к.з.}}$ (А)	$U_{\text{макс}}$ (В)	$U_{\text{х.х.}}$ (В)	FF (%)	PR (%)	η (%)
11:30	1000	59,7	57,6	7560	17,8	462,1	599,3	0,7	0,84	14,38
12:00	1000	57,4	57,3	7554	17,7	463	600,5	0,77	0,84	14,37

Мазкур ишда Наманган вилояти Поп туманида тармоққа уланган 130 кВт қувватли синов ФЭС нинг чиқиш кўрсаткичлари ўрганиш натижалари келтирилган. ФЭСнинг 2017-2018 йиллар мобайнида ўлчанган чиқиш кўрсаткичлари PVSyst и Solarius PV дастурий мажмуаларида моделлаштирилган натижалар билан таққосланди (3-жадвалга қаранг).

3-жадвал.

Назорат қийматларига эга бўлган ўлчов натижаларини ФЭС иш режимини моделлаштириш натижалари билан таққослаш

Ойлар	Ўлчанган қийматлар (Т: 30° , А: -25°) (МВт·соат)	Назорат қийматлари (Т: 30° , А: -25°) (МВт·соат)	Фарқ (%)	Моделлаш тириш натижаси (Т: 30° , А: -25°) (МВт·ч)	Фарқ (%)
Январь	1.895	9.003	-78.9	9.328	-80.0
Февраль	8.752	10.590	-17.3	10.090	-13.2
Март	12.082	15.007	-19.4	11.693	+3.3
Апрель	16.216	16.859	-3.8	15.117	+7.2
Май	17.081	18.415	-7.2	19.154	-10.8
Июнь	17.942	18.835	-4.7	20.707	-13.3
Июль	20.222	20.127	+0.4	22.182	-8.8
Август	17.651	20.080	-12.0	21.372	-17.4
Сентябрь	16.233	18.344	-11.5	18.945	-14.3
Октябрь	10.882	15.559	-30.0	14.707	-26.0
Ноябрь	5.723	11.453	-50.0	9.811	-41.6
Декабрь	2.177	7.364	-70.4	7.181	-69.6
Жами	146.856	181.636	-19.1	180.292	-18.5

Ўрта қувватли ФЭС иш режимини моделлаштиришда ўлчашлар натижаларидан 8-10%га четлашиш мақбул ҳисобланади. 3-жадвалдан кўришиб турибдики, 2018 йил январ ойида ФЭС ишлаб чиқарган электр энергиясининг ўлчанган қийматлари PVSyst и Solarius PV моделлаштириш натижаларидан мос равишда 78,9% ва 80% билан фарқ қилади. Бу мазкур ФЭС уланган тармоқда электр тармоқ ҳолати билан боғлиқ муаммолар мавжудлигини билдиради. Август ойидан март ойига қадар ўлчанган ФЭСнинг ишлаб

чиқариш кўрсаткичларининг башоратланган кўрсаткичларга нисбатан четлашиши кескин фарқ қилади (10%), бу эса афтидан, электр тармоғидаги муайян муаммолар билан боғлиқ (3-жадвал). Шу сабаб ўрганилаётган ФЭС уланган электр тармоғини модернизация қилиш зарур. Шундай қилиб, асосий станцияларнинг етарлича даражада иш қобилиятининг йўқотилиши (45-65%), захира қувватларнинг етишмаслиги ва қўшни энергия тизимларидан мувозанатлаштирувчи қувватни қабул қилишнинг чекланган чегараси мавжудлиги электр тармоғига интеграцияланган ФЭСлардан фойдаланишни ривожлантириш йўлида муайян қийинчиликларни келтириб чиқаради.

Дунё амалиётида кўра, ўтказилган тадқиқотлар шуни кўрсатдики, мавжуд энергия тизимига янги ҚТЭМ қувватларининг электр тармоққа улаганда тизимнинг мослашувчанлик даражаси йиллик улуш 25% гача ҚТЭМ ни ташкил этса муаммоларсиз интеграциялаш имконини беради: биринчидан, бошқарилмайдиган маҳаллий ФЭС ларни улашга йўл қўйилмайди, иккинчидан, зарур ҳолларда ФЭС кучланишни бир маромда тутиб туради ва тармоқни стабил ушлаб туради, учинчидан, ФЭС лар ишлаб чиқариш қувватини уларни бошқа станциялар билан мужассам ҳолатда ишлаши ва ортиқча кучланишни тармоққа чиқиб кетмаслигини назорат қилиш мақсадида башоратланади. Бунда, йирик ҚТЭМ объектларини Ўзбекистон энергия тизимга хавфсиз улаш учун қуйидаги муаммоларни ҳал этиш лозим:

мос қиймтали қувватлар учун энергия сақлаш тизимларини қуриш (Wood Mackenzie башоратларга кўра, 2030 йилда дунёда электр энергияси сақлаш тизимларининг ўрнатилган қувватининг йиғинди қиймати 741 ГВт*соатни ташкил қилади¹¹);

тизимга юқори тезликда ишлайдиган технологиялар, бошқариладиган ўзгарувчан электр энергиясини узатиш тизимлари (FACTS) технологиясининг қурилмалари, синхрон компенсатор (SSSC), тиристорли бошқариладиган кондансатор (TCSC), статик компенсатор (СТАТКОМ) ни улаш¹²;

ФЭСни лойиҳалаш жараёнида тармоқ филтрларини ўрнатиш (юқори гармоникаларни сўндириш учун);

ФЭС ва шамол электр станцияларини ишлатишга топширилишини инобатга олган ҳолда, мамлакат энергия тизимида ортиқча кучланиш юзага келишини ҳисобга олиб, янги электр узатиш линияларини қуриш ва мавжудларини модернизациялаш.

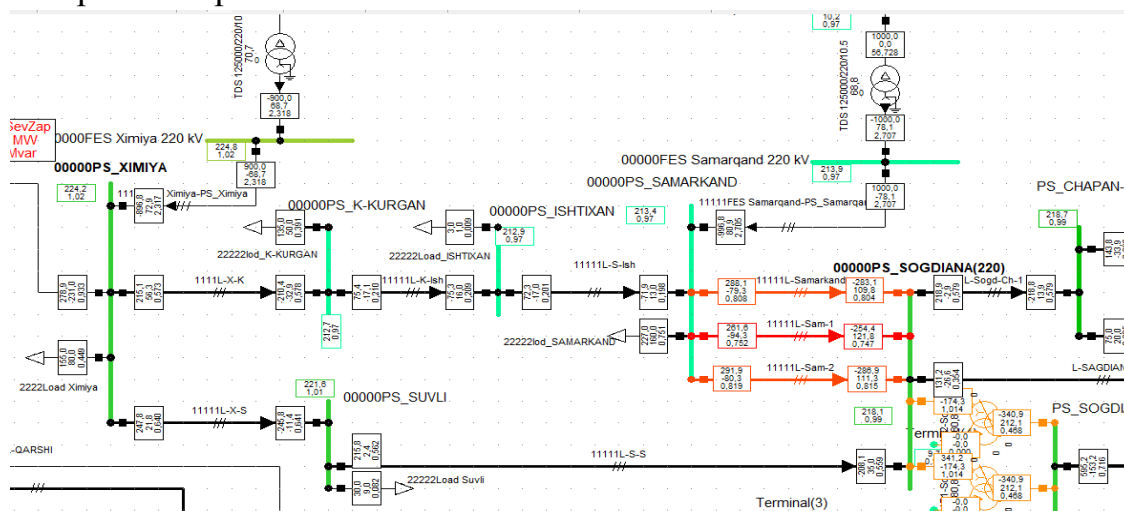
“Ўзбекистон Республикасини 2020-2030 йилларда электр энергияси билан таъминлаш Концепцияси”га кўра, Ўзбекистон Республикаси ҳукумати томонидан 2030 йилга қадар 5000 МВт қувватли ФЭС ва 3000 МВт қувватли шамол электр станцияларини қуриш режалаштирилмоқда. 2021 йил охирига

¹¹ Wood Mackenzie. (2020). Global energy storage outlook:H1 2020. <https://www.woodmac.com/reports/power-markets-global-energy-storage-outlook-h1-2020-398563>.

¹² Хамидов Ш.В. Исследование интеллектуализации электроэнергетики Узбекистана. Автореф. дисс. д-ра тех.наук. – Ташкент, 2019, -32 с. <http://library.ziyounet.uz/ru/book/download/107674>

кадар Ўзбекистонда ҳар бири 100 МВт қувватга эга иккита ФЭСни ишга тушириш режалаштирилган. Шунинг ҳисобга олган ҳолда, 2020 йилга қадар 382,5 МВт, 2021 йилда 601,9 МВт, 2025 йилда 1,24 ГВт қувватни ўрнатиш режалаштирилган¹³. Ҳозирда Навоий ва Самарқанд вилоятларида ҳар бири 100 МВт қувватга эга иккита электр станциясини қуриш бўйича бирламчи тендер ўтказилган. Сувли ва Иштихон подстанциялари энергия тизимига уланиш тугунлари сифатида қаралади. Мазкур ҳудуд халқаро экспертлар томонидан катта қувватли ҚТЭМ объектларини ўрнатиш учун мақбул деб топилган.

Digsilent PF дастурий таъминоти ёрдамида Ўзбекистон энергия тизимнинг Шимолий-ғарбий қисмида максимал ўрнатилиши мумкин бўлган қувватларни аниқлаш мақсадида ҳисоблашлар амалга оширилди (100 МВт дан 1200 МВт гача). 10-расмда, мисол тариқасида, 800 МВт қувватли ФЭСнинг ишлаб чиқаришини ҳисобга олган ҳолда тармоқ чизмаси ва унинг иш режими ҳисоблари келтирилган.



10-расм. Ҳисоблашларда ишлатиладиган тармоқ қисмининг схемаси

Ҳисоблашлар шуни кўрсатдики, нисбатан кичик қувватли ФЭС уланганда ЭЭТ иш режимининг кўрсаткичларига деярли таъсир қилмайди ва L-S-S, L-X-S, L-K-Ish, L-S-Ish линиялари қўшимча қувват ортиб кетишига бардош бера олади. Бироқ, ФЭС қувватларининг янада ошиши энергия тизимининг барқарорлигини ва электр энергиясининг сифат кўрсаткичларини таъминлайдиган энергия оқимлари билан боғлиқ муаммоларга олиб келади.

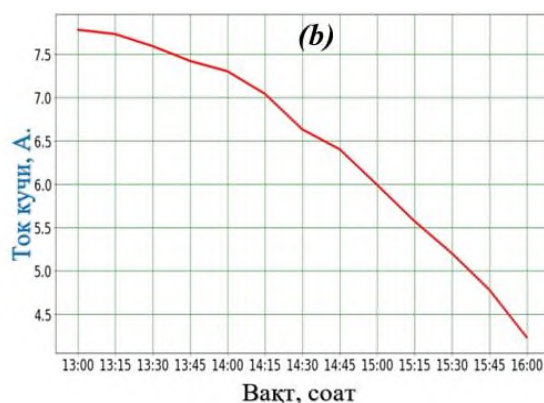
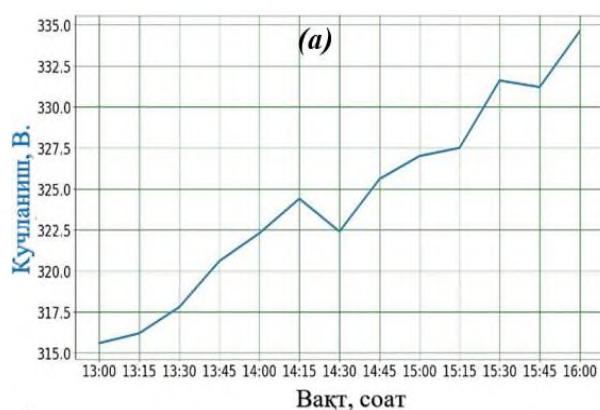
Натижалар шуни кўрсатдики, мавжуд иқлим шароитларида Ўзбекистон энергия тизимининг Шимолий-Ғарбий қисми тармоғига хавфсиз интеграция қилиш учун ФЭСнинг мумкин бўлган максимал қуввати 600 МВтни ташкил этади. Электр тармоғининг шу тугунида ФЭС қувватини 700-800 МВт га оширилганда, дастурий таъминот тўплами муаммоли вазиятни кўрсатди (10-расм, қизил чизиқ). Шундай қилиб, ҚТЭМларга асосланган йирик электр станцияларини қуриш ва уларни марказий тармоқлар интеграциялаш

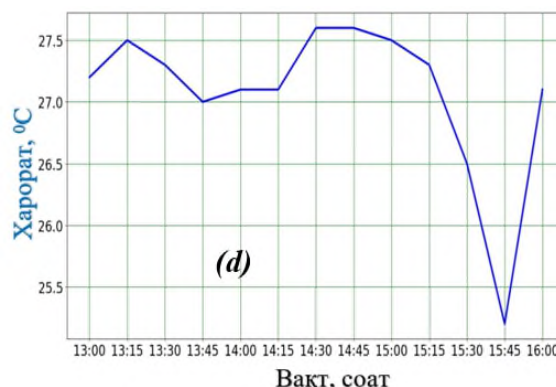
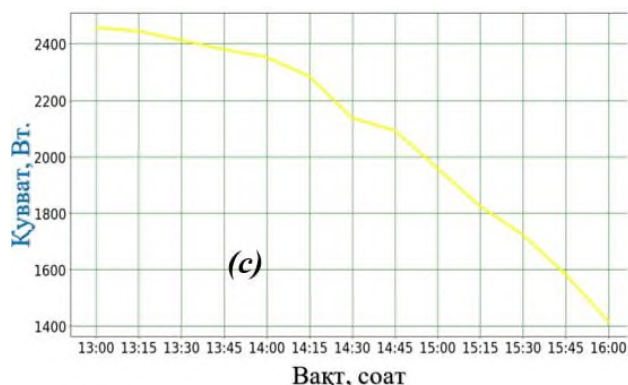
¹³ REN21. 2020. Renewables 2020 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-948393-00-7.

Ўзбекистон энергетика тизимининг кўшма режимлари ва барқарорлигини таҳлил қилиш, тармоқ ускуналарини модернизация қилиш, замонавий энергия сақлаш тизимларини жорий этиш ва реактив қувватни компенсация қилиш бўйича катта ҳажмли тадқиқот ишларини талаб қилади.

Диссертациянинг “**Электр тармоғига интеграцияланган фотоэлектрик тизимларнинг ресурс, техник-иқтисодий ва экологик кўрсаткичларини баҳолаш**” деб номланган бешинчи боби, кичик қувватли ФЭСлар чиқиш кўрсаткичларини атроф-муҳит ҳароратини инобатга олган ҳолда ҳамда реал вақт режимида мониторинг қилиш тизимини яратиш ва ишлаб чиқаришга бағишланган. Бундан ташқари, электр тармоғига интеграцияланган ФЭСларнинг ресурс, техник-иқтисодий ва экологик кўрсаткичларини баҳолаш амалга оширилган.

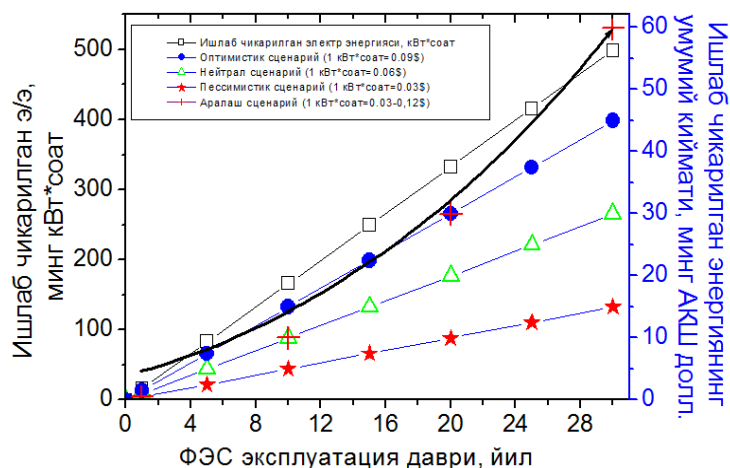
Биз томонимиздан кичик қувватли ФЭСларни чиқиш параметрларини (ишлаб чиқарилган қувват, ток кучи, кучланиш, ФЭМ ва атроф-муҳит ҳарорати, 11-расм) мониторинг қилишга қаратилган тизим яратилган ва ишлаб чиқарилган. Мониторинг тизими компьютер, мониторинг тизими, шунт ва термодатчиклардан иборат. Ўлчаш қурилмаси 8-битли STM32 микроконтроллери негизда яратилган. Ушбу қурилма STM32 микроконтроллердан, занжирни 5В барқарор қувват манбаи билан таъминлайдиган пасайтирувчи стабилизатордан, кучланишни ажратгичдан, шунтдан ва ток қийматини аниқловчи ТКдан, DS1820 ҳарорат датчикларидан, RS232 чиқишдан ва бошқа ёрдамчи радиоэлементлардан ташкил топган. Қурилманинг қувват сарфи 2 Вт, у $9 \div 12В$ доимий кучланиш манбаидан қувват олади, максимал ток сарфи 400 мАа, ҳароратни ўлчаш диапазони -40 дан $+125$ °С гача. Шундай қилиб, диссертация ишини бажаришда ФЭСнинг асосий чиқиш кўрсаткичлари (ишлаб чиқарилган қувват, ток кучи, кучланиш, ФЭМ ва атроф-муҳит ҳарорати) қийматларини ўлчашга имкон берадиган, ўлчаш натижаларини сақлайдиган ва қайта ишлаб визуализация мақсадида компьютерга узатиш имконини берувчи ФЭС мониторинг тизими ишлаб чиқилгди ва яратилди (11-расм).





11-расм. Мониторда акс эттирилувчи: кучланиш (a), ток кучи (b), ишлаб чиқилган кувват (c), ҳарорат (d)ни вақтга боғлиқлиги графиклари

12-расмда 1 кВт*соат электр энергияси учун нархларни ривожланишининг учта сценарийси бўйича тармоққа уланган ўрнатилган куввати 9 кВт бўлган ФЭСнинг 30 йиллик иш цикли давомида ишлаб чиқарилган электр энергияси нархи ва ишлаб чиқариш ҳажмининг йиллар бўйича боғлиқлик графиги келтирилган. Бунда 1 кВт*соат электр энергияси учун нархлар ривожланиши учта сценарий (оптимистик, нейтрал, пессимистик) бўйича қараб чиқилган. Бунда ФЭС харажатларни қоплаш муддатини аниқлашда ФЭМ техник хизмат кўрсатишни талаб қилмайди, 30 йилдан ортиқ ишлаши мумкин ва асосий сармоялар унинг қурилиши вақтида амалга оширилади деб фараз қилинди. ФЭС йиллар бўйича ишлаб чиқарган энергия миқдори ва уни иши иқтисодий самарадорлигини аниқлаш натижаларини таҳлили 9 кВт қувватли ФЭС, электр энергия нархи 0.03 \$/кВт*соат, 0.06 \$/кВт*соат ва 0.09 \$/кВт*соат бўлганда қурилиш харажатларни мос равишда 15.5, 7.9 ва 5 йил давомида оқлаши кўрсатилди. Сўнгра ФЭС ҳақиқий фойда режимида ишлай бошлайди.



12-расм. ФЭС нинг 30 йиллик ишлаш цикли учун йиллар давомида ишлаб чиқарилган 1 кВт*соат электр энергиясининг ишлаб чиқарилиши ва нархига боғлиқлиги ва ўзгариши

баробар камроқ эканлигини кўрсатди (4-жадвал).

Бензин, газ ва қуёш станцияларида ишлаб чиқарилган 1 кВт*соат электр энергияси таннархини қиёсий таҳлил қилиш, ФЭС (9 кВт) томонидан ишлаб чиқарилган электр энергиясининг таннархи анъанавий энергия манбаларидан фойдаланиб ишлаб чиқарилаётган электр энергияси таннаридан деярли ўн

**Анъанавий энергия манбаларидан фойдаланган ҳолда ва ФЭС томонидан ишлаб
чиқарилган электр энергиясининг нархини таққослаш**

№	Йиллар	Ишлаб чиқарилган электр энергияси ҳажми, кВт*соат	Ишлаб чиқарилган электр энергияси нархи, АҚШ долл.			1 кВт*соат электр энергияси таннархи, АҚШ долл.		
			ФЭС	Бензин	Газ	ФЭС	Бензин	газ
1	1	16633	499	6006	4671	0,03	0,57	0,44
2	5	83165	3326	23250	9015	0,04	0,44	0,17
3	10	166330	9980	44805	14445	0,06	0,85	0,14
4	15	249495	22454	66360	19875	0,09	0,42	0,13

Шундай қилиб, кичик қувватли бензин, газ ва қуёш станциялари техник-иқтисодий кўрсаткичларининг қиёсий таҳлилий тадқиқотлари асосида куйидаги хулосаларга эришилди:

- ФЭС томонидан ишлаб чиқарилган электр энергиясининг нархи анъанавий энергия манбаларини ишлатадиган автоном бензинли (газ) электр станцияси ишлаб чиқарган электр энергияси нархидан ўн барабар паст.

2019 йил 21 майда ЎзРда қайта тикланадиган энергия манбалари соҳасида қурилмалар ишлаб чиқарувчиларга, шунингдек электр энергияси ишлаб чиқарувчиларга солиқ имтиёзларини берадиган янги қонун қабул қилинди¹⁴. Шу сабаб, мамлакат раҳбарияти 2030 йилга қадар республиканинг умумий энергия балансидаги қайта тикланадиган энергия манбалари улушини 25 фоизгача оширишни мақсад қилиб қўйган. Ушбу кўрсаткичга эришиш учун, энергетика вазирлиги томонидан ҚТЭМ соҳасида йирик инвестиция лойиҳаларини амалга ошириш чора-тадбирларни ишлаб чиқмоқда.

Моделлаштириш натижалари шуни кўрсатдики, Ўзбекистондаги ўртача 5 ГВт қувватли ФЭС йилига 9,9 миллиард кВт*соат электр энергияси ишлаб чиқаради¹⁵. Замонавий газ билан ишлайдиган электр станциялари 1 кВт электр энергиясини ишлаб чиқариш учун тахминан 0,23-0,35 м³/соат ёқилғи сарфлайди. Шундай қилиб, табиий газнинг солиштирма иқтисоди йилига 3,465 млрд.м³ни ташкил қилади. Мавжуд маълумотларга кўра, 2019 йилда, Хитой Ўзбекистонга бир минг м³ табиий газ учун 182,25 АҚШ долл. тўлаган. Бу ҳолда, 5 ГВт қувватли ФЭС мамлакат учун бир йилда 3,465 млрд.м³*0.18225 = 631.5 млн. АҚШ долл. миқдоридаги маблағни тежаш имконини беради. Фотоэлектрик тизимлар ишлаб чиқарилган ҳар бир кВт*соат энергияга 0,62 кг СО₂ чиқишини тежайди¹⁶. Ушбу маълумотни ҳисобга олган ҳолда, 5 ГВт ФЭС бир йилда 3,465 млрд.м³ табиий газ ёниши натижасида атмосферага чиқадиган 9,9 млрд. (кВт*соат)*0,62 кг/(кВт*соат) = 6.138 млн.т.

¹⁴ Ўзбекистон Республикасининг №ЎРК-539 «Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланиш тўғрисида»ги Қонуни, 21 май 2019 йил.

¹⁵ https://minenergy.uz/uploads/1a28427c-cf47-415e-da5c-47d2c7564095_media_.pdf

¹⁶ <https://files.sma.de/downloads/SMix-UEN091910.pdf>

CO₂ чиқишининг олдини олади. Париж Иқлим Ўзгаришлари Иқтисодиёт Институтининг иқтисодчиси Николас Стерн ва Жозеф Стиглиц бошчилигидаги CO₂ нархлари бўйича юқори даражадаги комиссия иқтисодий ўсишни сақлаган ҳолда ўртача ҳароратнинг кўтарилишини 2°C оралиғида ушлаб туриш мақсадида 2020 йилга келиб атмосферадаги карбонат ангидрид газини CO₂ тоннаси учун 40-80 долларгача, 2030 йилга келиб эса 50-100 долларгача камайтиришни тавсия қилади. Ушбуни ҳисобга олган ҳолда, 5 ГВт ФЭС атмосферага CO₂ чиқиндиларини камайтириш орқали республика бир йилда ўртача 360 млн. АҚШ долл. тежашига ишонч ҳосил қилиш мумкин.

ФЭСдан фойдаланишнинг муҳим жиҳати улардан фойдаланишда ёқилғи талаб қилинмаслигидадир. Ушбу жиҳат электр энергиясининг нормаллаштирилган нархини сезиларли даражада пасайтиради. Ҳисоб-китоблар шуни кўрсатдики, ЎзР иқлим шароитида 5 ГВт ФЭСнинг 30-йиллик цикли давомида, 1 МВт электр энергияси ишлаб чиқариш учун харажатлар 19.1 АҚШ доллариға тенг бўлади (1 АҚШ долл. = 10367 сўм).

Айнан Ўзбекистон шароити учун, куёш нурланиши интенсивлиги 1800-2100 кВт*соат/м² ва ФЭМнинг ФИК=18%, ишлаб чиқарувчанлик коэффициенти ≥ 80%, ЎҚФК 16% бўлганда электр энергия 1 кВт*соат энергия нархи 0,028 АҚШ долл./кВт*соат га тенг бўлган ҳолда, 5 ГВт қувватга эга ФЭС учун иқтисодий харажатларни қоплаш муддати 10-12 йилни ташкил қилади.

Хулоса

Диссертацияда қўйилган масалаларни ҳал қилиш бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим қилинмоқда:

1. ФЭСнинг асосий чиқиш кўрсаткичлари қийматларини ўлчашга имкон берадиган ва ўлчаш натижаларини сақлаш ҳамда визуализация қилиш учун компьютерга узатиш имконини берадиган ФЭС мониторинг тизими яратилган ва ишлаб чиқилган. Дастурий таъминотга эга бўлган ишлаб чиқилган мониторинг тизимининг бошқалар билан таққослаганда афзалликлари нисбатан арзонлиги, таъмирлашга яроқлилиги, маҳаллий иқлим шароитларига мослашувчанлиги, фойдаланиш учун қулайлиги ва тармоқ кўрсаткичларининг узилишларига чидамлилигидадир;

2. Паст кучланишли маҳаллий электр тармоғига интеграцияланган ФЭСнинг ўртача кунлик, ўртача ойлик ва ўртача йиллик ЎҚФК ни баҳолаш амалга оширилган ва республиканинг иқлим шароитида ФЭСнинг ўртача ойлик ЎҚФК кўрсаткичлари 8,3 дан 23,8% гача ўзгариши аниқланган;

3. Маҳаллий электр тармоғига интеграцияланган ФЭСларнинг актив қувватини ишлаб чиқариш жараёнининг беқарорлигини ҳисобга олган ҳолда электр энергиясини ишлаб чиқариш ва истеъмол қилиш жараёнларини моделлаштириш усуллари ишлаб чиқилди. ФЭС ишлаб чиқарадиган актив

қувватнинг ошиши билан электр тармоғидаги энергия сарфи аста секин нолгача камайиши кўрсатилган. Олинган натижалар электр тармоғига интеграцияланган ФЭСни режалаштириш ва лойиҳалашда илмий асосланган дастлабки маълумотлар бўлиб хизмат қилади;

4. DigSilent Power Factory дастурий таъминот тўпламида моделлаштириш натижаларини таҳлил қилиш асосида, мавжуд ишлаб чиқариш қувватларнинг, хусусан, зарур захира қувватларини, ёрдамчи хизмат кўрсатиш комплексларини модернизация қилинаётганлигини ва замонавий реактив қувватни бошқариш тизимларини ҳисобга олган ҳолда, республика миллий концепциясида кўрсатилган 5 ГВт қувватли ФЭСни ЎзР энергетика тизимига улаш вазифасининг бажарилишига, агар қувватнинг асосий, 3 ГВт дан ортиқ қисми, кичик ва ўрта қувватли (тақсимланган генерация) ФЭС шаклида ва 1 ГВт дан ортиқ қувват йирик қувватли ФЭС хавфсиз тарзда ўрнатилгандагина эришилиши мумкин;

5. Магнит майдон таъсирида яримўтказгичли ҚЭларида фототокка таъсир кўрсатадиган p-n ўтишнинг кўрсаткичлари текширилди. Магнит майдон таъсирида “саёз” зарядланган сатҳлар орқали экситон рекомбинацияси эҳтимолининг ошиши сабабли, ҚЭ фототокининг ўзгариши экситонларнинг диффузион узунлигининг ўзгаришига боғлиқлиги аниқланди. Si ва GaAs асосидаги ҚЭларида экситонларнинг фототокга таъсири мос равишда 3÷6% ва 8÷13%ни ташкил этиши тажрибада кўрсатилди;

6. ФЭСнинг чиқиш кўрсаткичларини ўлчаш учун автоматик кузатув режимида ишловчи, кучланишни етарлича катта қиймат оралиғида юқори аниқликда ўлчаш имконини берувчи тезкор кучайтиргич қўлланган оригинал рақамли вольтметр яратилди ва ишлаб чиқилди;

7. Поликристалл кремний асосидаги фотовольтаик технологиялар Ўзбекистонда иқлим шароитига мос йирик ФЭСларни яратишда энг мақбули эканлиги, ва улар асосидаги ФЭСда ҳарорат йўқотиши монокристалл кремний асосидаги ФЭС га қараганда 2% кам эканлиги аниқланди.

8. Қуйидаги стандартлар ишлаб чиқилган. 1). О'zDSt 3075:2016. “Фотоэлектрик тизимлар: Атамалар, таърифлар” (1-илова); 2). О'zDSt 3076:2016. “Қуёш фотоэлектрик станциялари. Умумий электр таъминоти тармоқларига уланган тизимлар. Станциялар (тизимлар)га қўйиладиган минимал талаблар, йўлланма ҳужжатлар, қабул қилиш ва текшириш”, Энергетика вазирлиги, “Ўзэлтехсаноат” АЖ ва ЎзР “Ўзстандарт” агентлиги тизимида жорий қилинган ва фойдаланилмоқда.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
DSc.03/10.12.2019. Т.03.03 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИНСТИТУТ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

МАТЧАНОВ НУРАДДИН АЗАДОВИЧ

**КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ И ИХ ИНТЕГРАЦИИ К ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

05.05.01 – Энергетические системы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА НАУК (DSc)
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2020

Тема докторской (DSc) диссертации по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за №B2019.4.DSc/T324.

Докторская диссертация выполнена в “Международном институте солнечной энергии”.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекском, русском, английском (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.tdtu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyo.net.uz).

Научный консультант: Мирзабаев Акрам Махкамович
доктор технических наук

Официальные оппоненты: Мисриханов Мисрихан Шапиевич
доктор технических наук, профессор

Гайибов Тулкин Шерназарович
доктор технических наук, профессор

Рахимов Рустам Хакимович
доктор технических наук.

Ведущая организация: АО “Теплоэлектропроект”

Защита диссертации состоится «09» 12 2020 года в 13⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc.03/10.12.2019.T.03.03. при Ташкентском государственном техническом университете. Адрес: 100095, г.Ташкент, ул. Университетская, 2, Тел.: (99871) 246-46-00, Факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (регистрационный номер №37). Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2, Тел.: (99871) 246-03-41.

Автореферат диссертации разослан «27» ноября 2020 г.

(реестр протокола рассылки № 13 от «27» ноября 2020 г.)



К.Р. Аллаев

Председатель Научного совета по присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор, академик АН РУз.

О.Х. Ишназаров

Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, д.т.н., с.н.с.

М.И. Ибодуллаев

Председатель Научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.т.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. Сегодня во всем мире уделяется большое внимание на развитие зелёной энергетики путем расширения степени использования возобновляемых источников энергии, прежде всего солнечной и ветровой энергии, в частности, на снижение нагрузки топливно-энергетического баланса страны безопасным и надежным подключением энергосистем на основе возобновляемой энергетики в электрическую сеть. На сегодняшний день в развитых странах имеются различные подходы при определении показателей интегрированных фотоэлектрических систем к электрической сети и их адаптации к требованиям сети, а также определении оптимальных режимов фото энергетических систем при их интегрировании в распределительные сети¹. При этом особое внимание уделяется на разработку новых подходов для систематического исследования проблем в энергосистемах, возникающих из-за нестабильности выдачи мощности ветроустановками и солнечными станциями.

Также мировым научным сообществом ведутся научные исследования, направленные на изучение фотоэнергетических систем, интегрированных к электрической сети, разработку и создание методов управления выходными параметрами энергосистем на основе возобновляемой энергетики и их составляющих. В этом направлении особо приоритетными считаются оценка и прогнозирование ресурсных, технических, экономических и экологических показателей энергосистем на основе возобновляемых источников энергии с учётом особенностей рассматриваемой сети и климатических факторов определенного региона в целях обеспечения безопасной интеграции их к электрическим сетям. При рассмотрении этих вопросов одной **из актуальных задач** является комплексное исследование фотоэнергетических систем с целью обеспечения их безопасной и надёжной интеграции к электрической сети, а также режимов их эксплуатации, которые требует новых подходов для решения проблем повышения эффективности использования солнечной энергии в промышленных масштабах в республике.

В Республике, в сфере энергетики, на сегодняшний день реализовываются меры по повышению энергоэффективности, внедрению энергосберегающих технологий, а также развитию возобновляемых источников энергии. В частности, в Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы, указаны такие задачи, как – сокращение энергоёмкости и ресурсоёмкости экономики, широкое внедрение в производство энергосберегающих технологий, расширение использования возобновляемых источников энергии, и др. В целях

¹ www.sciencedirect.com, www.scopus.com, www.literature.rockwellautomation.com

своевременного и качественного выполнения поставленных задач, комплексное исследование процессов интеграции фотоэнергетических систем к электрической сети является приоритетным.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в следующих Указах и Постановлениях Президента РУз: №УП-4947 от 07.02.2017г. «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», №УП-5544 от 21.09.2018 «Об утверждении стратегии инновационного развития республики Узбекистан на 2019 - 2021 годы», №ПП-4422 от 22.08.2019г. «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии», №ПП-4477 от 04.10.2019г. «Об утверждении стратегии по переходу Республики Узбекистан на «зеленую» экономику на период 2019 - 2030 года также в других нормативно-правовых документах, принятых в этой сфере, что в свою очередь доказывает востребованность тематики исследования.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением науки и технологий РУз «И. Энергетика, энерго- и ресурсосбережение» и развивает направления Программы прикладных исследований - IV: Развитие методов использования возобновляемых источников энергии, создание технологий и устройств на основе нанотехнологий, фотоники и других передовых технологий².

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации. Научные исследования, направленные на изучение интегрированных фотоэнергетических систем к электрической сети, разработке и созданию методов управления выходными параметрами энергосистем на основе возобновляемой энергетики и их составляющих, осуществляются в таких ведущих научных центрах и высших образовательных учреждениях мира, как Национальная лаборатория по изучению возобновляемой энергии (NREL), Института солнечных энергетических систем имени Фраунгофера (FISES), Пекинский научно-исследовательский институт солнечной энергии (BSERI), Коейский научно-исследовательский институт энергетики (KIER), Сингапурский научно-исследовательский институт солнечной энергии (SERIS), Научно-исследовательский институт солнечной энергии Национального университета Малайзии (SERINUM), Научно-исследовательский институт солнечной энергии (Индия), Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Россия), Ташкентский государственный технический университет, Международный институт солнечной энергии (МИСЭ) и во многих других научных центрах.

² Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы» от 7 февраля 2017г.

В результате выполненных исследований по разработке фотоэлектрических систем и выбору их основных параметров и показателей с целью их безопасной интеграции к электрической сети в ведущих научных центрах решены ряд актуальных задач и получены следующие научные результаты: на основе результатов расчетно-теоретических и экспериментальных исследований по разработке интегрированных фотоэлектрических систем к электрической сети проведен анализ распределения генерации на основе углеводородного топлива и возобновляемых источников энергии; выявлены необходимые критерии по безопасному подключению к электрическим сетям и разработаны программные продукты для их оценки; разработаны динамические модели интегрированных с возобновляемыми источниками энергии распределительных сетей дающую возможность оценить их ресурсные, технические, экономические и экологические показатели в целом с учётом особенностей сети; созданы крупные станции на основе переменной возобновляемой энергии подключенные к централизованной и локальной сети имеющие резервные системы питания; разработаны методы и режимы эксплуатации а также управления их режимными параметрами.

Степень изученности проблемы. До настоящего времени, проблемы преобразования солнечной энергии с помощью фотоэлектрических систем активно изучались в национальных лабораториях США, Испании, Германии, КНР, Индии, Российской Федерации и многих других стран. Например, в NREL установили новый рекорд, создав солнечные элементы с КПД=47.1% на основе многопереходных гетероструктур с использованием многократной концентрации³. Ученые из FISES создали инвертор с рекордным коэффициентом преобразования 99.3%⁴. Учёные Университета Абдулмалик Эссади (Марокко) создали интегрированную фотоэлектрическую систему в электрическую сеть с коэффициентом производительности 98%⁵.

Вопросы посвященной методике рационального сочетания возобновляемой и традиционной энергетики, методы оценки и параметров солнечных ветровых и гидравлических энергоустановок в зависимости от энергопотребления и показателей сети, особенности электропотребления предприятий на основе применения возобновляемой энергетики, классификация и анализ систем электроснабжения и показателей электроэффективности интегрированных сетей изучены в работах С.К.

³ John F. Geisz, Ryan M. France, Kevin L. Schulte, Myles A. Steiner, Andrew G. Norman, Harvey L. Guthrey, Matthew R. Young, Tao Song, Thomas Moriarty // Six-junction III–V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration // Nature Energy volume 5, pages 326–335 (2020).

⁴ <http://www.renewableenergyfocus.com/view/2938/fraunhofer>

⁵ Kamal Attari, Ali Elyaakoubi, Adel Asselman // Performance analysis and investigation of a grid-connected photovoltaic installation in Morocco // Energy Reports, Volume 2, November 2016, Pages 261-266.

Шерьязова⁶, С.М. Воронина⁷, Б.В. Лукутина⁸ и др. Методологические основы исследования ведущих отечественных и зарубежных ученых и практик внесших значительный вклад в развитие теоретических положений и практики оценки индикаторов, и критериев обеспечения энергетической безопасности при подключении возобновляемой энергии к электрической сети рассмотрены в работах таких авторов как В.В. Бушуев, Н.И. Воропай, Д.С. Стребков, E.D. Spooner, В.Кroposki, I. MacGill, M.A. Eltawil, P.A. Зоҳидов, К.Р. Аллаев и многие другие. Однако, в вышеуказанных работах вопросы комплексного исследования фотоэнергетических систем, интегрированных в электрическую сеть, с учетом влияния на них особенностей распределительных сетей, актинометрических и климатических показателей окружающей среды, начиная от солнечных элементов до интегрированных фотоэлектрических систем в электрическую сеть, мало изучены.

В республике до 2012 года исследования показателей параметров фотоэлектрических систем проводились отдельно без учета их интеграции к общей электрической сети, вопросы моделированию процессов в них с целью их интеграции к общей электрической сети начаты в рамках проекта ТА 8008 «Развитие солнечной энергетики в Узбекистане»⁹. В Узбекистане первые практические работы в области разработки, проектированию и созданию фотоэлектрических систем, интегрированных в электрическую сеть начаты в рамках проектов, выполненных в Международном институте солнечной энергии. Опыт зарубежных и отечественных специалистов-сетевиков показывает, что проблемы в энергосистемах из-за нестабильности выдачи мощности ветроустановками и солнечными станциями начинаются после достижения ими доли в 20–25% от общей установленной мощности системы. Вместе с тем, в мире наблюдается тенденция падения цен на фотоэлектрические модули и совершенствование солнечных технологий, включая систем хранения энергии, что привело к глобальному росту числа фотоэлектрических систем, присоединенных к распределительным сетям.

С учетом вышесказанного основной решаемой проблемой в предлагаемой диссертационной работе является определение показателей интегрированных фотоэлектрических систем к электрической сети, режимов их эксплуатации, поиск путей повышения эффективности солнечных элементов и модулей, исследование энергетических показателей фотоэлектрических систем в условиях изменения солнечной радиации и

⁶ Шерьязов С.К. Выбор рационального сочетания традиционных и возобновляемых энергоресурсов в системе энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей (на примере Челябинской области): рекомендации для руководителей энергетических служб АПК / С.К. Шерьязов. – Челябинск: ЧГАА, 2010. – 40 с.

⁷ Воронин, С.М. Анализ направлений совершенствования солнечных электростанций / А.А. Таран, С.М. Воронин // Вестник Сумского национального аграрного университета. – 2012. – №16. – с. 137-139.

⁸ Лукутин Б.В., Муравлев И.О. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. Томск: Томский политехнический университет, 2015. 112 с.

⁹ <https://www.adb.org/projects/45120-001/main>

влияния климатических факторов, а также разработка нормативно-технических документов и типовых решений касательно проектов "резидентальных" и "коммерческих" фотоэлектрических систем, интегрированных к электрической сети, устанавливаемых на территории РУз на основе международных и национальных стандартов, норм и требований.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в Международном институте солнечной энергии в рамках Государственной программы научно-исследовательских работ: ОТ-Атех-2018-517 «Интегрирование фотоэлектрических систем в централизованную сеть электроснабжения» (2018-2020гг.), хоздоговор 06/01-2015 от 01.07.2015г.«Разработка научно-технической продукции по подключению крупных фотоэлектрических систем к электрической сети».

Целью диссертационной работы является комплексное исследование интегрированных фотоэнергетических систем в электрическую сеть с учётом внешних климатических факторов и особенностей энергосистемы Узбекистана.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи исследования:

формирование основных принципов интеграции фотоэлектрических систем к электрической сети;

исследование зависимости энергетических показателей фотоэлектрических модулей и фотоэлектрических систем на их основе интегрированных в электрическую сеть в условиях изменения интенсивности солнечного излучения и влияния климатических факторов;

изучение эффективных методов эксплуатации интегрированных энергетических систем на основе возобновляемой энергии;

теоретическое и экспериментальное исследование механизмов токопрохождения и разработка методики повышения эффективности фотоэлектрических элементов;

прогнозная оценка ресурсных, технико-экономических и экологических показателей интегрированных фотоэлектрических систем в электрическую сеть.

Объектом исследования являются интегрированные фотоэлектрические системы (станции) в электрическую сеть.

Предметом исследования являются основные электроэнергетические показатели интегрированных фотоэлектрических систем в электрическую сеть и их режимные параметры при различных схемах их подключения.

Методы исследований: методы математического моделирования процессов преобразования солнечной энергии в электрическую и симуляции режимов работы интегрированных фотоэлектрических систем в электрическую сеть, методы системного подхода и анализа современной

теории расчета энергетических систем.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

усовершенствован метод управления процессами фотогенерации для получения более эффективных солнечных элементов с высокими выходными параметрами, позволяющими улучшить ресурсные показатели систем на их основе;

разработана методика комплексного мониторинга фотоэлектрических систем малой мощности;

выполнена оценка среднедневной, среднемесячной и среднегодовой коэффициента использования установленной мощности фотоэлектрических систем, интегрированных к низковольтной локальной электрической сети;

выполнена расчетно-экспериментальная оценка коэффициента производительности интегрированных фотоэлектрических систем в низковольтную локальную электрическую сеть, и на этой основе выявлены среднегодовые прогнозные показатели;

разработана методика моделирования процессов генерации и потребления электрической энергии с учетом нестабильности процесса генерации активной мощности интегрированных фотоэлектрических систем в локальную электрическую сеть;

выявлено, плавное уменьшение потребляемой энергии от электрической сети с увеличением активной мощности вырабатываемой фотоэлектрическими системами;

разработаны критерии и выявлены наиболее благополучные регионы для создания крупных интегрированных фотоэлектрических систем в электрическую сеть и определены их технико-экономические и экологические показатели.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

выявлены допустимые мощности для безопасной интеграции фотоэлектрических систем к энергосистеме РУз в зависимости их электроэнергетических и технических показателей, а также выявлены наиболее благополучные регионы РУз для создания интегрированных фотоэлектрических систем в электрическую сеть и определены их технико-экономические и экологические показатели;

выявлено, что при климатических условиях республики, прогнозные показатели годовой производительной мощности фотоэлектрической системы, подключенной к электросети, изменяется в диапазоне от 8.3% до 23.8%

разработан и подготовлен к производству цифровой вольтметр с автослежением для системы мониторинга, позволяющий обеспечить автослежение подстройки верхнего предела диапазона измерения постоянного напряжения, с расширением диапазона измеряемого напряжения (до 610 В) до

5% с точностью до 10% при температуре окружающей среды $t=25^{\circ}\text{C}$.

Достоверность результатов исследования подтверждается применением проверенных временем методов исследований, использованием многолетних среднестатистических метеоданных окружающей среды, результатами энергетических исследований и лицензионных программных обеспечений. Предложенные в работе технические решения и обоснованность основных научных положений, полученных в диссертационной работе, подтверждаются высоким уровнем и статистикой выполненных исследований.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в том, что они позволяют наиболее достоверно прогнозировать ресурсные показатели интегрированных фотоэлектрических систем в электрическую сеть, необходимых при планировании нагрузки сети.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработаны стандарты по фотоэлектрическим системам, подключаемым к сетям электроснабжения общего назначения позволят повысить эффективность и надёжность при их использовании.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов комплексного исследования, интегрированных фотоэнергетических систем в электрическую сеть:

Государственный стандарт: O'zDSt 3076:2016. «Станции солнечные фотоэлектрические. Системы, подключаемые к сетям электроснабжения общего назначения. Минимальные требования к станциям (системам), сопроводительной документации, приемки и обследования», утвержден Постановлением Агентства «Узстандарт» (№05-755 от 06.04.2016г.), включен в государственный реестр и введен в действие с 11 апреля 2016 года (Справка Агентства «Узстандарт» №03/3000 от 29.09.2020г.). В результате были созданы условия для широкомасштабного внедрения технологий солнечной энергии в различные отрасли экономики, а также расширения объема импорта и экспорта технологий в этой сфере и развития промышленности солнечной энергии в республике;

методика комплексного мониторинга фотоэлектрических систем малой мощности и программный продукт для её реализации, а также разработанное и изготовленное устройство-цифровой вольтметр для системы мониторинга, внедрены на объектах ООО «Solar Development Systems» в Кашкадарьинской области с общей мощностью 20 кВт (Справка Ассоциации «Узэлтехсаноат» №04-1/1749 от 25.09.2020г.). В результате использования разработки достигнуто экономии расходов, связанных с обеспечением сбора данных о состоянии фотоэлектрических модулей и других комплектующих фотоэлектрических систем, прогнозированием аварийных ситуаций на станциях ранней стадии, обнаружив негативные изменения в них, в размере 307 944 000 сум в год;

схемно-технологическое решение по подключению фотоэлектрических систем малой мощности к распределительной сети внедрено при подключении фотоэлектрических систем с общей мощностью 28 кВт в низковольтную локальную сеть Международного института солнечной энергии (Справка Министерства энергетики РУз №03-07-5945 от 05.11.2020г.). В результате эксплуатации фотоэлектрических систем с общей мощностью 28 кВт выработано 43800 кВт*ч электроэнергии в год, сэкономлено 30660 м³ природного газа, предотвращено 19 тонн выбросов CO₂ в атмосферу.

схемно-технологическое решение по подключению фотоэлектрических систем к распределительной сети внедрено при подключении фотоэлектрической системы гибридного типа с номинальной мощностью 3 кВт (с системой дистанционного мониторинга) к электрической сети на учебно-испытательном полигоне Нукусского государственного университета имени Бердак. В результате, с помощью этой системы одновременно выработано 4136.49 кВт*ч электроэнергии в год, а также она используется в качестве экспериментального объекта в лекционных и практических занятиях по дисциплинам «Альтернативные источники энергии» для специальности 5310200 «Электроэнергетика» на кафедре «Электроэнергетика» физического факультета данного университета (Справка Министерства высшего и среднего специального образования РУз №89-02-354 от 25.09.2020г.).

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования были обсуждены на 10 международных и 5 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано всего 40 печатных работ, из них 17 научных статей, в том числе 7 в республиканских и 10 в зарубежных изданиях, рекомендованных ВАК РУз для публикации основных результатов докторской диссертации, получен 1 патент на полезную модель и 4 свидетельства на программные продукты.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, списка опубликованных работ и приложений. Объем диссертации составляет 232 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, отмечено соответствие исследования основным приоритетным направлениям развития науки и технологий в республике, приведены обзор международных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, указаны объекты, предмет и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Проблемы развития использования интегрированных электроэнергетических систем**» рассмотрено состояние и тенденции развития использования возобновляемых источников энергии в мире и РУз. Проанализированы технический потенциал основных видов возобновляемых источников энергии, в том числе, солнечные ресурсы местности на основе многолетних актинометрических данных, полученных с наземных метеостанций и спутников, и проведено их сравнение, а также изучены распределительные сети в РУз. Изучены технологии фотовольтаики: солнечных элементов (СЭ), фотоэлектрических модулей (ФЭМ) и инверторы, а также состояние исследований по повышению эффективности СЭ и ФЭМ, и их интеграции к электрической сети. Изучены международные практики по безопасной подключению и эффективной эксплуатации интегрированных ФЭС в электрическую сеть. Рассмотрены ресурсные, технико-экономические и экологические показатели интегрированных фотоэнергетических систем в электрическую сеть. На основе анализа имеющихся экспериментальных и теоретических данных сформулирована постановка задач по комплексному исследованию интегрированных ФЭС в электрическую сеть в условиях Узбекистана.

Вторая глава «**Разработка методики определения характеристических параметров, предназначенных для оценки фотоэлектрических параметров солнечных элементов**» посвящена исследованию основных электрофизических и фотоэлектрических параметров, моделей расчета различных СЭ и разработке способов повышения фототока в них. Изучены особенности нагрузочных вольтамперных характеристик и механизмы токопрохождения в СЭ на основе *Si*, *α -Si*, *GaAs* и *CIGS* при различных уровнях их освещенности солнечным светом. Сделана попытка, создания высокоэффективных СЭ, и на их базе ФЭМ, и систем с наперед заданными параметрами, с целью выявления необходимых условий для эффективной интеграции последних в энергетическую систему.

Исследованы механизмы токопрохождения СЭ и влияния магнитного поля (0,55Т) на фототок I_{ph} в *Si* и *GaAs* СЭ. В стационарном случае распределения концентрации носителей тока и экситонов $N(x)$ будет описываться следующими выражениями:

$$N_{e,h}(x) = N_{e,h}(0)e^{-\frac{x}{L_{e,h}}}, \quad (1)$$

$$N_{exc}(x) = N_{exc}(0)e^{-\frac{x}{L_{exc}}}, \quad (2)$$

здесь $N_{exc}(0)$ – концентрация вблизи поверхности кристалла, $L_{e,h}$ и L_{exc} – диффузионная длина носителей тока и экситонов, соответственно.

Фототок I_{ph} солнечного элемента должен быть пропорциональным концентрации неосновных носителей зарядов и экситонов:

$$I_{ph} \sim N_{e,h}(L_{pn}) + N_{exc}(L_{pn}) = N_{e,h}(0)e^{-\frac{L_{pn}}{L_{e,h}}} + N_{exc}(0)e^{-\frac{L_{pn}}{L_{exc}}},$$

где, L_{pn} – глубина р-п перехода. При наличии магнитного поля фототок будет пропорциональным:

$$I_{ph}(H) \sim N_{e,h}^H(0)e^{-\frac{L_{pn}}{L_{e,h}}}. \quad (3)$$

Тогда, изменение фототока р-п перехода ΔI будет описана следующим выражением:

$$\Delta I = [I_{ph} - I_{ph}(H)] \sim N_{e,h}(0)e^{-\frac{L_{pn}}{L_{e,h}}} + N_{exc}(0)e^{-\frac{L_{pn}}{L_{exc}}} - N_{e,h}^H(0)e^{-\frac{L_{pn}}{L_{e,h}}}$$

или,

$$\Delta I = [I_{ph} - I_{ph}(H)] \sim N_{e,h}(0) \left[e^{-\frac{L_{pn}}{L_{exc}}} - e^{-\frac{L_{pn}}{L_{e,h}}} \right]. \quad (4)$$

Как видно из (4), величина ΔI главным образом зависит от соотношения диффузионных длин носителей тока $L_{e,h}$ и экситонов L_{exc} , от глубины р-п перехода L_{pn} и концентрации экситонов N_{exc} вблизи поверхности полупроводника. Величина фототока I_{ph} не должна изменяться если $L_{exc} = L_{e,h}$; должна увеличиться, если $L_{exc} < L_{e,h}$, и должна уменьшаться, если $L_{exc} > L_{e,h}$. Из (4) также видно, что измерения на образцах с различными глубинами р-п переходов позволяет определить величину L_{exc} более точно.

На рис. 1, показано изменение фототока GaAs №2 с КПД 23% и Si №2 с КПД 15% СЭ при освещении образцов лампой накаливания и полупроводниковым лазером (1 mW, $\lambda = 0.63 - 0.68 \mu m$). Диффузионная длина носителей в базе прибора была $\sim 3-4 \mu m$ и в приповерхностной сильнолегированной области $L_{pn} \sim 1 \mu m$ (по паспортным данным СЭ). Измерения показали, что при комнатной температуре ΔI составляет $8 \div 13\%$, $\Delta I = I_{ph} - I_{ph}(H) < 0$. Следовательно, в приповерхностной области солнечного элемента $L_{exc} > L_{e,h} \sim 1 \mu m$, и вклад экситонов составляет $\sim 8 \div 13\%$. Величина I_{ph} линейно растет с увеличением интенсивности освещения. В среде жидкого азота вклад экситонов возрастает до $14 \div 17\%$ (рис. 1). На рис. 2 показано изменение фототока в Si СЭ в магнитном поле. Диффузионная длина носителей в базе приборов $\sim 60-80 \mu m$ и в приповерхностной сильнолегированной р-области $L_{e,h} \sim 0,6-0,9 \mu m$, $L_{pn} \sim 1 \mu m$. В кремнии генерация и дрейф фотоносителей и экситонов происходят не только вблизи поверхности кристаллов, но также и в объеме кристалла, так как $1/\alpha$ для $\lambda = 0.63 \div 0.68 \mu m$ составляет $\sim 3 \mu m$. В связи с этим, в Si СЭ с достаточно “глубоким” р-п переходом фототок преимущественно формируется в диффузионной области, и величину L_{exc} следует сравнивать с $L_{e,h}$ в этой области $L_{exc} > L_{e,h}$, а $\Delta I < 0$ (рис. 2).

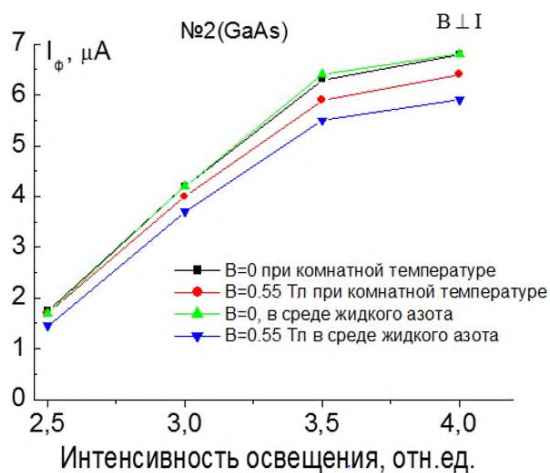


Рис.1. Зависимости фототока от интенсивности освещения в GaAs СЭ

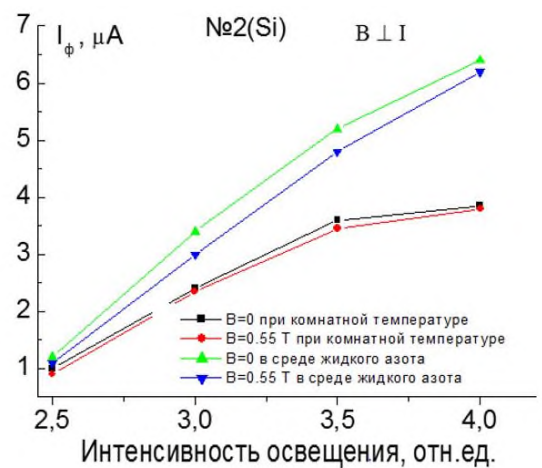


Рис.2. Зависимости фототока от интенсивности освещения в Si СЭ

Оценка показала, что вклад экситонов в фототок при комнатной температуре и среде жидкого азота составляет $3 \div 6\%$ и $6 \div 8\%$, соответственно. $\Delta I = I_{ph} - I_{ph}(H) > 0$, следовательно, $L_{exc} < L_{e,h}$. При более мелких р-п переходах генерация и сбор носителей происходит преимущественно со стороны базы СЭ, где $L_{e,h} \sim 60-80 \mu m$ и $L_{exc} < L_{e,h}$, а $\Delta I > 0$.

Таким образом, установлено, что изменение фототока в полупроводниковых СЭ под действием магнитного поля может быть связано с уменьшением диффузионной длины экситонов. Показано, что вклад экситонов в фототок в Si и GaAs СЭ составляет, $3-6\%$ и $11-13\%$, соответственно. Этот результат может быть использован для повышения фототока в СЭ и ФЭМ на их основе, а также в интегрированных ФЭС к электрической сети.

В третьей главе «Исследование зависимости энергетических показателей фотоэлектрических систем в условиях изменения интенсивности солнечного излучения и влияния климатических факторов», приведены результаты экспериментальных исследований в натуральных условиях республики, выходных энергетических параметров ФЭМ на основе Si, α -Si, GaAs и CIGS в условиях изменения поступления солнечного излучения и влияния температуры окружающей среды.

Для экспериментов выбраны модули на основе монокристаллического (Моно-ФЭМ) и поликристаллического (Поли-ФЭМ) кремния с одинаковыми КПД= 15.5% ¹². Измерение угла наклона ФЭМ к горизонту проводились одновременно при углах 20° , 30° , 40° . Кривая мощности практически повторяет график изменения интенсивности солнечной радиации (рис. 3). Это объясняется тем, что для моно-ФЭМ ток короткого замыкания практически совпадает с I_{ph} . Ток короткого замыкания $I_{к.з.}$ прямо пропорционален выходной мощности ФЭМ и выходные параметры ФЭМ сильно зависят от интенсивности солнечной радиации. Проведена оценка NMOT моно-ФЭМ, что составляет $47.8^\circ C$. Установлено, что при температуре воздуха $T_{o,c} = 36^\circ C$ и

$T_m=69.6^\circ\text{C}$, моно-ФЭМ ($P_{\text{СВИ}}=200$ Вт) имеет $\text{NMOT}=47.8^\circ\text{C}$. Нестабильность интенсивности солнечного излучения и перегрев модуля (до $T_m=72^\circ\text{C}$) сильно влияют на выходные параметры ФЭМ. При $G_t = 940$ Вт/м², средней температуре воздуха $T_{o,c}=36^\circ\text{C}$ и $\text{NMOT}=47.8^\circ\text{C}$ моно-ФЭМ вырабатывал 141,1 Вт электрической мощности с $\eta=13.34\%$ и $FF=68,4\%$. При этом, снижение мощности моно-ФЭМ составляет 29.5%. Для коммерческих кристаллических моно-ФЭМ с приемлемым КПД, снижение мощности не превышает 18-22% при нагреве поверхности ФЭМ до $75-78^\circ\text{C}$, значение фактора заполнения лежит в диапазоне 0.75-0.85.

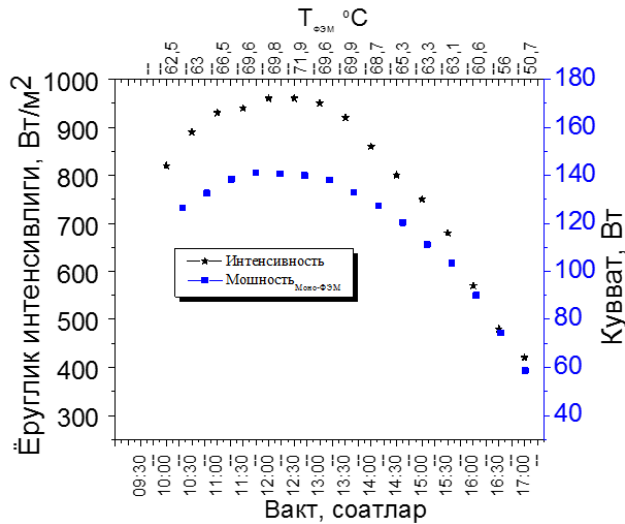


Рис. 3. Временные зависимости солнечной радиации и мощности моно-ФЭМ.

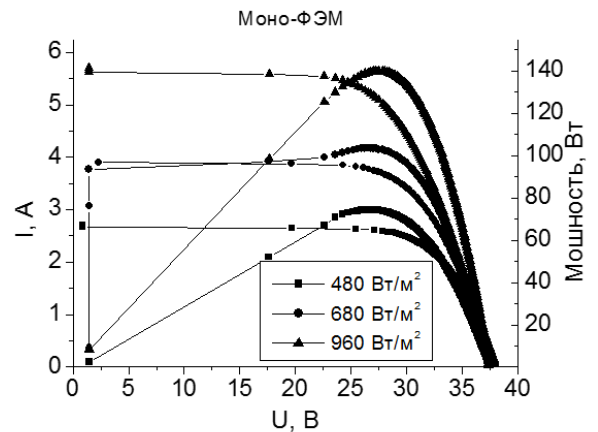


Рис. 4. ВАХ моно-ФЭМ при различной мощности солнечной энергии.

Здесь, снижение значения FF связано с увеличением напряжения, вызванным термическим расширением приконтактных областей, присутствием паразитных сопротивлений и других эффектов, возникающих из-за нагрева ФЭМ. На рис. 4. представлены ВАХ моно-ФЭМ при различной мощности солнечной радиации и $P_{\text{макс}}$ от напряжения. С целью определения значения изменений $I_{\text{к.з.}}$ и $V_{\text{ос}}$ при $T_m=72^\circ\text{C}$ ФЭМ оценили шунтирующее сопротивление $R_{\text{ш}}$ и последовательное сопротивление $R_{\text{п}}$, которые были равны 27,3 Ом и 0.906 Ом, соответственно. Оценки выполненные с использованием известной методики¹⁰, показали что, исследуемые ФЭМ с $R_{\text{ш}} \geq 20 \div 30$ Ом начинают вырабатывать электрическую энергию при достаточно низкой интенсивности света $G_t \geq 100$ Вт/м² и имеет относительный КПД $\geq 95\%$. Вид полученных графиков для временных зависимостей солнечной радиации, мощности и ВАХ для моно-ФЭМ и поли-ФЭМ практически был одинаковым. Также оценили номинальную рабочую температур модуля (NMOT) поли-ФЭМ, что составляет 33.3°C . Анализ полученных результатов показал, что при

¹⁰ Grunow, S. Lust, D. Sauter, V. Hoffmann, C. Beneking, B. Litzenburger, L. Podlowski. Weak light performance and annual yields of pv modules and systems as a result of the basic parameter set of industrial solar cells//Materials 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France. pp.2190-2193

прочих равных условиях средняя температура T_m поли-ФЭМ оказалась на 2°C ниже чем T_m моно-ФЭМ. Также были оценены шунтирующее сопротивление $R_{ш}$ и последовательное сопротивление $R_{п}$, которые составляли 28.96 Ом и 0.2 Ом, соответственно.

В зависимостях $I_{к.з.}$ поли-ФЭМ и моно-ФЭМ от температуры наблюдали отклонение от линейной зависимости, что связано нагревом ФЭМ и рекомбинационными потерями в фотоэлементах (рис.5). С ростом интенсивности солнечной радиации $I_{к.з.}$ увеличивается, при больших её значениях наблюдается небольшое уменьшение напряжения холостого хода, что вызвано ростом температуры за счет радиационного нагрева ФЭМ. На основе полученных результатов построили PR от температуры ФЭМ и времени в течение светового дня. Видно, что, значения PR для обоих ФЭМ лежат в диапазоне 0.74-0.82. Также на рис. 6, приведены временные температурные зависимости $KПД$ в течение светового дня, которое для, обоих типов ФЭМ имеют среднее значение $KПД \sim 13.3\%$. На основе полученных результатов: - установлено, для: - моно-ФЭМ ($P_{СУИ}=200$ Вт) в точке максимальной мощности при $T_{o.c}=36^\circ\text{C}$, $T_m=69.6^\circ\text{C}$, $G_t = 940$ Вт/м² и скорости ветра 1 м/с имел следующие показатели: $NMOT=47.56^\circ\text{C}$, $P_{макс}=141,1$ Вт, $PR=77\%$, $\eta=13.34\%$, $FF=68,4\%$. -поли-ФЭМ ($P_{СУИ}= 88$ Вт) в точке максимальной мощности при $T_{o.c}=36^\circ\text{C}$, $T_m=67.2^\circ\text{C}$, $G_t = 940$ Вт/м² и скорости ветра 1 м/с имел, следующие показатели: $NMOT= 45.46^\circ\text{C}$, $P_{макс}=63.95$ Вт, $PR=74\%$, $\eta=13.31\%$, $FF=67.54\%$.

В результате исследований в натуральных условиях, обнаружено снижение мощности моно-ФЭМ и поли-ФЭМ в летний период, которые составляли 30 % и 28%, соответственно;

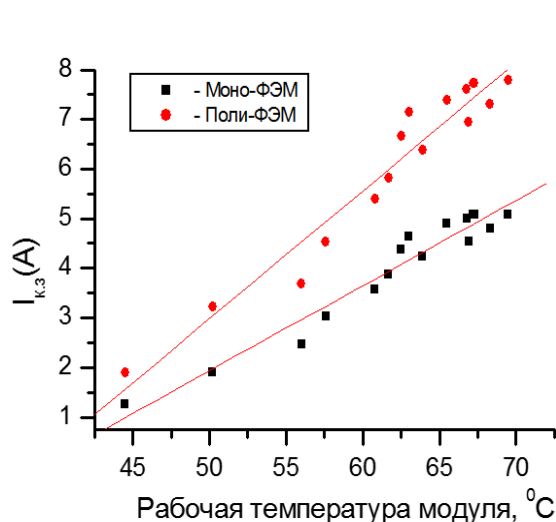


Рис. 5. Температурные зависимости $I_{к.з.}$ поли-ФЭМ и моно-ФЭМ.

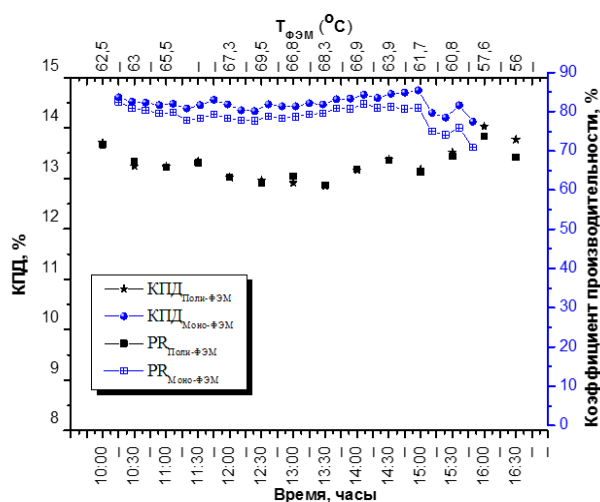


Рис. 6. Временные и температурные зависимости $KПД$ и $КП$ ФЭМ

Таким образом, в настоящей главе выявлены среднедневные, среднемесячные и среднегодовые показатели фотоэлектрических систем на основе различных ФВ технологий, в зависимости от актинометрических

показателей региона, которые в свою очередь позволят создать базу данных и прогнозировать более точные данные для использования в предпроектных изыскательских работах по интеграции ФЭС к электрической сети.

Четвертая глава «**Формирование основных принципов интеграции фотоэлектрических систем к электрической сети**», посвящена исследованиям особенностей моделирования, и симуляций режимов работы интегрированных ФЭС в электрическую сеть в программных комплексах технологических особенностей функционирования объектов распределенной энергетики на основе солнечных ФЭС малой, средней и большой мощности в составе единой энергосистемы РУз, а также анализу возможных технических проблем и методов их смягчения.

На сегодняшний день большинство установленных в РУз электростанций на базе ВИЭ являются автономными (off-grid), мощность которых не превышает 50 кВт. Как известно, вопросы интеграции ФЭС к электрической сети в Узбекистане находятся на «начальном этапе» развития. Конечным результатом начального этапа являлось создание нормативной базы для подключения потребителей, производящих электрическую энергию на основе солнечных станций малой и средней мощности. Поэтому на сегодняшний день в республике действует всего несколько таких электростанций. Необходимо, чтобы интегрированные ФЭС в электрическую сеть, удовлетворяли требованиям, предъявляемым к объектам генерации.

На основе разработанной нами методики, осуществлено моделирование процессов генерации и потребления электрической энергии в МИСЭ с учетом нестабильности процесса генерации активной мощности ФЭС (рис.7).



Рис. 7. График выработанной и потребленной электроэнергии МИСЭ за 18.11.2018г. Показано, что с увеличением генерируемой ФЭС активной мощности, потребляемая энергия от электрической сети плавно уменьшается до нуля в период светового дня. Установлено, что в будние дни, генерируемая ФЭС электрическая энергия полностью потребляется нагрузками МИСЭ и выходные дни излишек электроэнергии подаётся в электрическую сеть.

В таблице 1, приведены параметры выработки интегрированной ФЭС (2.24 кВт) к электрической сети через однофазных микроинверторов.

Фактическая годовая выработка энергии ФЭС в 2018 году составляла 3273.89 кВт·ч, а прогноз, смоделированный PVsyst, составляет 3434.9 кВт·ч, с небольшим отклонением -4.68%. Разница между реальными измеренными и прогнозируемыми значениями для апреля, июня и августа выше, чем для других месяцев. В результате анализа причин, количество вырабатываемой энергии было различным в течение месяца из-за густых облаков или аномалии в локальной низковольтной сети института.

Таблица 1.

Ежемесячная и годовая выработка ФЭС и сравнение их с результатами моделирования

Месяцы	Объём произведенной ФЭС энергии (кВт·ч)	КИУМ, %	Результат моделирования в PVsyst (кВт·ч)	КИУМ, %	Разница, (%)
Январь	185.95	11,2	172.9	10,3	7.54
Февраль	209.79	13,9	199.7	13,3	5.05
Март	243.04	14,6	251.6	15,1	-3.40
Апрель	253.44	15,7	304.8	18,9	-16.85
Май	374.07	22,4	368.9	22,1	1.40
Июнь	347.83	21,5	384.7	23,9	-9.58
Июль	374.83	22,5	401.0	24,1	-6.52
Август	396.87	23,8	395.1	23,7	0.44
Сентябрь	339.35	21	352,9	21,9	-3.84
Октябрь	230.16	13,8	271,5	16,3	-15.22
Ноябрь	180.72	11,2	185,2	11,5	-2.41
Декабрь	138.29	8,3	145,5	8,7	-4.95
Всего	3273,89		3434,9		-4.68

Используя данные по результатам мониторинга ФЭС за 2018 год, оценили значения среднедневной, среднемесячный и среднегодовой КИУМ ФЭС. Расчеты показали, что среднегодовой КИУМ ФЭС мощностью 2.24 кВт составлял 16.6%.

Среднемесячные значения КИУМ интегрированной ФЭС с электрической сетью в августе и декабре составляли 23.8% и 8.3%, соответственно (рис.8). Максимальное отклонение среднемесячного значения КИУМ ФЭС от среднегодового значения КИУМ в декабре месяце составляет 200%. В связи с этим, при проектировании и строительстве интегрированных с электрической сетью крупных ФЭС наряду с выработкой, КП и КПД ФЭС необходимо учитывать и КИУМ. По результатам исследования, выявлено, что общая выработка электроэнергии зависит не только от климатических воздействий, но и от параметров сети (изменения мощности, напряжения и т.п) взаимосвязанных с энергосистемой. На основе экспериментальных данных определены средневные, среднемесячные и среднегодовые значения PR ФЭС. В августе 2018 года, при благоприятных условиях погоды, максимальное значение выработки ФЭС составляла 2.2 кВт*ч, что соответствовал PR=95.3%. Среднегодовое значение PR ФЭС составило 79,7%. Анализ параметров потерь,

предсказанных PVSystem, показал, что температурный эффект ФЭМ (-8.5%) был самым большим из всех потерь, за которым следовали потери переключения инвертора (-5.7%).

В таблице 2, приведены данные об эксплуатационных характеристиках интегрированной ФЭС к электрической сети установленной мощностью 9 кВт промышленного назначения, которая подключена к электрической сети через трёхфазный инвертор.

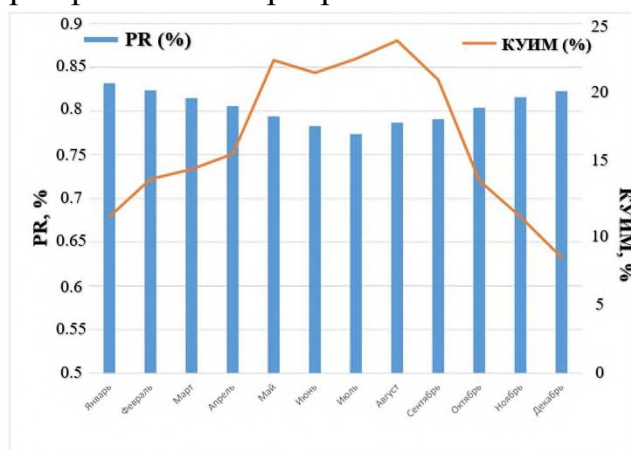


Рис. 8. Временные зависимости PR и KIUM ФЭС

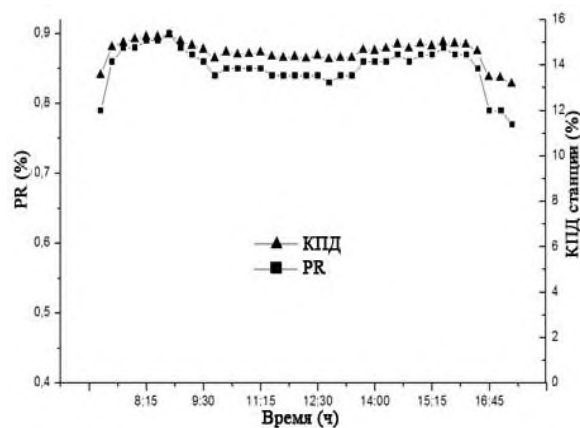


Рис. 9. Временные зависимости PR и КПД ФЭС

При натуральных условиях, соответствующих различным уровням освещенности в течение дня: максимальная выходная мощность ФЭС равной 7560 Вт наблюдалась с 11:30 до 12:00, когда уровень интенсивности солнечной радиации достигла наивысшего значения 1000 Вт/м², тогда как температура тыльной стороны ФЭМ составила 59.7°C (см. таблицу 2). Среднее КПД преобразования ФЭС составляет 14,4% при среднем PR=84%, и это очень хороший показатель для условий г. Ташкента (рис. 9).

Таблица 2.

Выходные параметры ФЭС во время эксперимента

Время (ч)	G_b (Вт/м ²)	$T_{обр. ст. ФЭМ}$ (°C)	$T_{поверх. ФЭМ}$ (°C)	P_{max} (Вт)	$I_{s.c.}$ (А)	V_{max} (В)	$V_{o.c}$ (В)	FF (%)	PR (%)	η (%)
11:30	1000	59,7	57,6	7560	17,8	462,1	599,3	0,7	0,84	14,38
12:00	1000	57,4	57,3	7554	17,7	463	600,5	0,77	0,84	14,37

По изменению выходного тока, напряжения и мощности в зависимости от температуры оценили температурные коэффициенты α , β и γ , которые составляли, +0.04%/°C, -0.32%/°C и -0.47%/°C, соответственно. Солнечная радиация оказывает линейное пропорциональное влияние на эффективность исследуемой ФЭС, тогда как более высокая рабочая температура ФЭМ снижает мощность на 0,47%/°C и приводит к измеримому снижению напряжения (-0,32%/°C) и незначительному увеличению тока (+ 0,04%/C).

В данной работе, приведены также результаты исследования выходных параметров пилотной солнечной ФЭС подключенной к сети мощностью 130 кВт в Папском районе Наманганской области» с целью изучения её выходных

парметров. Произведено сравнительное исследование измеренных выходных параметров ФЭС в 2017-2018гг. с результатами моделирования в программных комплексах PVSyst и Solarius PV (таблица 3). Известно, что при моделировании режимов работы ФЭС отклонение значений измерений от результатов моделирования на 8-10% считается приемлимым.

Как видно из таблицы 3, январе 2018 года измеренные значения выработанной ФЭС электрической энергии отличается от результатов моделирования в PVSyst и Solarius PV на 78.9% и 80%, соответственно. Это свидетельствует о том, что в электрической сети, куда подключена данная ФЭС имеются определенные проблемы в сетевом хозяйстве. Отклонения измеренных значений выработки ФЭС с августа по март месяцы существенно отличаются (более 10%) от прогнозируемых значений, что по-видимому связано, с определенными проблемами в электрической сети. Считаем необходимым осуществлять модернизацию линию электропередачи куда подключена исследуемая ФЭС.

Большая изношенность основных фондов (45-65%), недостаток резервных фондов и ограниченный лимит принятия балансирующей мощности из соседних энергосистем создаёт определенные трудности для развития использования интегрированных ФЭС в электрическую сеть.

Таблица 3.

Сравнение результатов измерений с контрольными значениями и результатами моделирования работы ФЭС

Месяцы	Измеренные значения (Т: 30°, А: -25°) (МВт·ч)	Контрольные значения (Т: 30°, А: -25°) (МВт·ч)	Вариации (%)	Результаты симуляции (Т:30°,А:-25°) (МВт·ч)	Вариации (%)
Январь	1.895	9.003	-78.9	9.328	-80.0
Февраль	8.752	10.590	-17.3	10.090	-13.2
Март	12.082	15.007	-19.4	11.693	+3.3
Апрель	16.216	16.859	-3.8	15.117	+7.2
Май	17.081	18.415	-7.2	19.154	-10.8
Июнь	17.942	18.835	-4.7	20.707	-13.3
Июль	20.222	20.127	+0.4	22.182	-8.8
Август	17.651	20.080	-12.0	21.372	-17.4
Сентябрь	16.233	18.344	-11.5	18.945	-14.3
Октябрь	10.882	15.559	-30.0	14.707	-26.0
Ноябрь	5.723	11.453	-50.0	9.811	-41.6
Декабрь	2.177	7.364	-70.4	7.181	-69.6
Всего	146.856	181.636	-19.1	180.292	-18.5

Согласно мировой практике, проведенные исследования показали, что при постепенном добавлении новых мощностей ВИЭ в существующую энергосистему, уровень гибкости энергосистем позволяют без особых проблем интегрировать ВИЭ с годовой долей до 25% при соблюдении следующих условия, во-первых, не будут допущены неконтролируемые

локальные концентрации ФЭС, во-вторых, при необходимости ФЭС будут поддерживать напряжение и стабилизировать сеть, в-третьих, точное прогнозирование выработки ФЭС и использовании их для планирования работы других станций и перетоков электроэнергии в сети. При этом, для безопасной интеграции крупных объектов ВИЭ в энергосистему Узбекистана необходимо предусмотреть строительство систем хранения энергии соответствующей мощности (по прогнозам Wood Mackenzie к 2030г. суммарная установленная мощность систем накопления электрической энергии в мире составит 741 ГВт*ч¹¹), подключение к системе быстродействующих устройств технологии управляемых систем электропередачи переменного тока¹², модернизация существующих и строительство новых линий электропередач и подстанций с учетом изменения перетоков мощностей после ввода в эксплуатацию ФЭС и ветровых электростанций.

Согласно «Концепция обеспечения Республики Узбекистан электрической энергией на 2020-2030 годы», Правительством РУз запланировано строительство 5000 МВт ФЭС и 3000 МВт ветровых электростанции к 2030 году. Уже к концу 2021 году в Узбекистане планируется ввод в эксплуатацию двух ФЭС по 100 МВт каждая. С учетом этого планируется достичь мощности 382,5 МВт к 2020 г., 601,9 МВт в 2021 г., и 1,24 ГВт в 2025 г.¹³. В настоящее время, проведены первые тендеры на строительство двух ФЭС мощностью по 100 мВт на территории Навоийской и Самаркандской областях. В качестве узлов подключения к энергосистеме предварительно рассматриваются подстанции Сувли и Иштихан в Северо-Западной части энергосистемы Узбекистана. Этот регион рекомендован международными экспертами и выбран для размещения больших мощностей ВИЭ. Нами проведены расчёты с использованием программного комплекса Digsilent PF с целью выявления максимально возможной мощности ФЭС (от 100 МВт до 1200 МВт) для безопасной интеграции в сеть Северо-Западной части энергосистемы Узбекистана. На рис. 10, для примера показана схема сети и результаты расчетов её режима с учетом генерации ФЭС мощностью 800 МВт. Расчёты, проведённые с использованием программного комплекса Digsilent PF, показывают, что при относительно небольшой мощности ВИЭ дополнительная генерация практически не влияет на параметры режима ЭЭС, и линии L-S-S, L-X-S, L-K-Ish, L-S-Ish выдерживают дополнительные перетоки мощностей. Однако дальнейшее увеличение мощностей ФЭС приводит к определенным проблемам по перетокам мощностей, обеспечения

¹¹ Wood Mackenzie. (2020). Global energy storage outlook:H1 2020. <https://www.woodmac.com/reports/power-markets-global-energy-storage-outlook-h1-2020-398563>.

¹² Хамидов Ш.В. Исследование интеллектуализации электроэнергетики Узбекистана. Автореф. дисс. д-ра тех.наук. – Ташкент, 2019, -32 с. <http://library.ziyonet.uz/ru/book/download/107674>

¹³ REN21. 2020. Renewables 2020 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-948393-00-7.

устойчивости энергосистемы и показателям качества электроэнергии. Расчёты показали, что в существующих условиях максимально возможная мощность ФЭС для безопасной интеграции в сеть Северо-Западной части энергосистемы Узбекистана составляет 600 мВт. При увеличении мощности ФЭС до 700-800 МВт в этом узле электрической сети, программный комплекс показал «проблемную» ситуацию (красные линии, Рис.10).

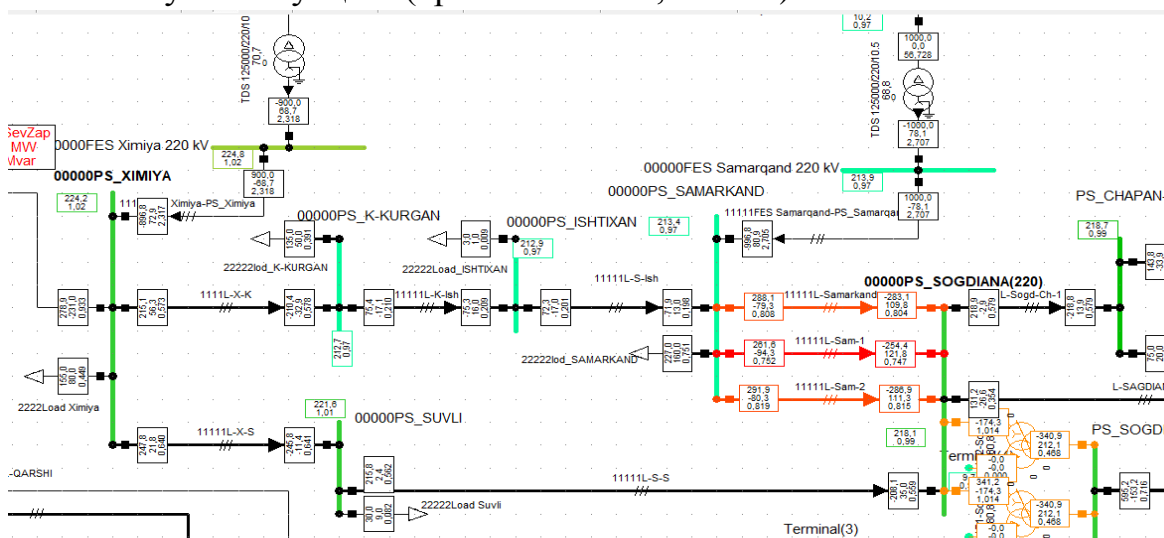


Рис. 10. Схема участка сети, использованной при расчетах.

Таким образом, для строительства крупных электростанций на базе ВИЭ и их интеграции в центральные сети требуется проведение большого объема научно-исследовательских работ по анализу совместных режимов и устойчивости энергосистемы РУз, модернизации сетевого оборудования, внедрения современных систем хранения энергии и компенсации реактивной мощности.

В пятой главе диссертационной работы «**Оценка ресурсных, технико-экономических и экологических показателей интегрированных фотоэлектрических систем в электрическую сеть**» приведены результаты исследования по разработке и созданию системы мониторинга выходных параметров ФЭС малой мощности с учетом температуры окружающей среды и осуществлять мониторинг их параметров в режиме реального времени. Кроме того, выполнена оценка ресурсных, технико-экономических и экологических показателей интегрированных ФЭС в электрическую сеть.

В МИСЭ была разработана и создана система для мониторинга ФЭС малой мощности, предназначенная для мониторинга основных выходных параметров ФЭС. Разработанная нами система мониторинга состоит из компьютера, измерительного устройства, шунта и термодатчиков. Измерительное устройство выполнено на базе 8 - битного микроконтроллера STM32. Данное устройство состоит из микроконтроллера STM32, понижающего стабилизатора, который обеспечивает схему 5В стабильным питанием, делителя напряжения, шунта и операционного усилителя для измерения величины тока, датчиков температуры DS1820, выхода для RS232

и других вспомогательных радиоэлементов. Потребляемая мощность устройства 2 Вт, питается от постоянного источника 9÷12В, максимальный потребляемый ток 400 мА, диапазон измерения температуры -40 до +125°C. Таким образом, разработан и создан цифровой вольтметр с автослежением, а также, разработано программное обеспечение, позволяющее записывать измеренные данные напряжения, тока и температуры ФЭМ, и сохранить их в базе данных. С использованием данного устройства, разработана и создана система мониторинга ФЭС, которая позволяет измерять значения основных выходных параметров (вырабатываемую мощность, силу тока, напряжения, температуру ФЭМ и окружающей среды) ФЭС и передавать их на ПК для сохранения и визуализации результатов измерений (рис.11).

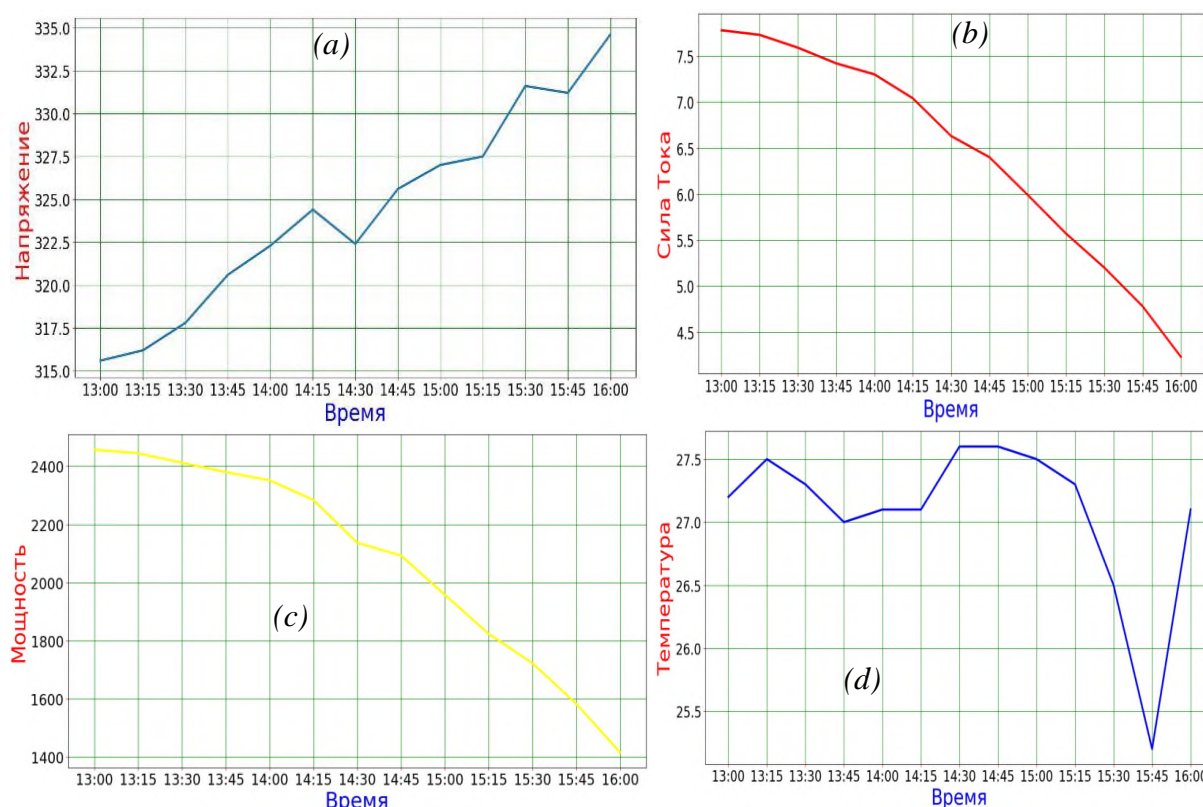


Рис. 11. Вывод графиков на монитор: напряжение (a), сила тока (b), вырабатываемая мощность (c), температура (d) и сохранение их в базе данных

Нами рассмотрены зависимости увеличения выработки и стоимости электроэнергии по годам за 30 летний цикл работы ФЭС по трем сценариям развития цен на 1 кВт*ч электроэнергии и построен график (рис. 12). При определении срока окупаемости солнечной ФЭС было принято, что ФЭМ не требуют обслуживания и могут работать более 30 лет и основные капиталовложения производятся одновременно при её строительстве. На основе проведенного анализа результатов по определению экономической эффективности работы станции было установлено, что ФЭС с мощностью 9 кВт при стоимости электроэнергии 0.03\$/кВт*час, 0.06\$/кВт*час и

0.09\$/кВт*час окупит затраты на ее строительство через 15.5, 7.9 и 5 лет, соответственно. Затем ФЭС начнет работать в режиме прибыли.

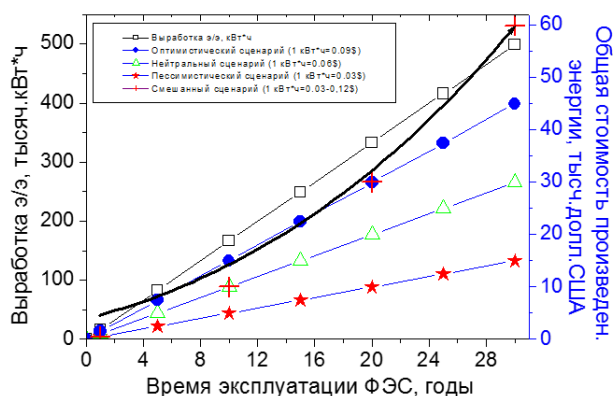


Рис. 12. Зависимости изменения выработки и стоимости 1 кВт*ч выработанной электроэнергии по годам за 30 летний цикл эксплуатации ФЭС

Проведенное сравнительное исследование себестоимости 1 кВт*ч электрической энергии выработанной бензиновой, газовой и солнечными станциями, показало, что себестоимость электроэнергии, вырабатываемой ФЭС, практически в десятки раз меньше себестоимости электроэнергии, вырабатываемой электростанцией с использованием традиционных источников энергии (см.таблицу 8).

Таблица 8.

Сравнение себестоимости вырабатываемой электроэнергии ФЭС и электростанцией с использованием традиционных источников энергии

№ п/п	Годы	Кол-во выработанной электроэнергии и, кВт*ч	Стоимость выработанной электроэнергии, долл.США			Себестоимость 1 кВт*ч электроэнергии, долл.США		
			ФЭС	бензиновая	газовая	ФЭС	бензиновая	газовая
1	1	16633	499	6006	4671	0,03	0,57	0,44
2	5	83165	3326	23250	9015	0,04	0,44	0,17
3	10	166330	9980	44805	14445	0,06	0,85	0,14
4	15	249495	22454	66360	19875	0,09	0,42	0,13

Таким образом, на основе сравнительных исследований технико-экономических показателей бензинового, газового и солнечной станции сделаны следующие выводы:

- несмотря на низкую первоначальную стоимость дизельной (бензиновой) автономной станции с использованием традиционных источников энергии, дальнейшие капиталовложения при ее эксплуатации для выработки одинакового количества электроэнергии значительно выше, чем при использовании ФЭС за счет высокой цены на используемое топливо;

- себестоимость электроэнергии, выработанной ФЭС в десятки раз ниже себестоимости электроэнергии, выработанной автономной дизельной (бензин) электростанцией с использованием традиционных источников энергии.

В 21 мая в 2019 году в РУз принят новый закон, предусматривающий налоговые льготы для производителей оборудования для ВИЭ, а также для производителей электроэнергии¹⁴. В связи с этим, руководство РУз ставит цель

¹⁴ Закон Республики Узбекистан №ЗРУ-539 «Об использовании возобновляемых источников энергии», 21 май 2019.

увеличить доли ВИЭ в общем энергобалансе республики до 25% (на сегодняшний день этот показатель составляет 10%) к 2030 году. Для достижения этого показателя Министерством энергетики предпринимаются активные меры путем реализации крупных инвестиционных проектов по ВИЭ.

Результаты моделирования показали, что, ФЭС мощностью 5 ГВт в среднем в условиях Узбекистана при среднегодовых значениях PR=80% и КИУМ=16,6%, будет вырабатывать 9,9 млрд кВт*ч в год электроэнергии¹⁵. Мы рекомендуем устанавливать 3.5 ГВт ФЭС в виде ФЭС малой (до 10 кВт), средней мощности (до 500 кВт) и объектов распределенной генерации малой мощности (несколько МВт) в регионах с энергодефицитом. Остальные 1.5 ГВт ФЭС в виде крупных ФЭС (больше 50 МВт) с системой хранения энергии (до~30%) с учетом модернизации существующих генерирующих мощностей и сетевого хозяйства. Современные газовые электростанции потребляют для производства 1 кВт электричества порядка 0,23-0,35 м³/час топлива. При этом, удельная экономия природного газа будет составляет 3.465 млрд. м³/год. По имеющейся информации, в 2019г., КНР платил Узбекистану за тысячу кубических метров природного газа 182,25 долл.США (или 0.18225 долл. США за 1 м³). Тогда 5 ГВт ФЭС сэкономит республике 3.465 млрд.м³*0.18225\$=631.5 млн.долл.США/год. Фотоэлектрические системы позволяют сэкономить 0,62 кг CO₂ на каждый кВт*час выработанной энергии¹⁶. Тогда 5 ГВт ФЭС предотвращает 9,9 млрд. (кВт*ч)*0,62кг/(кВт*ч)=6.138 млн.тонн выбросов CO₂ в течение года, который образуется при сжигании 3.465 млрд. м³ природного газа. Комиссия высокого уровня по ценам на CO₂, возглавляемая экономистами Николасом Стерном и Джозефом Стиглицем, рекомендует к 2020 году довести цены на снижение углекислого газа в атмосфере до уровня \$40÷80 за тонну CO₂, а к 2030 году – до уровня \$50÷100, чтобы удержать повышение средней температуры в пределах 2°C при сохранении экономического роста. Учитывая этот момент можно легко убедиться, что 5 ГВт ФЭС сэкономит республике в среднем 360 млн.долл.США в год за счет уменьшения выбросов CO₂ в атмосферу.

Важной особенностью эксплуатации ФЭС является то, что для их работы топливо является бесплатной. Это обстоятельство значительно снижает величину нормированной стоимости электроэнергии. Расчеты показали, что в условиях РУз для ФЭС мощностью 5 ГВт выравненные затраты за 30 летний цикл на производство одного МВт*ч электрической энергии составит 19.1 долл.США (курс: 1 долл.США=10367 сум). В условиях Узбекистана при уровне солнечной радиации 1800-2100 кВт*ч/м² и КПД преобразования солнечного излучения ФЭМ=18%, КП≥80%, КИУМ 16% и по цене 0.028

¹⁵ https://minenergy.uz/uploads/1a28427c-cf47-415e-da5c-47d2c7564095_media_.pdf

¹⁶ <https://files.sma.de/downloads/SMix-UEN091910.pdf>

долл.США/кВт*ч электроэнергии, срок экономической окупаемости ФЭС мощностью 5 ГВт составит примерно 10-12 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследований по выявлению основных факторов в процессах фотогенерации для повышения эффективности СЭ и ФЭМ, а также проблем, связанных с эффективным и безопасным интегрированием ФЭС к электрическим сетям сделаны следующие выводы:

1. Разработана и создана система мониторинга ФЭС, которая позволяет измерять значения основных выходных параметров (вырабатываемую мощность, силу тока и напряжение, температуру ФЭМ и окружающей среды) ФЭС и передавать их на ПК для сохранения и визуализации результатов измерений. Преимуществами разработанной системы мониторинга с программным обеспечением по сравнению с другими аналогами является относительная низкая себестоимость, ремонтпригодность, отказоустойчивость, адаптированность к местным климатическим условиям, простота в эксплуатации и устойчивость к отключениям режимных параметров сети.

2. Выполнена оценка среднедневной, среднемесячной и среднегодовой КИУМ ФЭС, интегрированных к низковольтной локальной электрической сети, выявлено, что при климатических условиях республики среднемесячные значения КИУМ ФЭС меняются от 8.3 до 23.8 %;

3. Разработаны методы моделирования процессов генерации и потребления электрической энергии с учетом нестабильности процесса генерации активной мощности ФЭС, интегрированных к локальной электрической сети. Показано, что с увеличением генерируемой ФЭС активной мощности, потребляемая энергия от электрической сети плавно уменьшается до нуля. Установлено, что реактивная энергия остаётся практически неизменной. Полученные результаты служат научно-обоснованными исходными данными при планировании и проектировании интегрированных ФЭС в электрическую сеть.

4. На основе анализа результатов моделирования в программном комплексе DigSilent PowerFactory, показано, что, с учетом текущей модернизации генерирующих мощностей, в частности необходимых резервных мощностей, вспомогательных комплексов услуг и современных систем регулирования реактивной мощности, заявленная в национальной концепции республики, интеграция ФЭС мощностью 5 ГВт, в энергосистему Узбекистана, возможна при условии, что основная часть мощности, более 3 ГВт, будет безопасно установлена в виде ФЭС малой и средней мощности (распределенная генерация), и более 1 ГВт мощности в виде крупных ФЭС.

5. Экспериментально исследованы параметры р-п перехода, влияющие на фототок в полупроводниковых СЭ под воздействием магнитного поля. Выявлено, что изменение фототока СЭ связано с изменением длины диффузии экситонов, из-за роста вероятности рекомбинации экситонов через мелкие заряженные примеси под воздействием магнитного поля. Показано, что вклад экситонов в фототок в Si и GaAs СЭ составляет, 3-6% и 8-13%, соответственно.

6. Разработан и изготовлен вольтметр с автослежением для измерения выходных параметров ФЭМ и ФЭС, с применением операционного усилителя с программируемым коэффициентом усиления, позволяющим измерять напряжение в широком диапазоне с достаточно большой точностью. Патент на полезную модель.

7. На основе анализа и обобщения полученных результатов выявлено, что ФВ технологии на основе поликристаллического кремния являются наиболее подходящими к климатическим условиям Республики для создания крупных ФЭС. Установлено, что температурные потери мощности ФЭС на основе поли-ФЭМ на ~2% ниже чем, ФЭС на основе монокристаллического кремния.

8. Разработаны стандарты. 1). O'zDSt 3075:2016. «Системы фотоэлектрические: Термины, определения» (Приложение №1); 2). O'zDSt 3076:2016. «Станции солнечные фотоэлектрические. Системы, подключаемые к сетям электроснабжения общего назначения. Минимальные требования к станциям (системам), сопроводительной документации, приемки и обследования» внедрены и используются в системе Министерства энергетики, АО «Узэлтехсаноат» и Агентства «Узстандарт».

**SCIENTIFIC COUNCIL NUMBER DSc.03/10.12.2019.T.03.03
FOR AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
AT THE TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

INTERNATIONAL SOLAR ENERGY INSTITUTE

MATCHANOV NURADDIN AZADOVICH

**COMPREHENSIVE RESEARCH OF PHOTOENERGY SYSTEMS AND
THEIR INTEGRATION INTO THE ELECTRICAL GRID**

05.05.01 - Energy systems and complexes

**DISSERTATION ABSTRACT
OF DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES (DSc)**

Tashkent - 2020

The topic of the doctoral dissertation (DSc) is registered by number №B2019.4.DSc/T324 in the Higher Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan.

Doctoral dissertation has completed at the “International Solar Energy Institute”.

The dissertation abstract is available in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of the Scientific Council (www.tdtu.uz) and on the Information and Education Portal "ZiyoNet" (www.ziyo.net).

Scientific consultant:	Mirzabaev Akram Maxkamovich Doctor of Technical Sciences
Official opponents:	Misrikhanov Misrikhan Shapievich Doctor of Technical Sciences, Professor Gayibov Tulkin Shernazarovich Doctor of Technical Sciences, Professor Rakhimov Rustam Khakimovich Doctor of Technical Sciences
Leading organization:	JSC "Thermoelectroproject"

Dissertation defense at Tashkent State Technical University will be held in 2020 at «09» December 13⁰⁰ at the meeting of Scientific Council DSc.03 / 10.12.2019.T.03.03. (Address: 2, University street, Almazar district, 100095, Tashkent city).

Tel./fax: (99871) 246-46-00, fax: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz.

The dissertation is available at the Information Resource Center of Tashkent State Technical University (registration number 37). Address: 100125, 2, University street, Almazar district, 100095, Tashkent city. Tel./fax: (99871) 246-03-41.

The abstract of the dissertation was distributed in 2020 November 27
(register statement number 13 on 27/11/2020).



K.R. Allaev
Chairman of Scientific council on awarding scientific degrees, Doctor of technical sciences, professor, Academician of the AS RUZ

O.Kh. Ishnazarov
Scientific secretary of Scientific council on awarding scientific degrees, Doctor of technical sciences, senior researcher

M.I. Ibodullaev
Chairman of Scientific seminar under Scientific council on awarding scientific degrees, Doctor of technical sciences, Professor

INTRODUCTION (Abstract of DSc dissertation)

The actuality and relevance of the research work. Expanding the use of renewable energy sources, especially wind and solar energy, will be an important stimulus and impetus for the development of green energy around the world, and will serve to save the country's primary energy resources, mitigate the effects of climate change by reducing CO₂ emissions into the atmosphere, ensure security and energy independence, improve the standard of living and quality of life of the population, as well as improve social conditions - to ensure guaranteed and uninterrupted use of cheap, reliable, sustainable and modern energy sources. In this regard, a comprehensive study of these systems and their modes of operation in order to safely and reliably connect photovoltaic systems in to the electrical grid is one of the **urgent tasks** in the country, which requires new approaches to solve problems of improving the efficiency of industrial use of solar energy.

The purpose of the research is a comprehensive study of photovoltaic systems integrated into the electrical grid, taking into account external climatic factors and the peculiarities of the power system of Uzbekistan.

The tasks of the research:

-formation of basic principles of integration of photovoltaic system into the electrical grid; - study of the dependence of energy performance of photoelectric modules integrated into the power grid and photovoltaic systems based on changes of the intensity of solar radiation and the influence of climatic factors; study of effective ways to use energy systems based on renewable energy sources integrated into the grid; theoretical and experimental study of current conduction mechanisms in photovoltaic cells and development of methods to increase the efficiency of photovoltaic cells; assessment based on the forecast of resource, technical, economic and environmental performance of photovoltaic systems connected to the grid.

The object of the research is photovoltaic systems integrated into the electrical grid.

The subject of the research consists of the main power indicators of photovoltaic systems systems integrated into the power grid and the mode indicators when connecting them to the electrical grid in different circuits.

The scientific novelty of the research consists of following: - improved methods of control of photogeneration processes to obtain efficient photovoltaic cells with relatively high output, which allows to improve the resource indicators of systems based on photovoltaic cells; - developed a methodology for monitoring of low-power photovoltaic systems integrated into the grid; - the average daily, average monthly and average annual installed capacity utilization rate of photovoltaic systems integrated into the low-voltage electrical grid was assessed; - the performance ratio of the photovoltaic systems integrated into the low-voltage electrical grid was estimated experimentally, and on this basis, the average annual

forecast indicators were determined; - a methodology for modelling power generation and consumption processes has been developed, taking into account the variability of photovoltaic systems active power integrated into the electrical grid; - the technical, economic and environmental indicators of large photovoltaic systems integrated into the power grid have been identified, criteria for identifying suitable areas for their installation have been developed, and these areas have been identified.

The practical results of the research are as follows: - taking into account the electricity and technical performance of photovoltaic systems integrated into the electrical grid, the allowable capacity for their safe integration into the power system of the Republic of Uzbekistan was determined, as well as the most favorable areas of Uzbekistan for installation of photovoltaic systems integrated into the electrical grid are defined; - a digital multimeter for the monitoring system is developed and prepared for release, which allows to expand the voltage measuring range up to 5% (up to 610 V) with accuracy 10% and provide high-precision automatic monitoring when setting the upper limits of constant voltage measurement at ambient temperature $t = 25^{\circ}\text{C}$; - it was shown that the capacity utilization factor of photovoltaic system is varied in the range from 8.3 to 23.8 % in the climatic conditions of the republic.

Scientific and practical significance of research results.

The scientific significance of the results is reflected in the fact that the integrated photovoltaic systems resource indicators allow reliable forecasting for planning in the electrical grid load.

The practical significance of the results is that standards have been developed for photovoltaic systems connected to electrical grid, which will increase the efficiency and reliability of photovoltaic systems connected to the electrical grid.

Implementation of research results. In the course of the thesis, a patent for utility model “Digital multimeter” №FAP 01463 (30/08/2017), Certificates for software products № DGU 26702(06/02/2020), №DGU 06930 (24/06/2019)., № DGU 05120 (13/03/2018), №DGU 04373(31/03/2017). The economical effect from the practical implementation of № DGU 05120 is 307.944 mln.sum.

Approbation of research results. The results of this research were discussed at 9 international and 10 national scientific and practical conferences.

Publication of research results. A total of 40 scientific papers on the topic of the dissertation were published, including 17 scientific articles, 7 in republic publications recommended for publication of the main scientific results of doctoral dissertations of the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan national publications and 10 in foreign publications, certificates of authorship were obtained for 1 patent and 4 software products.

The volume and structure of the thesis. The content of the dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion and a list of references with 40 titles and appendices. The volume of the dissertation is 232 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОКОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть, part I)

1. Matchanov N.A., Kim Oun Seok, Mirzaev A.A., Malikov M.A., Saidov D.Sh. Study of Energy Yield on Grid Connected MicroInverter Type 2.24 kW PV System Using PVsyst Simulation Software // Applied Solar Energy, 2020, vol.56, no 4, pp.263-269. (05.00.00, №4. Springer, IF: 1.5).
2. Matchanov N.A., Butunbaev B.N, Saidov D.Sh., K.A. Bobojonov. Monitoring system for low power photovoltaic stations // Applied Solar Energy, 2020, vol.56, no 1, pp.464-469. (05.00.00, №4. Springer, IF: 1.5).
3. Мирзабаев А.М., Матчанов Н.А., Сытдыков О.Р., Махкамов Т.А., Мирзабеков Ш.М. // Интеграция солнечных электростанций с сетью / Проблемы энерго- и ресурсосбережения, 2020, №1-2, стр.153-160. (05.00.00, №21).
4. Ataboev O. K., Kabulov R. R., Matchanov N. A., Egamov S. R. / Influence of Temperature on the Output Parameters of a Photovoltaic Module based on Amorphous Hydrogenated Silicon / Applied Solar Energy, 2019, Vol. 55, No. 3, pp. 159–167. (05.00.00, №4. Springer, IF: 1.3).
5. Матчанов Н.А., Тураев А.И., Мирзаев А.А., Эгамов С.Р. Влияние on-grid ФЭС мощностью 9 кВт на параметры локальной сети (0.4 кВ) / Проблемы энерго- и ресурсосбережения, – Ташкент, 2019, №1-2, – с.191-198. (05.00.00. №21).
6. Кабулов Р.Р., Матчанов Н.А., Атабоев О.К., Акбаров Ф.А. Последовательное и шунтирующее сопротивление CIGS солнечного фотоэлектрического модуля в условиях реального солнечного освещения при различных температурах // Физика полупроводников и микроэлектроника, – Ташкент, 2019, №1, – с. 51-54. (01.00.00. №16).
7. Kim O.S., Matchanov N.A., Sadullaeva Sh.E., Umarov B.R., Mirzaev A.A. Trendy analysis of the IEC International Standards of Interconnection Requirements for Photovoltaic Plant to the utility grid // Научно-технический журнал Агентства "Узстандарт", – Ташкент, 2018, №2, – с. 43- 48.
8. Matchanov N.A., Mirzabaev A.M., Umarov B.R., Malikov M.A., Kamoliddinov A.U., Bobojonov K.A. Experimental studies of the characteristics of monocrystal and polycrystal silicon photovoltaic modules under environmental conditions of Tashkent // Applied Solar Energy, – USA, 2017, Vol. 53, Iss. 1, – pp. 23–30. (05.00.00, №4. Springer, IF: 0.81).

9. Kim O.S., Matchanov N.A., Malikov M.A., Umarov B.R. A study of main causes of malfunction and breakdown for PV inverter and suggestion of some practical measures / *Applied Solar Energy*, – USA, 2017, Vol. 53, Iss. 1, – pp. 35–38. (05.00.00, №4. Springer, IF: 0.81).
10. Матчанов Н.А., Кабулов Р.Р., Умаров Б.Р. Особенности нагрузочных вольтамперных характеристик монокристаллического кремниевого солнечного элемента при различных уровнях освещенности солнечным светом // *Гелиотехника*, – Ташкент, 2017, №1, – с. 22-24. (05.00.00, №1. Springer, IF: 0.81).
11. Matchanov N.A., Kim O.S., Kamoliddinov A.O., Umarov B.R. Types, overview and possibility of microgrid in Uzbekistan // *Проблемы энерго- и ресурсосбережения*, – Ташкент, 2017, №3-4, – с. 83-88. (01.00.00. №21).
12. Matchanov N.A., Malikov M.A., Sadullaeva Sh.E., Soo J.M. Assesment of photovoltaic plant performance under actual operating conditions // *Проблемы энерго- и ресурсосбережения*, – Ташкент, 2017, №3-4, – с. 171-177. (05.00.00. №21).
13. Матчанов Н.А., Мирзабаев А.М., Умаров Б.Р., Маликов М.А., Камолиддинов А.У., Бобожонов К.А. Экспериментальное исследование характеристик монокристаллических и поликристаллических кремниевых фотоэлектрических модулей в климатических условиях Ташкента // *Журнал Проблемы энерго- и ресурсосбережения*, – Ташкент, 2016, №3-4, – с. 211-217. (05.00.00. №21).
14. Matchanov N.A., Avloqulov U.A. Development of projects of national standards for solar energy in Uzbekistan // *Applied Solar Energy*, – USA, 2016, Vol. 52, Iss. 2, – pp. 124-128. ((05.00.00. №4. Springer, IF: 0.81).
15. Matchanov N.A., Zhuraev Kh.N., Mirzabaev A.M., Dzhumabaev D. Solar photothermoelectric installation for cooling of low-power mobile objects // *Applied Solar Energy*, – USA, 2015, Vol. 51, Iss. 2, – pp. 144-147. (05.00.00. №4. Springer, IF: 0.81).
16. Atabaev I.G., Matchanov N.A., Khazhiev M.U., Saidov D. On the possibility of determining the diffusion length of excitons in semiconductors from photomagnetic measurement data / *Physics of the Solid State*. – Saint-Petersburg (Russia), 2005, Vol. 47, – pp. 2025–2029. (№11. Springer, IF: 0.597).
17. Atabaev I.G., Matchanov N.A., Khazhiev M.U., Saidov D. Estimating the Contribution of Excitons to Solar Cell Photocurrent by Photomagnetic Measurement Data / *Applied Solar Energy*. – USA, 2005, Vol. 41, Iss. 1, – pp. 64-68. (05.00.00. №4. Springer, IF: 0.279)

II бўлим (II часть, part II)

18. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ: Гувохнома № DGU 26702 от 06.02.2020г. «Методика расчета по определению коэффициента производительности многокомпонентной фотоэлектрической станции с учетом ФВ технологий». Авторы: Матчанов Н.А., Расаходжаев Б.С., Садуллаев Ж.О.
19. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ: Гувохнома № DGU 06930 от 24.06. 2019. «Программа для метода расчета по определению влияния внешних факторов на характеристики фотоэлектрических модулей». Авторы: Матчанов Н.А., Ахадов Ж.З., Расаходжаев Б.С., Садуллаев Ж.О.
20. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ: Гувохнома № DGU 05120 от 13.03.2018г. «Программа для мониторинга выходного напряжения, тока и температуры фотоэлектрических модулей». Авторы: Матчанов Н.А., Мирзаев А.А., Бутунбаев Б.Н.
21. Патент на полезную модель №FAP01463 от 30.08.2017: "Цифровой вольтметр с автослежением". Авторы: Матчанов Н.А., Бутунбаев Б.Н., Мирзаев А.А.
22. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ: Гувохнома №DGU 04373 от 31.03.2017 г. «Программа для определения выходного напряжения, тока и температуры фотоэлектрических модулей». Авторы: Матчанов Н.А., Бутунбаев Б.Н., Мирзаев А.А., Кулматов Х.Х.
23. Матчанов Н.А. Формирование основных принципов интеграции фотоэлектрических систем к электрической сети. «Қайта тикланадиган энергия манбалари: илмий тадқиқотлар, инновацион технологиялар ва ишланмалар», республика илмий-амалий анжумани материаллари тўплами, Қарши, 16-17 октябрь 2020 йил. Стр. 18-24.
24. Матчанов Н.А. Динамика изменения коэффициентов производительности и использования установленной мощности фотоэлектрической системы мощностью 2.24 кВт интегрированной к электрической сети. Труды международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», ", – Ташкент, 22-23 сентября, 2020г., стр. 53-58.
25. Матчанов Н.А., Ким О.С., Бутунбаев Б.Н. Моделирование работы фотоэлектрической станции мощностью 130 кВт при различных углах наклона и азимута. Труды международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», ", – Ташкент, 22-23

- сентября, 2020г., стр. 81-83.
26. Матчанов Н.А., Григорова Е.А. Расчет экономической эффективности строительства фотоэлектрической станции и ее технических параметров. Труды международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», – Ташкент, 22-23 сентября, 2020г., стр. 118-123.
27. Қобулов Р.Р., Матчанов Н.А., Атабоев О.К., Акбаров Ф.А. Особенности температурной зависимости выходных параметров CIGS солнечного фотоэлектрического модуля в условиях низкого солнечного освещения // «Конденсирланган холатлар физикасининг замонавий муаммолари» Республика илмий-амалий анжумани. 4 май 2019 й., Бухоро ш., 98 б.
28. Кобулов Р., Матчанов Н., Атабоев О., Акбаров Ф. Влияние паразитных сопротивлений тонкопленочного солнечного элемента на основе Cu(InGa)Se_2 на величину эффективности. «Қайта тикланувчи энергия манбалари ва барқарор атроф-муҳит соҳасида магистрлик дастурини ишлаб чиқиш» лойиҳаси доирасида Халқаро илмий-амалий семинар, 2019 й. 26-28 март, Гулистон шаҳри, 113 -118 бетлар.
29. Матчанов Н.А., Ахадов Ж.З., Расаходжаев Б.С., Авлокулов У.А. Исследования по определению коэффициентов пропускания прозрачных покрытий и отражающих поверхностей солнечных установок Международная научно-практическая конференция «Ауэзовские чтения – 17» Казахстан, г. Шымкент, 11-12 апреля 2019 г. стр.174-175.
30. Авезова Н.Р., Матчанов Н.А., Далмурадова Н.Н. Возобновляемая энергетика Узбекистана: вызовы и решения// Материалы международного научного семинара им.Ю.А.Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», ИСЭ СО РАН, ПЭИПК Министерства энергетики РФ, ТГТУ, 23-27 сентября, 2019г. стр. 288-293.
31. Мирзабаев А.М., Матчанов Н.А., Сытдыков О.Р., Махкамов Т.А., Мирзабеков Ш. Проблемы интеграции возобновляемых источников энергии с сетью/Международная научно практическая конференция по "Сол-нечная энергетика: приоритетные исследования и тенденции развития", – Ташкент, 20-21 декабря 2019г. – с.35.
32. Матчанов Н.А., Тураев А.И., Мирзаев А.А. Анализ напряжения и частоты фотоэлектрической системы подключенной к сети / Международная научно-практическая конференция по "Солнечная энергетика: приоритетные исследования и тенденции развития" – Ташкент, 20-21 декабря 2019г. – с. 41.
33. Matchanov N.A., Kim O.S. A survey standards on reduction of voltage and frequency disturbances of photovoltaic power plants through reactive and

- active power control//Международная научно практическая конференция по "Солнечная энергетика: приоритетные исследования и тенденции развития", – Ташкент, 20-21 декабря 2019 г., – с. 42.
34. Матчанов Н.А., Бутунбаев Б.Н., Мирзаев А.А., Камолиддинов А.У. The monitoring system for low power solar photovoltaic systems / International Solar Energy Institute, Международная научно практическая конференция по "Солнечная энергетика: приоритетные исследования и тенденции развития", – Ташкент, 20-21 декабря 2019 г., – с. 58-59.
35. Кабулов Р.Р., Матчанов Н.А., Умаров Б.Р., Маликов М.А. Особенности нагрузочных вольтамперных характеристик поликристаллического кремниевого солнечного элемента при различных уровнях освещенности солнечным светом. Международная конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», 13-14 июня 2017 г., Ташкент, Узбекистан. Стр.131-134.
36. Кабулов Р.Р., Матчанов Н.А., Маликов М., Умаров Б. Фототоковые характеристики фотобатареи на основе аморфного гидрированного кремния. Республика илмий-амалий анжумани «Ярим ўтказгичлар ва ярим ўтказгич структуралардаги номувозанатли жараёнлар физикаси». Тошкент, 2017й., 1-2 февраль, стр.202-204.
37. Матчанов Н.А., Авезова Н.Р., Маликов М.А. Особенности проектирования фотоэлектрических систем // “Ишлаб чиқариш корхоналарининг энергия тежамкорлик ва энергия самарадорлик муаммоларини ечишда инновацион технологияларнинг аҳамияти” мавзусида Республика илмий-амалий анжумани, Қарши муҳандислик-иктисодиёт институти 2016 йил, 15-16 апрель, 230-233 бетлар.
38. Матчанов Н.А., Адамбаев К., Жураев Х.Н. Автономная солнечная фототермоэлектрическая установка для охлаждения маломощных мобильных объектов. Актуальные проблемы использования альтернативных источников энергии. Карши, 28-29 апрель, 2014 г. стр. 135-136.
39. Matchanov N.A., Farhan M., Khan M.A., Timm E., D’Angelo J., Hogan T. Thermoelectric Module Hot Side Contact Studies for n-type $\text{Ag}_{0.86}\text{Pb}_{18}\text{SbTe}_{20}$ (LAST) and p-type $\text{Ag}_{0.9}\text{Pb}_9\text{Sn}_9\text{Sb}_{0.6}\text{Te}_{20}$ (LASTT). CNDA, June 2008, East Lansing, MI, USA, p.37.
40. Atabaev I.G., Matchanov N.A., Bakhranov E.N., Saliev T.M., Khajiev M.U., Opportunity of Definition of Exiton Diffusion Length in Semiconductors on a Date of Photomagnetic Measurements//Proceeding of International Conference on Quantum Complexities in Condensed Matter, August 21-28, 2003, Bukhara, Uzbekistan, pp.17.