

**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ФАНЛАР АКАДЕМИЯСИ
ЭНЕРГЕТИКА МУАММОЛАРИ ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.05/2025.28.11.T.02.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ЖИЗЗАХ ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

СУЯРОВ АНВАР ОЛИМЖОН ЎҒЛИ

**ҚУЁШ ПАНЕЛЛАРИ УЛАНАДИГАН НОСИММЕТРИК ЮКЛАМАЛИ
ТАҚСИМЛАШ ЭЛЕКТР ТАРМОҚЛАРИДА ҚУВВАТ ИСРОФИНИ
КАМАЙТИРИШ**

05.05.01 – Энергетика тизимлари ва мажмуалари

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

Тошкент – 2026

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

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

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

Суяров Анвар Олимжон ўғли

Қуёш панеллари уланадиган носимметрик юкламалар тақсимлаш электр
тармоқларида қувват исрофини камайтириш..... 3

Суяров Анвар Олимжон ўғли

Снижение потерь мощности в распределительных электрических сетях с
несимметричной нагрузкой при подключении солнечных панелей..... 27

Suyarov Anvar Olimjon ugli

Reduction of Power Losses in Distribution Electrical Networks with
Unbalanced Loads with the Integrating Solar Panels..... 53

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works..... 57

**ЎЗБЕКИСТОН Р
ЕСПУБЛИКАСИ ФАНЛАР АКАДЕМИЯСИ
ЭНЕРГЕТИКА МУАММОЛАРИ ИНСТИТУТИ
ХУЗУРИДАГИ ИЛМий ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.05/2025.28.11.T.02.01 РАҚАМЛИ ИЛМий КЕНГАШ**

ЖИЗЗАХ ПОЛИТЕХНИКА ИНСТИТУТИ

СУЯРОВ АНВАР ОЛИМЖОН ЎҒЛИ

**ҚУЁШ ПАНЕЛЛАРИ УЛАНАДИГАН НОСИММЕТРИК ЮКЛАМАЛИ
ТАҚСИМЛАШ ЭЛЕКТР ТАРМОҚЛАРИДА ҚУВВАТ ИСРОФИНИ
КАМАЙТИРИШ**

05.05.01 – Энергетика тизимлари ва мажмуалари

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

Тошкент – 2026

Техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг мавзуси Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2025.2.PhD/T5681 рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертация Жиззах политехника институтида бажарилган.

Диссертация автореферати (ўзбек (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасига (www.energetika.uz) ва «ZiyoNet» ахборот-таълим порталига (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:

Саттаров Хуршид Абдишуккурович
техника фанлари номзоди, профессор

Расмий оппонентлар:

Исаков Абдусалом Жалилович
техника фанлари доктори, профессор

Эркинов Баходир Нариманович
техника фанлари бўйича фалсафа доктори, доцент

Етакчи ташкилот:

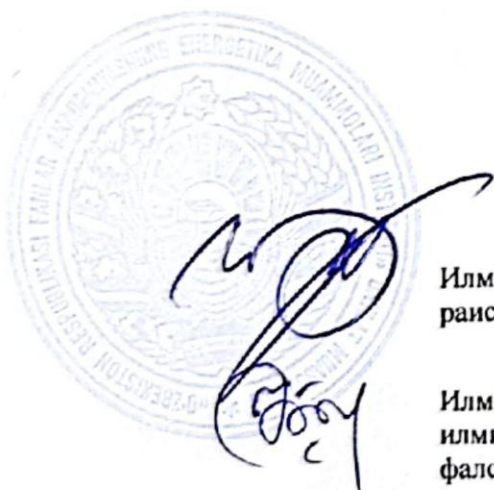
“UzAssystem” МЧЖ қўшма корхонаси

Диссертация химояси Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Энергетика муаммолари институти ҳузуридаги DSc.05/2025.28.11.T.02.01 рақами Илмий кенгашнинг 2026 йил “28” ОКМЯБР соат 10⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 40. Тел.: (99855) 520-01-52; e-mail: energetika_in@mail.ru).

Диссертация билан Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Энергетика муаммолари институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (8 рақам билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 40. Тел.: (99855) 520-01-52).

Диссертация автореферати 2026 йил “ 12 ” ОКМЯБР да тарқатилди.

(2026 йил “ 9 ” ОКМЯБР даги 8 рақамли реестр баённомаси).



О.Х. Ишназаров

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

Ж. Н. Толипов

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

Ш.В. Хамидов

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

КИРИШ (докторлик (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда қайта тикланувчи энергия манбалари асосидаги генерация қурилмаларини тақсимлаш электр тармоқларига интеграциялаш, маҳаллий генерацияни кенгайтириш ҳамда электр энергиясини узатиш ва тақсимлаш самарадорлигини оширишга муҳим аҳамият берилмоқда. Халқаро энергетика соҳасидаги тадқиқотлар натижасида “...қуёш фотоэлектрик қурилмаларининг марказлашган электр тармоқларидаги улушини ошириш ҳисобига анъанавий ёқилғи ресурслари сарфини камайтириш имконияти йилига 450–500 миллион тонна кўмир эквивалентидаги ёқилғини тежаш салоҳиятини ташкил этмоқда”¹. Тақсимланган қуёш генерациясининг ривожланиши паст ва ўрта кучланишли тармоқларда қувват оқимларининг ўзгариши, фазалар бўйича юкланиш нотекислиги ва техник исрофларнинг ортиши билан изоҳланади. Шу сабабли қуёш фотоэлектрик қурилмалари уланган носимметрик юкламали тақсимлаш тармоқларида қувват оқимларини мувофиқлаштириш, иш режимларини мақбуллаштириш ва актив қувват исрофини камайтиришга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда электр энергияси истеъмолининг ортиши ва ишлаб чиқариш қувватларининг кенгайиши шароитида қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланиш, қуёш фотоэлектрик қурилмаларини тақсимлаш тармоқларига интеграциялаш, қувват оқимларини мақбуллаштириш ва электр энергияси исрофларини камайтириш усулларини такомиллаштиришга қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, жумладан, иқтисодиёт объектлари ва аҳоли яшаш ҳудудларидаги қуёш фотоэлектрик станциялари тақсимлаш тармоғига уланган шароитда юкланиш ва генерация номутаносиблигини баҳолаш, қувват оқимларини бошқариш, исрофларни камайтириш ҳамда тармоқнинг техник-иқтисодий самарадорлигини ошириш бўйича тадқиқотлар устувор ҳисобланади.

Республикамизда электр энергиясига бўлган талабни қондириш, электр таъминоти ишончлилигини ошириш, қайта тикланувчи энергия манбаларини электр тармоқларига интеграциялаш, қуёш фотоэлектрик қурилмаларидан самарали фойдаланиш ҳамда тақсимлаш тармоқларида қувват исрофларини камайтиришга қаратилган тизимли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. Ўзбекистон Республикасининг 2022–2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистон тараққиёт стратегиясида “Иқтисодиётни электр энергияси билан узлуксиз таъминлаш ҳамда “яшил иқтисодиёт” технологияларини турли соҳаларга кенг татбиқ этиш, иқтисодиётнинг энергия самарадорлигини 20 фоизга ошириш...”² каби устувор вазифалар белгиланган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда қуёш фотоэлектрик станцияларини тақсимлаш тармоқларига мақбул улаш, тармоқ режимларини такомиллаштириш ва техник-иқтисодий самарадорлигини баҳолаш бўйича илмий тадқиқотлар олиб бориш муҳим ҳисобланади.

¹ <https://policy.asiapacificenergy.org/destination=policies>

² О‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi “

2022-2026 yillarga mo‘ljallangan yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi” to‘g‘risida”gi PF-60-sonli Farmoni, <https://lex.uz/uz/docs/-5841063>

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 9 сентябрдаги “Энергия тежовчи технологияларни жорий қилиш ва кичик қувватли қайта тикланувчи энергия манбаларини ривожлантириш бўйича қўшимча чора-тадбирлар тўғрисида”ги ПФ-220-сон Фармони, 2022 йил 2 декабрдаги “2030 йилгача Ўзбекистон Республикасининг “яшил” иқтисодиётга ўтишига қаратилган ислохотлар самарадорлигини ошириш бўйича чора-тадбирлар тўғрисида”ги ПҚ-436-сон ва 2019 йил 22 августдаги “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-сон қарорлари ҳамда соҳага оид бошқа меъёрий-ҳукукий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялар ривожланишининг II. «Энергетика, энерготехкорлик ва муқобил энергия манбалари» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Куёш фотоэлектрик станцияларини паст кучланишли марказлаштирилган электр тармоқларига улашда тармоқ параметрларини ҳисобга олиш, уларнинг тармоқ иш режимларига салбий таъсирини камайтириш ҳамда самарали интеграциялаш усулларини такомиллаштиришга қаратилган илмий тадқиқотлар жаҳоннинг кўплаб етакчи илмий-тадқиқот марказлари ва олий таълим муассасаларида, жумладан, Аризона давлат университети, Стэнфорд университети (АҚШ), Ольборг университети, Дания техника университети (Дания), Империял коллеж Лондон (Буюк Британия), Лозанна Федерал политехника институти (Швейцария), Афина Миллий техника университети (Греция), Лейкхед университети (Канада), МИСИС Миллий фан ва технологиялар университети (Россия), Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Энергетика муаммолари институти, Физика-техника институти, Қайта тикланувчи энергия манбалари миллий илмий-тадқиқот институти, Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техника университети ва бошқа илмий ҳамда олий таълим муассасаларида кенг қамровли илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Бугунги кунга қадар электр энергияси исрофларини ҳисоблаш ва минималлаштириш, тақсимлаш электр тармоқларининг иш режимларини тадқиқ этиш, қайта тикланувчи ва тақсимланган генерация манбаларини тармоққа интеграциялаш ҳамда уларнинг тармоқ параметрларига таъсирини баҳолашга йўналтирилган илмий-тадқиқот ишлари жаҳоннинг таниқли олим ва етакчи мутахассислари Gopiya Naik, J.A. García, M. Abedini, B.G. Saneyev, M.H. Moradi, R.S. Rao, S. Shriram, A.V. Pazderin, Y.M. Atwa, E.F. El-Saadany, M.A. Salama, R. Seethapathy, M.E. Baran, F.F. Wu, T. Ackermann, G. Andersson, L. Söder, N.M. Pindoriya, K.A. Joshi ва бошқалар томонидан кенг ўрганилган.

Электр энергетика тизимларининг барқарорлиги ва ишончилигини ошириш, электр энергияси сифати кўрсаткичларини таъминлаш, куёш фотоэлектрик станцияларини марказлашган электр тармоқларига

интеграциялаш, уларнинг техник, иқтисодий ва экологик кўрсаткичларини аниқлаш ҳамда энергетик салоҳиятини баҳолаш масалалари бўйича Ўзбекистон олимларидан Р.А. Захидов, Т.Х. Носиров, Х.М. Муратов, Ў.А. Тожиев, Н.А. Матчанов, М. Мухаммадиев, Д.Б. Қодиров, О. Бозоров, А.И. Тураев ва бошқалар томонидан кенг қамровли илмий тадқиқотлар олиб борилган ҳамда салмоқли илмий натижаларга эришилган.

Бу борада эришилган салмоқли илмий натижаларга қарамасдан, қуёш фотоэлектрик станциялари марказлашган электр тармоғи билан параллел ишлаган шароитда тақсимлаш тармоқларида қувват исрофларини камайтириш, тақсимланган генерация манбаларининг тармоқ иш режимлари, фазалар бўйича юкланиш ҳолати ҳамда нисбий электр энергияси исрофларига таъсирини баҳолаш масалалари етарли даражада тадқиқ этилмаган. Мазкур диссертация ишида қуёш фотоэлектрик станциялари уланган тақсимлаш электр тармоқларида қувват ва электр энергияси исрофларини минималлаштириш, электр энергияси сифати кўрсаткичларини яхшилаш, тармоқнинг иш режимларини мақбуллаштириш ҳамда энергия самарадорлигини ошириш масалалари комплекс равишда кўриб чиқилиб, уларни ҳал этишга қаратилган тегишли усул ва ечимлар таклиф этилган.

Диссертация тадқиқотининг диссертация иши бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Жиззах политехника институти илмий-тадқиқот режаларининг 101128871- ERASMUS EDU-2023-CBHE DEBSEUz – Ўзбекистонда қуёш энергетикаси бўйича бакалаврлар учун мақсадли таълим дастурини ишлаб чиқиш лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади қуёш фотоэлектрик станциялари уланган носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоқларида иш режимларини мақбуллаштириш орқали қувват исрофларини камайтиришдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоқларида электр энергияси сифат кўрсаткичларини тадқиқ қилиш ва уларнинг тармоқ иш режимига таъсирини баҳолаш;

қуёш фотоэлектр панеллари ҳамда носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоғи ўртасидаги қувват оқимларини ифодаловчи математик модел ишлаб чиқиш;

қуёш панелларидан фойдаланиш асосида тақсимлаш электр тармоқларидаги юклама носимметриясини камайтириш алгоритминини ишлаб чиқиш;

носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоғига интеграция қилинган қуёш фотоэлектр қурилмаларида қувватни бошқариш самарадорлигини ошириш усулини такомиллаштириш;

қуёш панеллари интеграция қилинган носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоқларининг техник-иқтисодий самарадорлигини асослаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида паст кучланишли электр таъминоти тизимидаги симметрик тақсимланмаган истеъмолчилар ва электр тармоқларига уланган қуёш панеллари ҳамда уларда ўрнатилган инверторлар қабул қилинган.

Тадқиқотнинг предмети носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоғи параметрларини ҳисобга олган ҳолда қуёш панелларидан фойдаланиш ва қувват оқимлари назоратини ишлаб чиқиш.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида математик статистика ва эҳтимоллар назарияси, Нютон-Рафсон, математик таҳлил усуллардан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоғига уланган фотоэлектрик станция инверторининг актив қувват узатиш самарадорлигини юклама бурчагининг ўзгаришига боғлиқ ҳолда ошириш усули такомиллаштирилган;

қуёш фотоэлектрик станцияси инвертори томонидан электр тармоғига узатиладиган токнинг юқори гармоник ташкил этувчиларини белгиланган чегараларда сақлаш имконияти асосланган;

электр тармоғи ва қуёш фотоэлектрик станциясининг умумий уланиш нуқтасида кучланиш оғишларини компенсациялаш асосида инвертор чиқиш кучланишини автоматик ростлаш усули такомиллаштирилган;

қуёш фотоэлектрик станциялари уланган носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоқларида юклама ва тармоқ параметрларининг ўзгаришини ҳисобга олган ҳолда инверторни адаптив бошқариш алгоритми ишлаб чиқилган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси қуйидагилардан иборат:

тақсимлаш электр тармоқларида фазалараро носимметриклик қуёш панелларини улаш орқали бартараф этилган;

қуёш панеллари уланган носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоқларининг умумий уланиш нуқтасида юқори гармоника даражалари камайтирилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги замонавий метрологик аттестациядан ўтган ўлчов асбоблари ва дастурларининг қўлланилганлиги, шунингдек, назарий ва экспериментал тадқиқотлар натижаларининг ўзаро мос келиши билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоқларда қуёш панелларини улаш орқали самарадорликка эришилганлиги ва қувват оқимларининг математик модели ишлаб чиқилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоқларига уланган қуёш панелларидан фойдаланиш усулини ишлаб чиқишдан иборат. Ишлаб чиқилган усулнинг қўлланилиши электр тармоғи самарадорлигини 16% га ошириш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоқларида қуёш фотоэлектрик станцияларидан фойдаланиш асосида қувват исрофларини камайтириш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

қуёш фотоэлектрик станциялари уланган носимметрик юкламали паст

кучланишли тақсимлаш электр тармоқларида трансформатор ва унга уланган истеъмолчиларнинг юкланиш ҳолатини ҳисобга олган ҳолда қувват исрофларини аниқлаш бўйича ишлаб чиқилган усул «Худудий электр тармоқлари» АЖ Жиззах ҳудудий филиалига қарашли тақсимлаш электр тармоқларида жорий қилинган («Худудий электр тармоқлари» АЖнинг 2026 йил 13 февралдаги №01-02-59/253-сон маълумотномаси). Натижада қуввати 250 кВА бўлган трансформатордан узунлиги 444 метр кабель линияси орқали таъминланувчи истеъмолчилар тармоғида умумий қуввати 34 кВт бўлган қуёш фотоэлектрик станцияларини ўрнатишнинг мақбул параметрларини аниқлаш имконини берган;

носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоқларида қуёш фотоэлектрик станцияларидан фойдаланишнинг техник-иқтисодий самарадорлигини баҳолаш бўйича ишлаб чиқилган илмий-амалий натижалар «Худудий электр тармоқлари» АЖ Жиззах ҳудудий филиалига жорий қилинган («Худудий электр тармоқлари» АЖнинг 2026 йил 13 февралдаги №01-02-59/253-сон маълумотномаси). Натижада умумий қуввати 34 кВт бўлган қуёш фотоэлектрик станцияларини ўрнатиш учун сарфланган харажатларнинг қопланиш муддати 3,7 йилни ташкил этиши ва йилига 45 609 225 сўм иқтисодий самара олиш имконияти аниқланган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқот натижалари 10 та илмий-амалий анжуманлар ва семинарларда, шу жумладан, 5 та халқаро (шу жумладан, Scopus маълумотлар базасига киритилган анжуманларда 3 та) ва 5 та республика анжуманларида апробациядан ўтган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 16 та илмий иш, шу жумладан, Ўзбекистон Республикаси олий аттестация комиссиясининг диссертациялар асосий илмий натижаларини нашр этиш учун тавсия этилган илмий нашрларида 6 та мақола 2 та хорижий ва 4 та маҳаллий журналларида чоп этилган, 1 та ЭҲМ дастурлари учун гувоҳнома олинган.

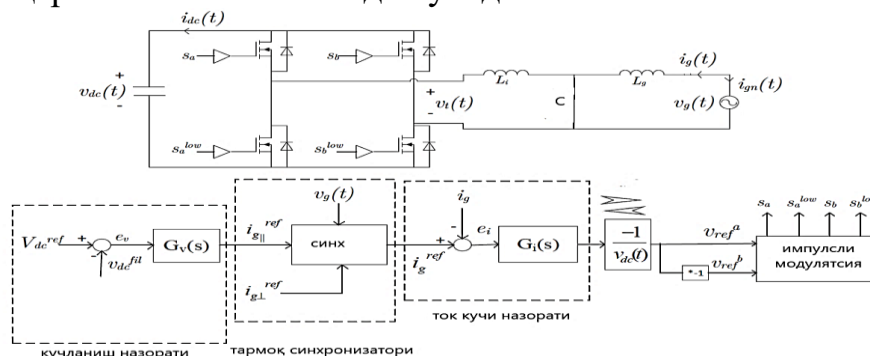
Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация иши таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, 68 номда фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат, асосий матн ҳажми 111 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

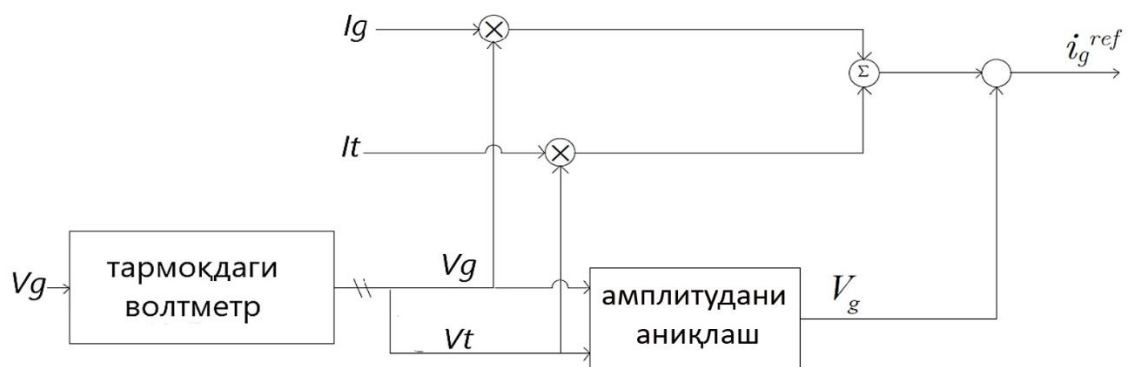
Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари, объекти ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён этилган,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

Диссертациянинг **“Қуёш панеллари уланган носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоқлари ҳолати. Тадқиқотнинг мақсад ва вазифалари”** деб номланган биринчи бобида Ўзбекистон Республикасида

Инвертор бошқарув тизимини муҳофама қилиш учун урта қисмдан фойдаланилади: ток кучи назорати, тармоқ синхронизацияси ва ўзгармас ток кучланишини бошқариш. 1-расмда бошқарув тизимининг блок схемаси кўрсатилган. Кучланиш бошқарув тизими ўзгармас ток кучланишини меёрий даражада ушлаб туриш учун ишлатилади, ток кучи бошқарув тизими эса ток кучини белгиланган қийматларда ушлаб туради, бу тизим тармоққа узатилаётган қувватни бошқариш учун ишлатилади. Бир фазали кучланиш манбали инверторларнинг актив ва реактив қувватини $d-q$ рамкасида ўзгартириш орқали сошлаб бўлмади. Бунинг ўрнига актив ва реактив қувватни бошқарадиган тармоқ синхронизатор блокида ток кучини ишлаб чиқариш учун таклиф этилди. Оддий матрицадан фойдаланган ҳолда, тармоқ кучланишининг барча ташкил этувчиларини такрорлаш билан боғлиқ ҳисоблаш операцияларини камайитиришга эришиш талаб этилади. Реактив ташкил этувчилар аниқлангандан сўнг, реактив қувватни бошқариш имконияти пайдо бўлади.

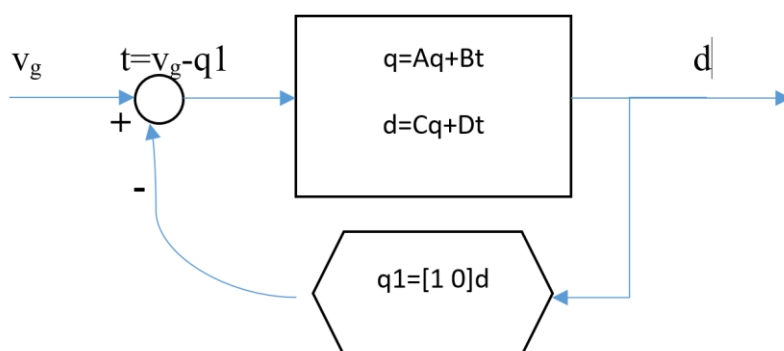


Тармоқ кучланишини ҳисоблагич ва амплитуда идентификатори тармоқ кучланиш синхронизаторини ташкил этувчи иккита компонентдир. 2-расмда тармоқ синхронизаторининг блок-схемаси келтирилган.



2-расм. Электр тармоқ синхронизатори ва реактив қувват назорати

Тармоқ кучланишини баҳоловчи ҳисоблагич кириш сигнали сифатида электр тармоғининг кучланишидан фойдаланади ва унинг асосида иккита ўзаро боғлиқ сигнални шакллантиради. Биринчи сигнал тармоқ кучланиши билан фазавий жиҳатдан мос келувчи параллел компонентни, иккинчиси эса унга нисбатан 90° фаза силжишига эга бўлган ортогонал компонентни ифодалайди. Мазкур ҳисоблагичнинг математик модели қуйидаги фазовий ҳолат кўринишида ифодаланади



3-расм. Тармоқ кучланишини баҳолаш учун тескари алоқа блоки

$$\begin{pmatrix} q1 \\ q2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} q1 \\ q2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} k_{sinx} \\ 0 \end{bmatrix} (v_g - q1) \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} v_g \\ v_t \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} d1 \\ d2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} q1 \\ q2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Юқорида келтирилган тескари алоқа блок-схемасида кириш сигнали $v_g - q1$ кўринишида ифодаланади. Бунда $q1$ умумий сигналнинг параллел ташкил этувчисини ифодалайди. 3-расмдан кўриниб турибдики, $q1$ сигнали v_g кучланиш қийматини тегишли равишда ўзгартиришга хизмат қилади. Тескари алоқа блоки натижасида v_g сигнали шакллантирилади ва у электр тармоғининг частотасига мос равишда синусоидал қонун бўйича ўзгаради. Келтирилган матрицада A матрицаси ω_0 фундаментал частотадаги тармоқ кучланишининг ҳолатини ифодалайди.

Бунда k_{sinx} коэффиценти электр тармоғидаги ω_0 фундаментал частотага мос кучланиш ташкил этувчисини ажратиб олишга хизмат қилади, $q1$ сигнали орқали эса v_g кучланиши тармоқ параметрларига мувофиқлаштирилади. $q1$ сигналнинг муҳим хусусияти шундаки, у тармоқ кучланишидаги юқори тартибли гармоник ташкил этувчиларга сезгир эмас.

Юқорида келтирилган тизим электр тармоқларида номинал кучланиш ва номинал частотага нисбатан ўз фаолиятини олиб боради. Бироқ электр тармоқларининг кучланиш ва частотаси доимий равишда ўзгариб туради. Бу ўзгариш қуйидаги формулада ўз аксини топган.

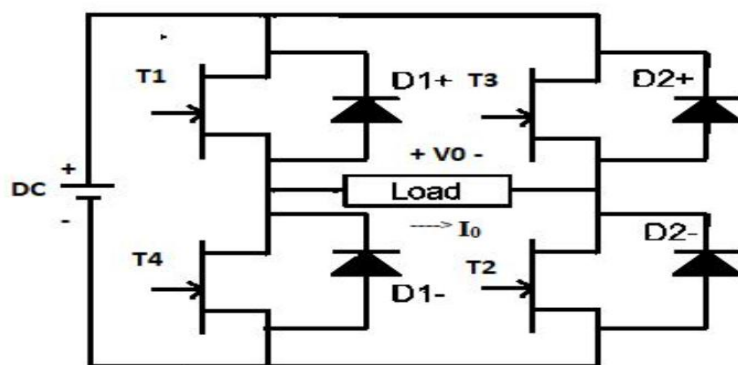
$$\Delta V = \frac{V_N - V_T}{V_N} * 100\% \quad (3)$$

бунда V_N (В)- тақсимлаш электр тармоғидаги номинал кучланиш, V_T (В)- тақсимлаш электр тармоғининг реал кучланиш қиймати. Тақсимлаш электр тармоғининг частотаси номинал қийматга нисбатан солиштирилади ва қуйидагича ифодаланади:

$$\Delta f = f_N - f_{Nq} \quad (4)$$

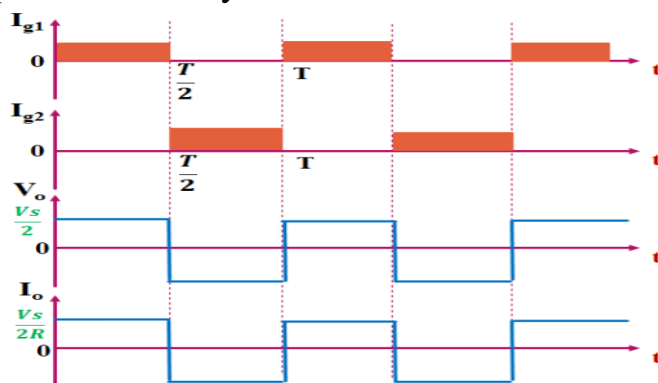
бунда Δf – тармоқ частотасининг оғиш қиймати, f_N – номинал частота қиймати (50Гц), f_T – тармоқнинг оний вахтдаги частота қиймати.

Квадрат тўлқинли ва пульс модуляцияли инверторлар бир босқичли инверторларнинг энг самарали турлари ҳисобланади. Ўзгармас токни ўзгарувчан токга айлантиришнинг энг оддий усули - бу квадрат тўлқин тури, лекин кам такрорланиши туфайли тулқин трансформаторнинг магнит ўзагини кесишда қийналади.



4-расм. Ярим кўприк бир фазали инвертор.

Ярим кўприк бир фазали инверторнинг ишлаш схемаси 4-расмда кўрсатилган. Бу типдаги инверторларнинг кучланиш ва ток кучи ўзгариш графиги қуйидаги 5-расмдагидек бўлади.



5-расм. Бир фазали инвертор кучланиш ва ток кучи ўзгариши.

Квадрат тўлқинли ўзгарувчан ток сигналини ҳосил қилиш учун калитлар ($D1$ дан $D4$ гача кўрсатилган) квадрат тўлқинли коммутация техникаси ёрдамида бошқарилади. $D1$ ва $D4$ га уланган 50% мажбурий циклга эга бўлган назорат сигналидан фойдаланиб, ўзгарувчан ток рентабеллигига эришилади.

D2 ва D3 га қўшимча равишда уланган бир хил белгининг ўзгартирилган версияси. Ушбу ўзгартириш стратегиясига асосан D2 ва D3 ўчирилган бўлса ҳам D1 ва D4 доимий ишлашини таъминлайди. 5-расмда кўрсатилганидек, у квадрат тўлқин ҳосил қилади. Ярим кўприк инверторидан фойдаланишнинг афзаллиги шундаки, тўртта транзисторни бошқариш учун фақат битта оддий бошқарув сигнали талаб қилинади.

Тақсимлаш электр тармоғига уланган инвертор 5-расмда кўрсатилгандек, ўзгарувчан ток кучланишининг қийматлари деярлик бир хил катталиқда. Юқоридаги графикни синусоида кўринишига келтириш учун ўзгармас ток кучланишини керакли қийматларда чегаралаш муҳим аҳамият касб этади. Шу мақсадда инверторларда ўзгармас ток сиғим конденсаторларидан фойдаланилади. Инверторнинг кириш қуввати билан инвертор чиқиш қувватининг ўзаро балансини таъминлаш учун ҳам ўзгармас ток сиғим конденсатори муҳим аҳамиятга эга. Сиғим конденсаторларининг ўлчами қуйидаги формулалар асосида аниқланади.

Электр тармоғидаги ток кучи ва кучланиши қуйидагича белгиланди:

$$u_g(t) = U_g \cos(\omega_g t) \quad (5)$$

$$i_g(t) = I_g \cos(\omega_g t - \varphi) \quad (6)$$

Юқоридаги ифодалар асосида инвертор чиқишидаги қувватнинг оний қиймати аниқланиб, у доимий ва ўзгарувчан ташкил этувчилардан иборатлиги белгиланди:

$$P_{chiqish}(t) = S \cos \varphi + S \cos(2\omega_g t - \varphi) \quad (7)$$

Бунда S — инвертор чиқишидаги тўла қувват. Ўзгарувчан қувват ташкил этувчиси инвертор киришидаги токда икки каррали частотада пульсация ҳосил қилади:

$$i_{DC-AC}^k t = \frac{S}{U_{DC}^k} \cos(2\omega_g t - \varphi) = I_{DC-AC} \cos(2\omega_g t - \varphi) \quad (8)$$

Ўзгармас ток линкида жойлашган конденсатор сиғимини тебранма ўзгармас ток кучланиши U_{DC-AC}^{mak} орқали қуйидагича ифодаланади:

$$C_{DC} = \frac{I_{DC-AC}}{2\omega_g U_{DC}^k U_{DC-AC}^{mak}} \quad (9)$$

Таҷрибада SG350HX типдаги инвертор учун конденсатор сиғими:

$$C_{DC} = \frac{2.8 \text{ кВА}}{2 * 380 \frac{\text{рад}}{\text{сек}} * 380 \text{ В} * 800 \text{ В}} = 201.6 \text{ мФ} \quad (10)$$

Натижага кўра 230мФ *Cornell Dubilier* типдаги ишлаш муддати 50°C ҳароратда 200 минг соат бўлган конденсатор сиғими танланди.

Сиғим конденсаторларининг ишлаш муддати қуйидаги формула орқали аниқланди.

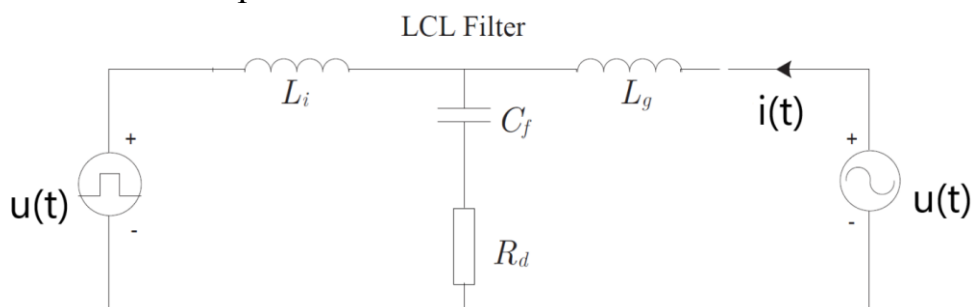
$$D_{ishlash \ davri} = D_{ishlash \ davri}(0) * 2^{\frac{T_0 - T_s}{\Delta T}} \quad (11)$$

бунда $D_{ishlash \ davri}$ сиғим конденсаторининг ишлаш даври, $D_{ishlash \ davri}(0)$ сиғим конденсаторининг ташқи ҳарорат максимал бўлиб тургандаги белгиланган ишлаш даври (бу қиймат қурилманинг паспорт маълумотларида келтирилади), T_s реал ташқи ҳаво ҳарорати, ΔT қурилманинг ярим ишлаш муддатига таъсир қилувчи ҳаво ҳароратининг кўтарилиши (бу қиймат

қурилманинг паспорт маълумотларида келтирилади). Одатда $D_{ishlash\ davri}(0)$ белгиланган иш даври 85°C ҳароратда 380 В дан юқори кучланишга эга сиғим конденсатори 4 минг соатдан 7 минг соатгача ёки 9 ойдан 18 ойгача муддатни ташкил этади.

Юқорида баён этилганидек, қуёш панелларидан иборат станция юқори гармоника манбаси сифатида кўрилади. Ўзгармас токни ўзгарувчан токга айлантириш жараёнида кичик ва юқори частотали тўлқинлар ишлаб чиқарилади. Биринчи гармоника 50 Гц ни ташкил этса, инвертор транзисторлари орқали 500-600 чи юқори гармоникали тўлқинлар чиқади. Тартиби 35 дан катта бўлган ҳар қандай оқим гармоникаси IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) стандартига мувофиқ, умумий кучланиш чиқиши номинал оқимининг 0,3% дан кўп бўлмаган катталиққа эга бўлиши керак ва умумий талаб бузилиши (THD) 2-5% дан кам бўлиши керак (IEEE - 1547). IEEE-1547 даги асл гармоник тартибга солиш жадвалини А иловасида топиш мумкин. Агар ушбу инверторнинг энг паст даражадаги гармоникалари 0,3% га камайтирилса, THD осонгина 5% атрофида сақланиши мумкин. Шундай қилиб, инверторнинг асосий гармоник оқими инвертор чиқиш фильтри учун асосий дизайн принципи сифатида номинал оқимнинг 0,3% дан кам бўлиши керак. Чиқиш фильтри дизайни, шунингдек, тармоқдаги гармоник кучланиш бузилишларини ҳисобга олмайди, чунки IEEE-1547 га мувофиқ гармоник оқим кирувчи ҳудуднинг электр энергетика тизимида мавжуд бўлган гармоник кучланиш бузилишидан келиб чиқадиган ҳар қандай гармоник оқимлардан ташқари бўлиши керак.

Юқори гармоникаларни электр тармоғига узатилишини олдини олиш мақсадида LCL филтрларининг турли хил кўринишларидан фойдаланилади. Таҳлил этилган SG350HX типидagi инверторда ўрнатилган филтр 6-расмда кўрсатилгандек алмаштириш схемасига эга.



6-расм. LCL филтрининг инвертор чиқиши ва тармоқга уланиши.

6-расмда юқорида айтиб ўтилган гармоник камайтириш мақсадига эришиш учун фойдаланилган учинчи тартибли LCL фильтри кўрсатилган. Филтр ўлчами ва рақамли контроллердан амалий фойдаланиш асосида 30 кГц коммутация частотаси танланган.

Асосий компонент ва юқори тартибли гармоник компонентлардан иборат бўлган тўлиқ кўприкнинг чиқиш кучланиши $u(t)$, чиқиш кучланиши сифатида ҳам танилган терминал кучланишидир. Лаплас доменидаги тармоқ оқимини ҳал қилиш учун суперпозициядан фойдаланиш орқали қуйидаги узатиш функциялари олинади:

$$\frac{I_t(k)}{U_i(k)} = \frac{-kC_f R_d - 1}{k^3 L_i L_g C_f + k^2 (L_i + L_g) R_d C_f + k (L_i + L_g)} \quad (12)$$

$$\frac{I_t(k)}{U_t(k)} = \frac{1 + k^2 C_f L_i + k R_d C_f}{k^3 L_i L_g C_f + k^2 (L_i + L_g) R_d C_f + k (L_i + L_g)} \quad (13)$$

Юқорида келтирилган формулалардан кўринадики, электр тармоғидан оқаётган $i_t(t)$ ток кучи умумий уланиш нуқтасидаги $u_i(t)$ кучланиш ва электр тармоқ $u_t(t)$ кучланишига узвий боғлиқ.

Юқорида айтиб ўтилганидек, IEEE-1547 тармоқ кучланишининг бузилиши натижасида юзага келадиган гармоник оқим бузилишининг мавжудлигига рухсат берганлиги сабабли, чиқиш фильтри дизайни буни ҳисобга олмайди. Шунинг учун чиқиш фильтрини лойиҳалашда (12) тенглама ҳисобга олинмайди.

Электр тармоқдаги ток кучи $i_t(t)$ терминал кучланишида мавжуд бўлган асосий компонент ва юқори частотали компонентлар туфайли катта частота бузилишларига дуч келиши мумкин бўлган $u_t(t)$ кучланиш орқали таъсирланади. Шу боис, (15) тенглама чиқиш фильтринининг узатиш функцияси сифатида қабул қилинган ва у қуйидагича:

$$F_f(k) = \frac{I_t(k)}{U_i(k)} = \frac{kC_f R_d + 1}{k^3 L_i L_g C_f + k^2 (L_i + L_g) R_d C_f + k (L_i + L_g)} \quad (14)$$

Юқори гармоникалардаги кучланишнинг ўртача квадратик қиймати қуйидаги формула орқали аниқланади:

$$|U_i(jh\omega_t)| = \frac{1}{\sqrt{2}} * 2 * \frac{(U_{Ao})_h * U_{ds}^n}{\frac{1}{2U_{ds}^n} * 2} = \frac{1}{\sqrt{2}} * k(h) * U_{ds}^n \quad (15)$$

бунда ўзгармас ток кучланиши U_{ds}^n деб қабул қилинган, $(U_{Ao})_h$ - ҳар бир юқори гармониканинг максимал кучланиш қиймати ўзгариши. Тўлиқ кўприк конфигурацияси бўйича $k(h) = \frac{(U_{Ao})_h}{\frac{1}{2U_{ds}^n} * 2}$ юқори гармоника тартибини ифодалайди. 17 ва 18 формулалардан фойдаланилса юқори гармоникаларнинг ток кучи қуйидаги ифода орқали аниқланади.

$$|I_i(jh\omega_t)| = \frac{1}{\sqrt{2}} * |F_f(jh\omega_t)| * k(h) * U_{ds}^n \quad (16)$$

бунда юқори гармоника $|I_i(jh\omega_t)|$ ток кучи қиймати инвертор орқали оқиб ўтувчи ток кучига нисбатан 0,3% дан ошмаслиги зарур.

Инверторда ҳосил бўладиган юқори гармоникаларга таъсир этувчи ток кучи назорат тизимини ҳам кўриб чиқилган. 15 ва 16 ифодаларни бирлаштириш орқали қуйидаги ифода келиб чиқади.

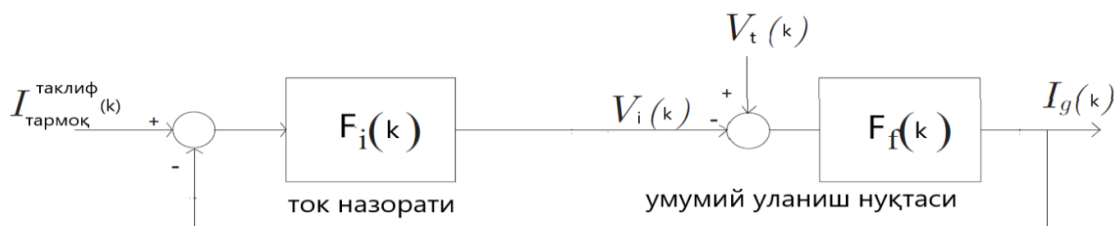
$$I_t(k) = F_f(k) \left(\frac{k^2 L_i C_f + k C_f R_d + 1}{k C_f R_d + 1} * U_t - U_i \right) \quad (17)$$

бунда

$$F_f(k) = \frac{k C_f R_d + 1}{k^3 L_i L_g C_f + k^2 (L_i + L_g) R_d C_f + k (L_i + L_g)} \quad (18)$$

20 ифодани соддалаштирсак қуйидагича бўлади:

$$I_t(k) = F_f(k) (U_t - U_i) \quad (19)$$



7-расм. Ток назоратининг ишлаш схемаси.

Инвертор орқали узатилаётган ток кучининг ўзгариши билан тармоқдаги ток кучи ўзгаришининг ўзаро боғлиқлиги 7-расмда келтирилган. Инвертор доимий равишда электр тармоғидаги ток кучи ўзгаришига нисбатан мослашиб ишлайди. Тавсия этилган электр тармоқ синхронлаш усули иккита асосий афзалликларга эга. Тавсия этилган электр тармоқ синхронизатори, иловада тақдим қилинган бир фазали электр тармоқ синхронизациясининг анъанавий усулидан фарқли ўлароқ, нафақат электр тармоқ кучланиши билан фазада бўлган филтрланган электр сигналини такрорлайди, балки электр тармоқ кучланишининг ташкил этувчи компонентини ҳисобга олади. Инверторга реактив қувват мос ҳолда ишлаб чиқариш учун ундан кенг фойдаланиш имконияти мавжуд. Оддий қуёш панелларида ишлатиладиган инверторлардан фарқли ўлароқ, фақат актив қувватни узатиши билан бирга, реактив қувват ҳам узатилади, чунки инвертор реактив қувват оқимини тартибга солиш имкониятига эга.

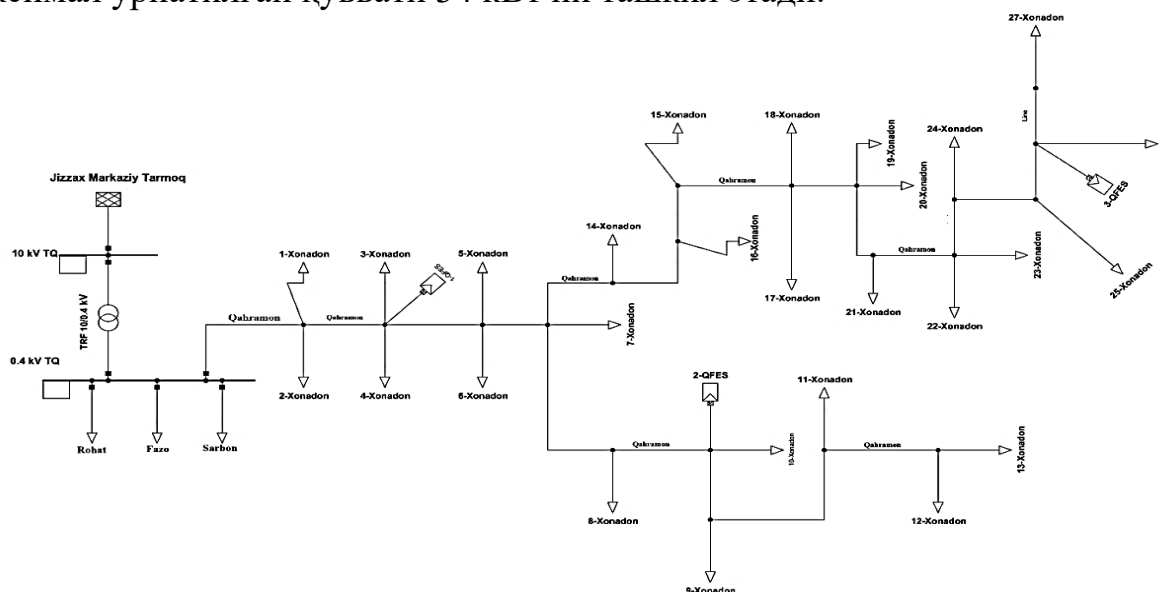
Диссертациянинг **“Қуёш панеллари уланган носимметрик юкламали тақсимлаш тармоқларини моделлаштириш”** деб номланган учинчи бобида носимметрик юкламали тақсимлаш тармоғининг ортиқча юкламасини қуёш панеллари орқали яхшилаш, инверторларнинг қувват узатиш имкониятини тармоқ кучланишининг ўзгаришига нисбатан баҳолаш ва қуёш панеллари уланган носимметрик юкламали тақсимлаш тармоғини DigSilent дастури ёрдамида моделлаштириш орқали олинган натижаларнинг таҳлиliga бағишланган.

Ушбу бўлимда конкрет объектда жойлашган трансформатор пункти орқали таъминланадиган 4 йўналишдаги тақсимлаш электр тармоқларидан биттаси таҳлил қилинган. Бу тармоқда 27 та хонадон жойлашган бўлиб, фаза кучланишининг охириги хонадонлардаги қиймати 180 В ни ташкил этади. Ушбу тармоққа учта кичик қувватли фотоэлектр станцияси интеграция қилиниб, **PowerFactory** дастурида моделлаштирилди ва кучланиш ҳамда юкланиш ҳолатлари баҳоланди.

Натижада кучланиш қийматлари энг охириги нуқталарда жойлашган истеъмолчиларда ҳам қониқарли даражада эканлиги, ҳамда тармоқнинг ортиқча юкланиши бартараф этилганлиги кузатилди. Таҳлил қилинган тармоқ реал объект ҳисобланиб, Жиззах вилояти Ш.Рашидов тумани Қаҳрамон МФЙда жойлашган. 250 кВА қувватга эга трансформатор орқали маҳалланинг Роҳат, Фазо, Сарбон ва Қаҳрамон кўчаларидаги хонадонлар электр энергияси билан таъминланади. Қаҳрамон кўчасининг тақсимлаш тармоғи эса буларнинг ичида энг кучланиши паст ва ортиқча юкланишга эга эканлиги сабабли, тадқиқот объекти сифатида қабул қилинган.

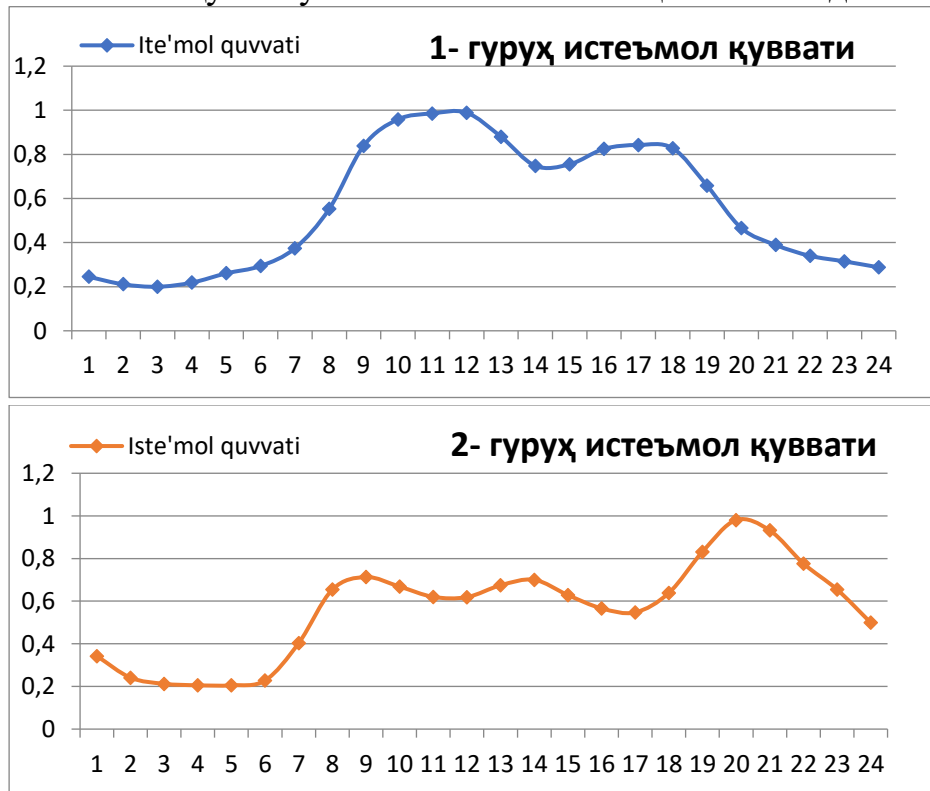
Қаҳрамон кўчасидаги тақсимловчи электр тармоғи узунлиги 0,444 км бўлиб, 8-расмда кўрсатилганидек, 27 та хонадонни электр энергияси билан таъминлайди. Ўлчовлар натижасида кўчанинг охиридаги уйларда фаза кучланиши 220 В ўрнига 180 В эканлиги аниқланди. Бу кўрсаткич электр энергияси сифат кўрсаткичлари талабига нисбатан мутлақо қониқарсиз ҳисобланади. Тармоқни моделлаштириш жараёнида 3-, 10- ва 26-хонадонларда қуёш фотоэлектрик станциялари (ҚФЭС) жойлаштирилган. ҚФЭС ларнинг

максимал ўрнатилган қуввати 34 кВт ни ташкил этади.



8-расм. Қаҳрамон кўчасидаги электр таъминоти ва тақсимлаш тармоғининг «PowerFactory» дастурида ишлаб чиқилган модели

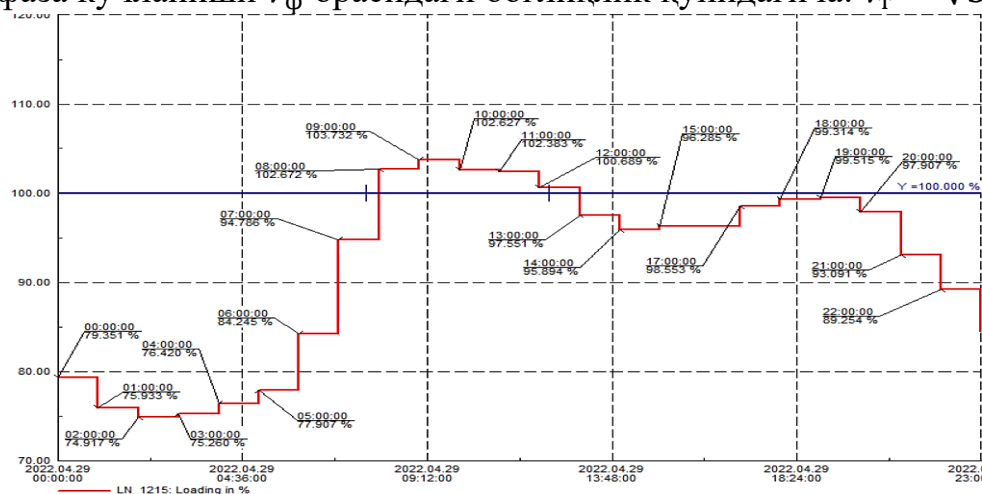
Истеъмолчиларнинг кунлик юклама профиллари икки гуруҳга бўлинади. Биринчи гуруҳ кундузги максимал қувват талаби билан тавсифланади, иккинчи гуруҳ эса тунги вақтдаги қувват талаби билан тавсифланади (9-расм). 2025 йил 17 июнда Қаҳрамон кўчасидаги тақсимловчи электр тармоғининг кунлик иш режими таҳлил қилинганда, 08:00–13:00 оралиғида ортиқча юкланиш, 18:00–20:00 оралиғида эса максимал қувват узатиш имкониятига яқин юкламада ишлаган.



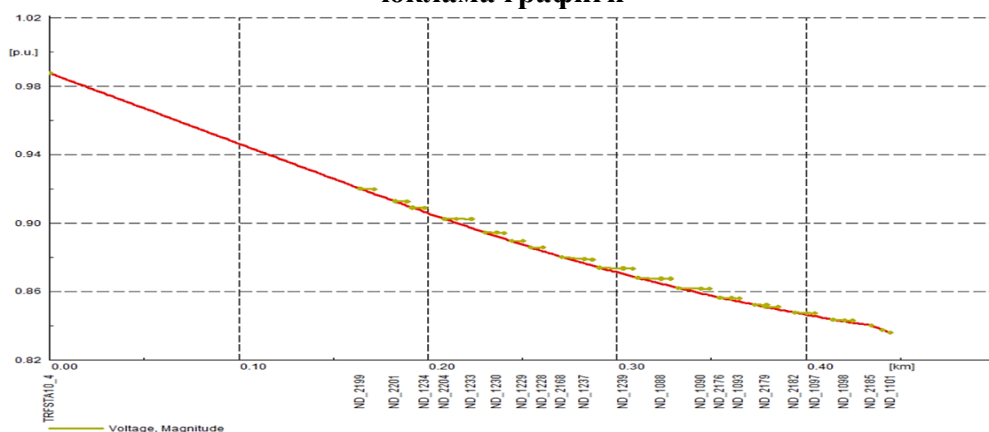
9-расм. Хонадонларда сутка давомида истеъмол қуввати коэффитсиентларининг ўзгариши

Тармоқнинг суткалик юклама графигини 10-расмда кўриш мумкин. Тақсимлаш тармоғи истеъмолчилари одатда юлдуз схемаси бўйича

уланади. Таксимлаш тармоғининг бир фазасидаги қаршилиқни R_ϕ , тармоққа уланган истеъмолчи қаршилигини R_n орқали белгиланади. Ҳар бир фаза орқали истеъмолчиларга узатиладиган токнинг кучи I га тенг. Бу ток кучи истеъмолчининг фаза ток кучи I_ϕ қиймати билан баробар. Тармоқ кучланиши V_T билан фаза кучланиши V_ϕ орасидаги боғлиқлик қўйидагича: $V_T = \sqrt{3}V_\phi$.

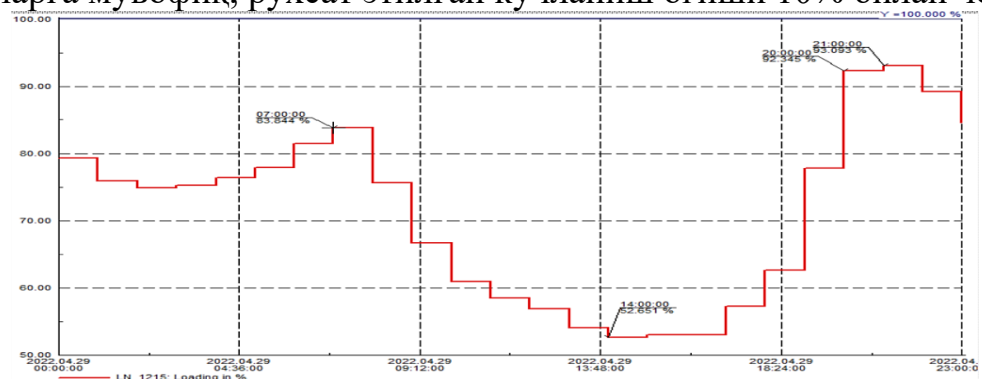


10-расм. Қахрамон кўчаси таксимлаш электр тармоғининг 17.06.2025 йилдаги суткалик юклама графиги



11-расм. Қахрамон кўчасидаги таксимлаш электр тармоғи ҳар бир истеъмолчиларидаги кучланиш тушуви

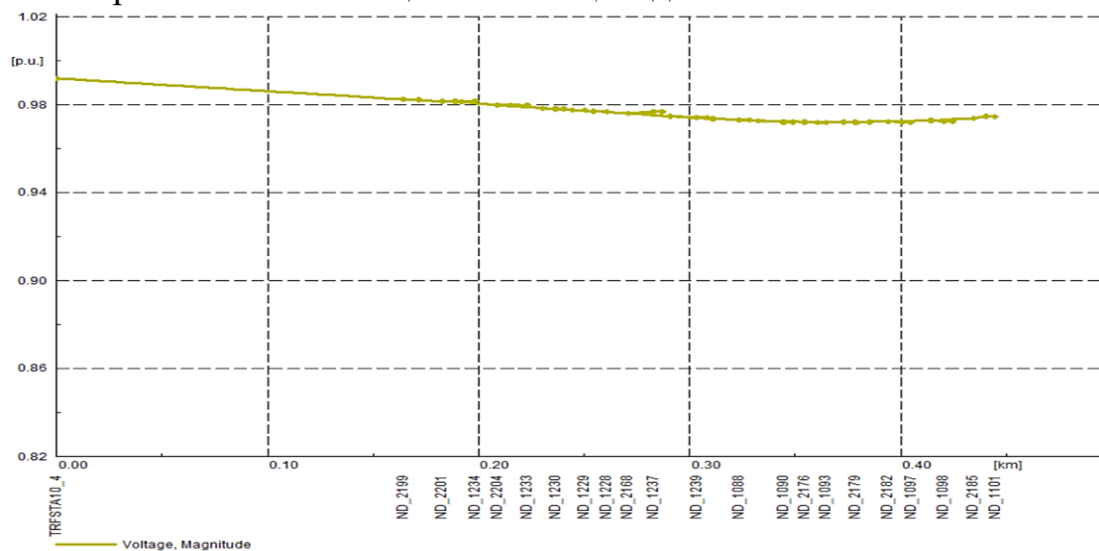
Таҳлил натижалари тармоқнинг ортиқча юкланиши 6-хонадондан бошлаб кучланишнинг рухсат этилган чегаравий қийматлардан ортиқ пасайишига олиб келишини кўрсатади. Кўчанинг охиридаги уйларда фазавий кучланиш 180 В гача пасайиб, 220 В номинал қийматдан тахминан 20% камайган. Амалдаги стандартларга мувофиқ, рухсат этилган кучланиш оғиши 10% билан чекланган.



12-расм. ҚФЭС интеграция қилинган таксимлаш электр тармоғининг суткалик юклама графиги

Танланган хонадонларда қўшимча генерация қурилмаларини жойлаштириш имконияти ўрганилиб, 3, 10 ва 26-хонадонларда мос равишда 8, 10 ва 16 кВт қувватли ҚФЭС ўрнатилди. Тақсимлаш электр тармоғи 8-расмда кўрсатилганидек, «PowerFactory» дастурида моделлаштирилди. 10-расмдаги суткалик юклама графигига кўра, соат 09:00 да тармоқ юкланиши 103,7% га етиб, ортиқча юкланиш 13:00 гача давом этган. ҚФЭС интеграциясидан сўнг минимал юкланиш соат 14:00 да 52,6% гача камайган, максимал юкланиш эса соат 21:00 да 93% ни ташкил этган. (12-расм)

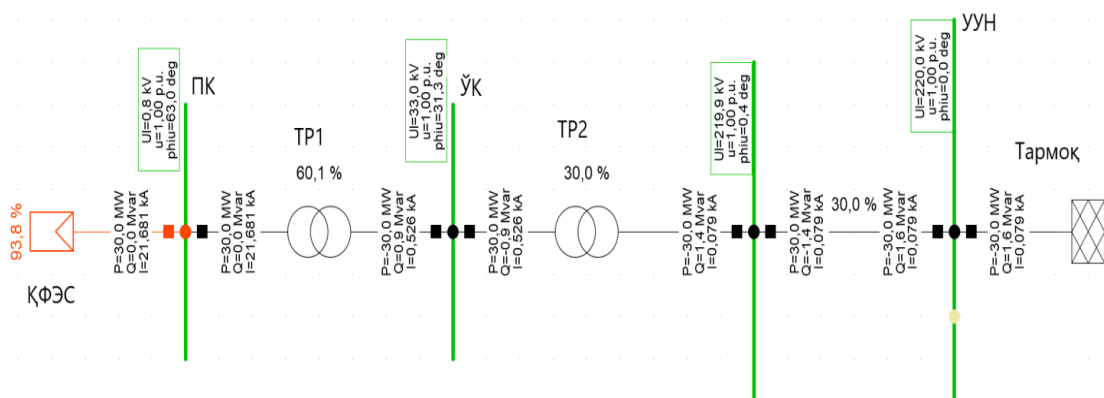
Электр энергиясининг сифат кўрсаткичларидан асосийси кучланиш тушувига эътибор қаратилганда, бу 13-расмда тасвирланган. Графикдан кўринадикки, тақсимлаш тармоғида кучланиш тушуви мавжуд, аммо бу қиймат 3% ни ҳам ташкил этмайди. Кучланиш тушуви 9-хонадонга бориб 2,6% ни ташкил этган бўлса, охириги хонадонларда 2,1% ни кўрсатмоқда. Демак, тақсимлаш тармоқларида қўшимча генерация ускуналарини ўрнатиш, хусусан қуёш фотоэлектрик станциялардан фойдаланиш нафақат истеъмолчиларни ишончли электр энергияси билан таъминлайди, балки электр энергияси сифат кўрсаткичларини яхшилашга ҳам хизмат қилади.



13-расм. Объектдаги ҚФЭС уланган тақсимлаш тармоғи ҳар бир истеъмолчисида кучланиш тушуви

Инвертор орқали ўзгармас ток DC ни ўзгарувчан ток AC га ўтказишда токнинг синусоидага яқин бўлишини максимал даражада таъминлайдиган модуляция усулидан фойдаланилган. Инвертор чиқишининг линия кучланиши ($V_{a'b'}$) инвертор киришидаги ўзгармас ток (V_{DC}) ва модуляция кўрсаткичи (M)га боғлиқлиги кенг импульс модуляцияси (PWM-pulse-width modulation)ни ифодалайди. Агар модуляция кўрсаткичи 0 ва 1 орасида бўлса, AC ни DCга нисбатан ўзгариши чизиқли кўринишга эга бўлади.

Юқорида инверторлардан юзтасига эга бўлган қуёш фотоэлектрик станциясининг DigSilent дастурида модели яратилади. Бунда станциянинг жами ишлаб чиқариш қуввати 32 МВт ни ташкил этган. Инвертор чиқишидаги 0,8кВ кучланиш кучайтирувчи трансформаторлар орқали олдин 33 кВ га сўнгга 220 кВга ўзгартирилиб, марказий электр тармоғига уланади (14-расм).



14-расм. SG350HX Инверторларга эга ҚФЭС нинг *DigSilent* дастуридаги модели

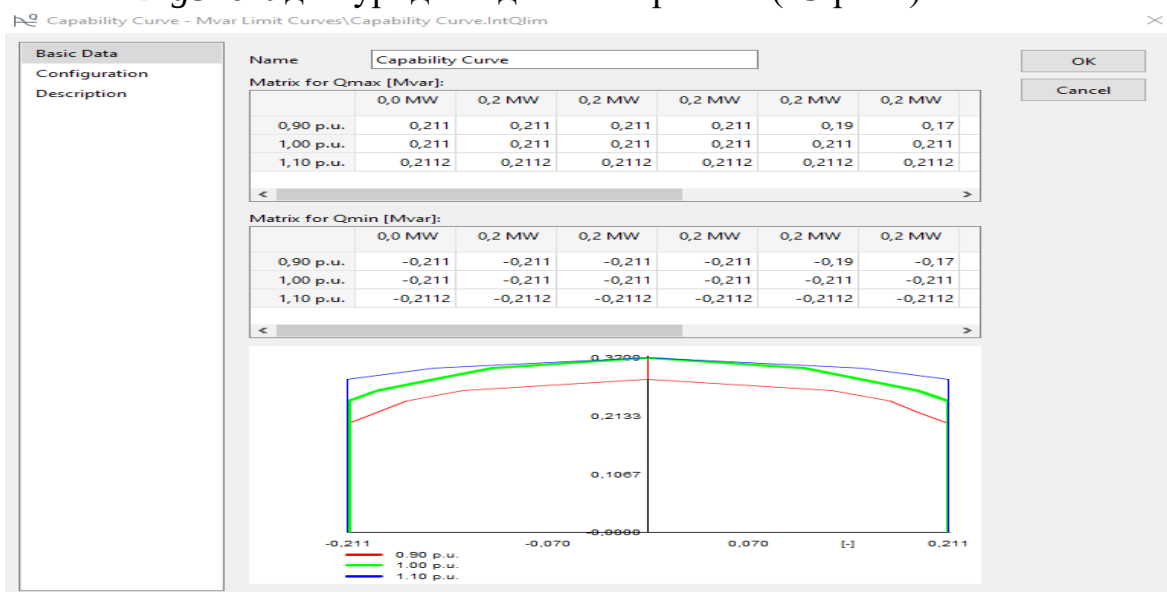
Инверторларнинг индуктив (реактив қувват истеъмол қила олиши) ёки сиғим (реактив қувват ишлаб чиқара олиши) характерга эга эканлиги ҳақидаги ишлаб чиқарувчи томонидан берилган маълумотлар 1-жадвалда келтирилган.

1-жадвал

Инверторларнинг индуктив ёки сиғим характеристикалари

P _{QFES} МВт +сиғим -Индуктив	0	0.16	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3	0.32
V _{тармоқ} бирлик										
0.9	0.211	0.211	0.211	0.211	0.19	0.17	0.13	0.	0.	0
1	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211	0.19	0.15	0.11	0
1.1	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211	0.15	0

Юқоридаги маълумотлардан фойдаланиб, инверторнинг қувват узатиш имкониятини *DigSilent* дастурида моделлаштирилган (15-расм).



15-расм. SG350HX Инверторининг *DigSilent* дастуридаги қувват узатиш имконияти

Марказий электр тармоқларига уланадиган истеъмолчилар ва ишлаб чиқарувчилар, жумладан шамол ва қуёш каби электр станцияларига реактив қувват бўйича юқори даражадаги талаблар қўйилади. Электр тармоғининг

кучланиши номинал қийматдан пастласа, инверторнинг актив қувват узата олиш имконияти ва реактив қувват узатиш ёки истеъмол қилиш имконияти сезиларли даражада пасайганлиги кузатилади. Электр тармоқ кучланиши +15%, +10%, -5% , -10% ва -20% га ўзгартирилганда, инверторнинг қувват узатиш имконияти +15% да энг паст натижани кўрсатади, ҳамда +10% да энг юқори натижага эришади.

Таксимлаш электр тармоқларига қайта тикланувчи энергия манбалари, хусусан, қуёш фотоэлектрик станцияларини интеграциялашда реактив қувват оқимларининг ўзгариши, кучланишнинг меъёрий қийматлардан оғиши ва юқори тартибли гармоникалар таъсирида актив қувват йўқотишларининг ортиши кузатилиши мумкин. Ушбу таъсирларни камайтириш мақсадида ҚФЭС инверторининг актив ва реактив қувватларини мувофиқлаштирилган бошқаришга асосланган адаптив алгоритм ишлаб чиқилди. Оптималлаштириш мезони сифатида таксимлаш электр тармоғидаги актив қувват йўқотишларини минималлаштириш қабул қилинди:

$$P_{loss} = \sum_{k=1}^L R_k I_k^2 \quad (20)$$

Оптималлаштириш мақсад функцияси:

$$F = \min P_{loss} \quad (21)$$

ҚФЭС инверторининг актив қуввати тармоқдаги юклама ҳолатига мос равишда бошқарилади. Дастлаб i - тугундаги юклама фазаси бурчаги актив ва реактив қувватлар нисбати асосида аниқланади:

$$\varphi_{L,i} = \arctan\left(\frac{Q_{L,i}}{P_{L,i}}\right) \quad (22)$$

бу ерда $P_{L,i}$ ва $Q_{L,i}$ — i - тугундаги мос равишда актив ва реактив юклама қувватлари. Инверторнинг оптимал актив қуввати юклама фазаси бурчагига боғлиқ ҳолда қуйидагича белгиланади:

$$P_{PV,i}^{opt} = P_{PV,i}^{max} \cdot \cos(\varphi_{L,i}) \quad (23)$$

бу ерда $P_{PV,i}^{max}$ — инверторнинг максимал актив қуввати, $\cos(\varphi_{L,i})$ эса юкламанинг қувват коэффициентини ифодалайди.

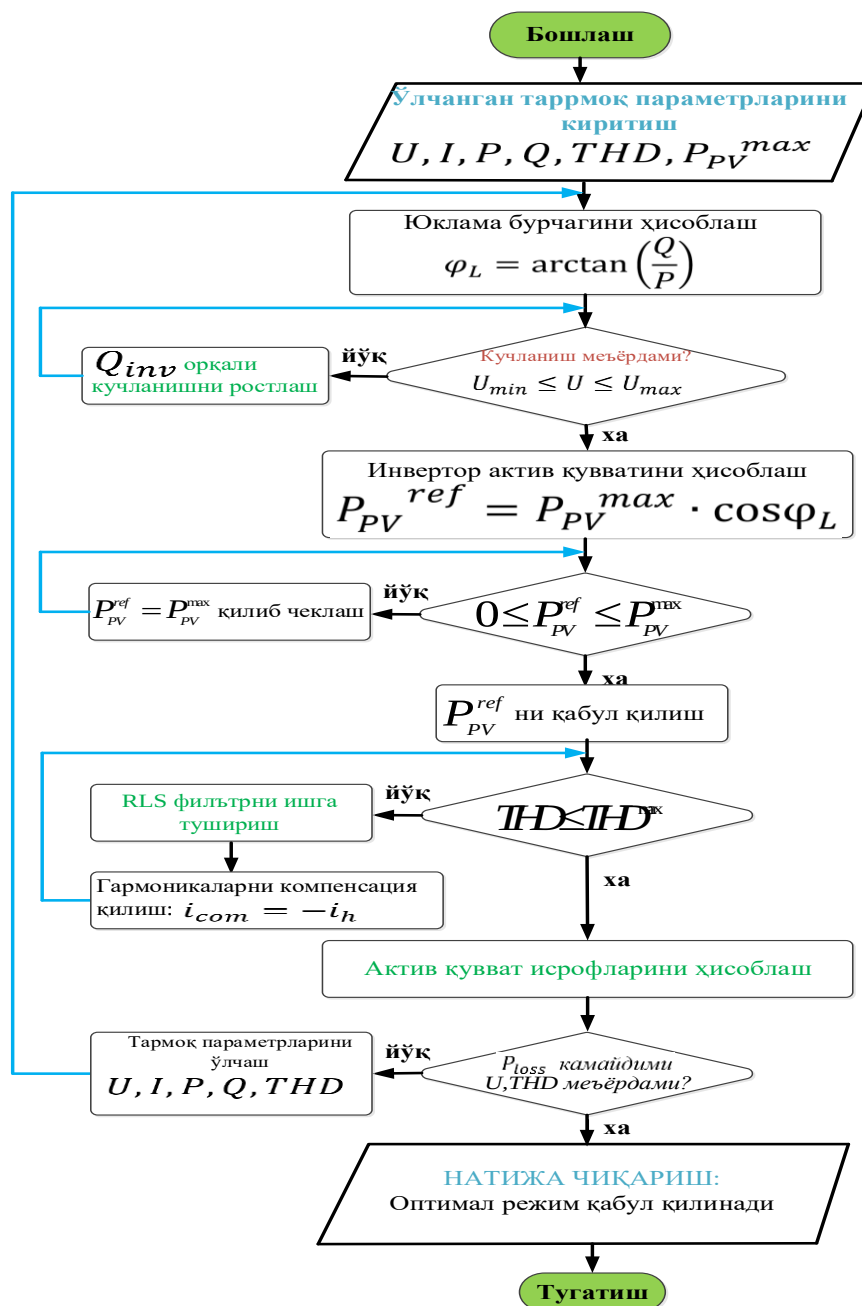
Оптимал бошқариш жараёнида инвертор қуввати тугунлардаги кучланиш ва линия тоқларига қўйиладиган техник чекловлар асосида аниқланади:

$$\begin{aligned} 0 &\leq P_{PV,i}^{opt} \leq P_{PV,i}^{max}, \\ U_{min} &\leq U_i \leq U_{max}, \\ I_k &\leq I_{k,max}. \end{aligned} \quad (24)$$

Таклиф этилган моделда ҚФЭС инверторининг актив қуввати юклама фазаси бурчаги φ_L ва қувват коэффициенти $\cos \varphi_L$ асосида адаптив бошқарилади. Натижада юклама талабига мос актив қувват узатилиб, ташқи тармоқдан истеъмол қилинадиган қувват ва линиялардаги актив қувват йўқотишлари камайтиради.

Ишлаб чиқилган математик модел асосида ҚФЭС инверторининг актив қувватини адаптив бошқариш алгоритми шакллантирилди. Алгоритмнинг структура блок-схемаси 16-расмда келтирилган. Алгоритм ишлаш жараёни тармоқ кучланиши U , ток I , актив P , реактив Q қувват ва умумий гармоник бузилиш коэффициенти THD қийматларини ўлчашдан бошланади. Олинган маълумотлар асосида юклама фазаси бурчаги аниқланиб, тармоқнинг жорий ҳолати баҳоланади. Кучланиш меъёрий ораликда бўлганда, инверторнинг актив

қуввати оптимал қиймат бўйича бошқарилади. Кучланиш меъёрий чегарадан чиққанда эса инверторнинг реактив қувватини бошқариш орқали кучланиш ростланади.



16-расм. Инверторни адаптив бошқариш алгоритми блок-схемаси

Диссертациянинг “Қуёш панеллари уланган носимметрик юкламали тақсимлаш тармоғини моделлаштириш орқали олинган натижалар ва техник- иқтисодий самарадорликни баҳолаш” деб номланган тўртинчи бобида таклиф этилган усулнинг самарадорлиги тажриба ҳисоблашлари асосида баҳоланди.

Паст кучланишли тақсимлаш электр тармоғида 250 кВА номинал қувватли трансформатор пункти ва унга уланган истеъмолчиларнинг қувват исрофлари икки босқичда таҳлил қилинди. Дастлаб мавжуд тармоқдаги, сўнгра ҚФЭС уланган ҳолатдаги қувват исрофлари аниқланиб, натижалар таққосланди. Трансформаторнинг асосий техник кўрсаткичлари 2-жадвалда келтирилган.

ТП трансформаторининг техник параметрлари

TRF 10/0.4 kV 250 kVA Трансформатор	
Номинал кучланиш кВ (ЮК/ПК)	10 / 0.4
Номинал қуввати кВА	250
Қисқа туташув токи (%)	4
Кучланишни автоматик ростлаш	ЮК ±5
КАР поғонаси %	1.25
Уланиш гуруҳи ва схемаси	YNd11

ТП трансформаторидан кабель линияси орқали жами 27 та хонадон электр энергияси билан таъминланади. Таксимлаш тармоғида қўлланилган кабель линиясининг асосий техник кўрсаткичлари 3-жадвалда келтирилган.

Таксимлаш тармоғидаги кабелнинг техник параметрлари

Кабел тури	Номинал ток кучи (ер остида) А	Номинал кучланиш В	Утказгич тури	Узунлиги (km)	R, Ω/km	X, Ω/km
НАУСВУ-3*150	268	1000	алюминий	0.444	0.0209	0.073

Тажриба давомида хонадонларнинг қувват истеъмоли 4-жадвалда келтириб ўтилган. Бунда кундузги вақтдаги 12:00 дан 2:00 гача бўлган ораликда олинди.

Хонадонларнинг қувват истеъмоли

Хонадон тартиби	Актив қувват кВт	Реактив қувват кВАР	Ўзаро масофа м
1-хонадон	7.4	2.4	78+7
2-хонадон	2.4	0.8	19+6
3-хонадон ҚФЭС	4.1	1.3	8+5
4-хонадон	1.9	0.6	17+6
5-хонадон	1.9	0.6	6
6-хонадон	5.9	1.9	22+6
7-хонадон	3.1	1	6
8-хонадон	6.3	2.1	14+6
9-хонадон	3.8	1.2	10+6
10-хонадон ҚФЭС	8	2.6	12+12
11-хонадон	3.9	1.3	12
12-хонадон	7.1	2.3	20+13
13-хонадон	10.3	3.4	13
14-хонадон	3.8	1.3	21+12
15-хонадон	5.6	1.8	12
16-хонадон	7.1	2.3	21+12
17-хонадон	5.5	1.8	12
18-хонадон	11.7	3.9	23+6
19-хонадон	11.3	3.7	6
20-хонадон	4	1.3	18+6
21-хонадон	4.1	1.3	6+7
22-хонадон	4.4	1.4	16+6
23-хонадон	5.2	1.7	6
24-хонадон	10.9	3.6	21+6
25-хонадон	6.1	2	6
26-хонадон ҚФЭС	15	4.9	20+6
27-хонадон	7.3	2.4	6
Жами	175.2	54.6	515

ТП орқали таъминланаётган 27 та хонадондан 3-, 10- ва 26-хонадонларга ўрнатилган қуёш панелларининг *PowerFactory* дастурий муҳитидаги модели ишлаб чиқилди. Мазкур хонадонлардаги қуёш фотоэлектрик қурилмаларининг ишлаб чиқариш қувватлари 5-жадвалда келтирилган.

5-жадвал

Хонадонларда ўрнатилган қуёш панелларининг умумий қуввати

Хонадон тартиби	Қувват кВт
3-хонадон	8
10-хонадон	10
26-хонадон	16

Трансформаторда йил давомида юзага келадиган реактив энергия исрофини баҳолаш учун қуйидаги математик ифодадан фойдаланилди:

$$\Delta W_{\text{тр}} = \Delta Q_{\text{ўр}} \frac{S_{\text{ю}}^2}{S_n^2} \tau + \Delta W_{\text{т}} \quad (25)$$

бу ерда ΔW — йил давомидаги энергия исрофи; S_n — трансформаторнинг номинал қуввати; $S_{\text{тр}}$ — трансформаторнинг юкланиш қуввати; $\tau = 320 \cdot 10 = 3200$ соат — қуёш панелларининг бир йил давомидаги ўртача ишлаш вақти.

Қуёш панеллари ўрнатилмаган режимда трансформатор юкланиши 116,66%, реактив қувват исрофи 13,61 кВАр ни ташкил этиб, йиллик реактив энергия исрофи:

$$\Delta W_{\text{тр}} = 13,61 \cdot 1,1666^2 \cdot 3200 = 59\,272 \text{ кВАр} \cdot \text{соат}.$$

Қуёш панеллари тармоққа уланганда трансформатор юкланиши 101,63% гача, реактив қувват исрофи 10,33 кВАр гача камайиб, йиллик реактив энергия исрофи:

$$\Delta W_{\text{тр}} = 10,33 \cdot 1,0163^2 \cdot 3200 = 34\,142 \text{ кВАр} \cdot \text{соат}$$

миқдорида аниқланди.

Шундай қилиб, 250 кВА қувватли трансформаторда қуёш панелларидан фойдаланиш натижасида йиллик реактив энергия исрофи **25 130 кВАр·соатга**, яъни тахминан **42% га камайган**.

Умумий узунлиги 444 метр бўлган тақсимлаш кабел тармоғидаги йиллик актив ва реактив энергия исрофлари ҳисобланди.

Қуёш панеллари ўрнатилишидан **олдин**:

$$\Delta W_{\text{актив}} = 17,93 \cdot 3200 = 57\,376 \text{ кВт} \cdot \text{соат},$$

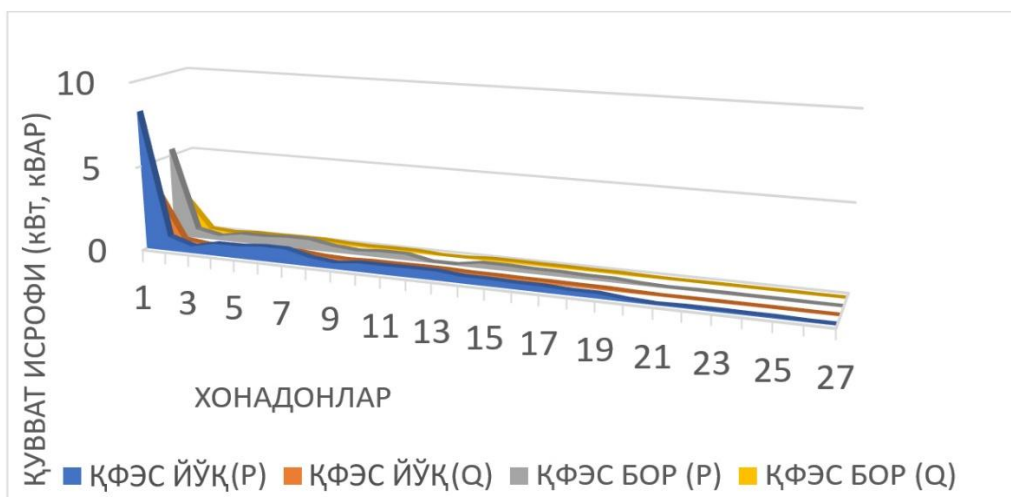
$$\Delta W_{\text{реактив}} = 6,21 \cdot 3200 = 19\,872 \text{ кВАр} \cdot \text{соат}.$$

Қуёш панеллари тармоққа уланганидан **кейин** эса:

$$\Delta W_{\text{актив}} = 11,248 \cdot 3200 = 35\,994 \text{ кВт} \cdot \text{соат},$$

$$\Delta W_{\text{реактив}} = 3,926 \cdot 3200 = 12\,563 \text{ кВАр} \cdot \text{соат}.$$

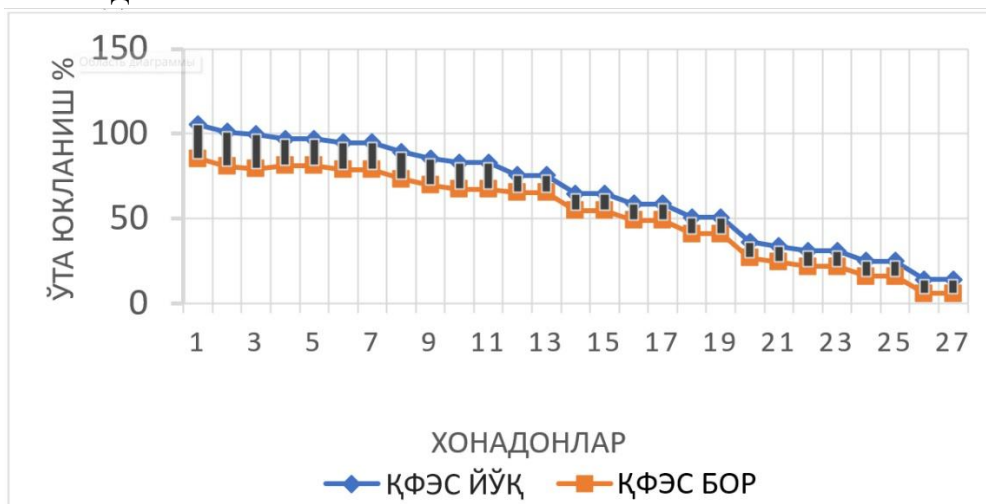
Ушбу натижалар қуёш фотоэлектрик панелларини тақсимлаш тармоғига интеграциялаш кабел линияларидаги актив ва реактив энергия исрофларини сезиларли даражада камайтиришини кўрсатади.



17-расм. Хонадонлар кесимида қувват исрофи

34 кВт қувватли қуёш панелларини эксплуатация қилиш натижасида 0,444 км узунликдаги кабелли тақсимлаш тармоғида актив қувват исрофи 21382 кВт·соат (37%), реактив қувват исрофи эса 7309 кВАр·соат (37%) ни ташкил этди. Қуёш панеллари уланиши натижасида тармоқ юкланиши 1-хонадон участкасида 105% дан 85% гача, охириги хонадонлар участкаларида 14% дан 6% гача камайди (18-расм).

Таклиф этилган қуёш панелларидан иборат станциянинг аккумуляцияловчи қисми мавжуд эмас ва электр тармоғи билан синхрон равишда ишлайди.



18-расм. Хонадонлар кесимида ўта юкланиш даражаси

Бугунги кунда (01.05.2025) Ўзбекистон шароитида 1 кВт қувватга эга қуёш фотоэлектрик станциянинг ўрнатилиши ўртача 5 млн ўзбек сўмини ташкил этади. 3-, 10- ва 26-хонадонларда умумий қуввати 34кВт бўлган қуёш панелларини ўрнатилиши учун кетадиган сарф-харажат қўйидагича аниқланади.

$$C = 5000000 * 34 = 170000000 \text{ сўм}$$

Қуёш панеллари орқали ишлаб чиқариладиган электр энергиясининг йиллик миқдори қўйидагича аниқланди.

$$P_{\text{қфэс}} = P_{\text{кунтик}} * 320 = \frac{P_{\text{max}}}{2} * 10 \text{ соат} * 320 = \frac{34 \text{ кВт}}{2} * 10 \text{ соат} * 320 = 54400 \text{ кВт} * \text{соат}$$

Йил давомидаги электр энергияси исрофи камайиши билан қуёш

панеллари орқали ишлаб чиқарилган электр энергиясининг умумий қиймати $21382+54400=75\,782$ кВт*соатни ташкил этмоқда.

Йиллик даромадни электр энергиясининг бугунги (01.05.2025) таннархи (<https://www.het.uz/oz/lists/view/2191> (01.05.2025) 600 сўм кВт соатига деб белгиланган) билан ҳисобланганда қуйидаги қиймат келиб чиқди.

$$D = (54400 \text{ кВт} * \text{соат} + 21382 \text{ кВт} * \text{соат}) * 600 \frac{\text{сўм}}{\text{кВт} * \text{соат}} \\ = 45469200 \text{ млн} \frac{\text{сўм}}{\text{йил}}$$

Қуёш панелларини ўрнатганлик учун давлат томонидан ер солиғидан 3 йил муддатгача озод қилинади, ер солиғининг (<https://old.soliq.uz/taxation/land-property-tax>) манбасида келтирилган маълумотларга асосан ўртача 1 метр квадрат учун 411.84 сўмни ташкил этади. Таклиф этилган қуёш панеллари учун жами 340 метр квадрат майдон керак бўлади. Умумий ер солиғидан тежаладиган сумма қуйидагича аниқланди.

$$T = (411,84 \text{ сўм/м}^2 * 34 * 10 \text{ м}^2) = 140025 \text{ сўм/йилига}$$

Демак 34 кВт қувватга эга қуёш панелларининг йиллик даромади қуйидагига тенг:

$$D_{\text{йиллик}} = D + T = 45469200 + 140025 = 45609225 \text{ сўм/йил}$$

Сарфланган харажатларнинг ўзини - ўзи қоплаш муддати қуйидагича аниқланади:

$$M_{\text{фойда муддати}} = \frac{C}{D_{\text{йиллик}}} = \frac{170000000 \text{ млн сўм}}{45609225 \text{ сўм/йил}} = 3.7 \text{ йил}$$

Шундай қилиб, 250 кВА қувватга эга трансформатордан узунлиги 444 метр кабел тармоғи орқали таъминладиган хонадонларда жами 34 кВт қувватга эга қуёш панеллари ўрнатилса, сарф этилган харажатлар ўзини 3,7 йилда қоплайди ва йилига 45609225 сўм фойда келтиради.

ХУЛОСА

“Қуёш панеллари уладиган носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоқларида қувват исрофини камайтириш” мавзусидаги техника фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертация иши бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижалари асосида қуйидаги хулосалар тақдим этилган:

1. Паст кучланишли тақсимлаш электр тармоқларида юкламаларнинг фазалараро нотекис уланиши сабабли, электр энергияси сифати ёмонлашуви қуёш панелларини улаш орқали бартараф қилиниши аниқланган.

2. Носимметрик тақсимлаш электр тармоқларининг ортиқча юкланиши қуёш панеллари орқали пасайтирилади, натижада қувват исрофининг кескин камайишига эришилади.

3. Қуёш панелларини носимметрик тармоққа улашда инверторлар юқори гармоника манбаи сифатида кўриб чиқилган ва юқори гармоника филтрлари орқали тармоқ хавфсизлиги таъминланади.

4. Носимметрик тақсимлаш кабел тармоғидаги электр энергия исрофи қуёш панелларининг уланиши орқали 37 % камайишига эришилган.

5. Носимметрик тақсимлаш тармоғига уланган 34 кВт қувватга эга қуёш панеллари бир йилда 45609225 сўм фойда бериши ва сарф этилган харажатларнинг 3,7 йилда қопланиши аниқланган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ
ДОКТОРА НАУК DSc.05/2025.28.11.T.02.01 ПРИ ИНСТИТУТЕ ПРОБЛЕМ
ЭНЕРГЕТИКИ АКАДЕМИИ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

ДЖИЗАКСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

СУЯРОВ АНВАР ОЛИМЖОН УГЛИ

**СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКОЙ ПРИ
ПОДКЛЮЧЕНИИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ**

05.05.01 – Энергетические системы и комплексы

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

Ташкент – 2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Академии наук Республики Узбекистан под номером B2025.2.PhD/T5681.

Диссертация выполнена в Джизакском политехническом институте.

Автореферат диссертации размещён на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) на сайте Научного совета (www.energetika.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

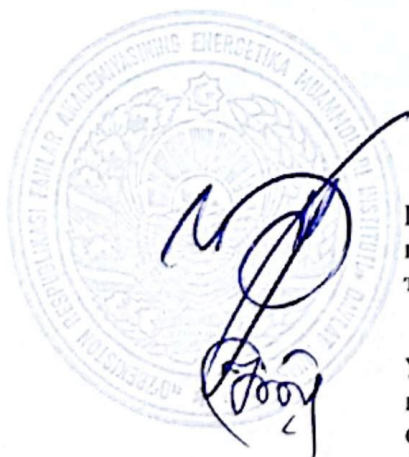
Научный руководитель:	Саттаров Хуршид Абдишукурович кандидат технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Исаков Абдусанд Жалилович доктор технических наук, профессор Эркинов Баходир Нариманович доктор философии по техническим наукам, доцент
Ведущая организация:	Совместное предприятие ООО «UzAssystem»

Защита диссертации состоится на заседании Научного совета DSc.05/2025.28.11.T.02.01 при Институте проблем энергетики АН РУз в 2026 г. «28» ОКТАБРЯ в 10⁰⁰ часов. (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 40. Тел.: (99855) 520-01-52, e-mail: energetika_in@mail.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института проблем энергетики АН РУз (зарегистрирован под номером 8). (Адрес: 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 40. Тел.: (99855) 520-01-52).

Автореферат диссертации разослан «12» ОКТАБРЯ 2026 года.

(протокол рассылки № 8 от «9» ОКТАБРЯ 2026 г.).



О.Х. Ишпазаров

Председатель научного совета по присуждению ученой степени, доктор технических наук, профессор

Ж.Н. Толипов

Ученый секретарь научного совета по присуждению учёных степеней, доктора философии (PhD) по техническим наукам, старший научный сотрудник.

Ш.В. Хамидов

Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученой степени, доктор технических наук, профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире важное значение придаётся интеграции генерирующих установок на основе возобновляемых источников энергии в распределительные электрические сети, расширению возможностей локальной генерации, а также повышению эффективности передачи и распределения электроэнергии. По результатам исследований в международной энергетической сфере отмечается, что «...увеличение доли фотоэлектрических установок в централизованных электрических сетях позволяет существенно сократить расход традиционных топливных ресурсов и обладает потенциалом экономии 450–500 млн тонн топлива в угольном эквиваленте в год»¹. Развитие распределённой солнечной генерации сопровождается изменением направления и величины потоков мощности в сетях низкого и среднего напряжения, неравномерностью загрузки по фазам и ростом технических потерь. В связи с этим особое внимание уделяется согласованию фазных потоков мощности, оптимизации режимов работы и снижению потерь активной мощности в распределительных сетях с несимметричной нагрузкой и подключёнными фотоэлектрическими установками.

В мире в условиях роста электропотребления и расширения производственных мощностей проводятся научные исследования, направленные на более широкое использование возобновляемых источников энергии, интеграцию фотоэлектрических установок в распределительные сети, оптимизацию потоков мощности и совершенствование методов снижения потерь электроэнергии. В данном направлении, в частности, при подключении фотоэлектрических станций, установленных на объектах экономики и в жилых районах, к распределительным сетям приоритетными являются исследования по оценке несимметрии нагрузки и генерации, управлению потоками мощности, снижению потерь и повышению технико-экономической эффективности режимов работы сети.

В Республике осуществляются системные меры, направленные на удовлетворение растущего спроса на электрическую энергию, повышение надёжности электроснабжения, интеграцию возобновляемых источников энергии в электрические сети, эффективное использование солнечных фотоэлектрических установок, а также снижение потерь мощности в распределительных сетях. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы определены такие приоритетные задачи, как «...обеспечение экономики бесперебойной электрической энергией, широкое внедрение технологий “зелёной экономики” в различные отрасли, повышение энергоэффективности экономики на 20 процентов...»². При реализации данных задач важное значение имеет проведение научных исследований по оптимальному подключению солнечных фотоэлектрических станций к

¹ <https://policy.asiapacificenergy.org/destination=policies>

² Указ Президента Республики Узбекистан от 28.01.2022 г. № УП-60 «Стратегия развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы» <https://lex.uz/uz/docs/-5841063>

распределительным сетям, совершенствованию режимов их работы и оценке технико-экономической эффективности.

Настоящее диссертационное исследование в определённой степени служит реализации задач, предусмотренных Указом Президента Республики Узбекистан от 9 сентября 2022 года № УП-220 «О дополнительных мерах по внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии малой мощности», постановлением Президента Республики Узбекистан от 2 декабря 2022 года № ПП-436 «О мерах по повышению эффективности реформ, направленных на переход Республики Узбекистан к “зелёной” экономике до 2030 года», постановлением Президента Республики Узбекистан от 22 августа 2019 года № ПП-4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии», а также другими нормативно-правовыми актами, регулирующими данную сферу.

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

Степень изученности проблемы. При подключении солнечных фотоэлектрических станций к централизованным электрическим сетям низкого напряжения научные исследования, направленные на учёт параметров сети, снижение негативного влияния фотоэлектрических установок на режимы работы электрической сети и совершенствование методов их эффективной интеграции, проводятся во многих ведущих научно-исследовательских центрах и высших учебных заведениях мира, в том числе в Аризонском государственном университете, Стэнфордском университете (США), Ольборгском университете, Техническом университете Дании (Дания), Имперском колледже Лондона (Великобритания), Федеральной политехнической школе Лозанны (Швейцария), Национальном техническом университете Афин (Греция), Университете Лейкхед (Канада), Национальном исследовательском технологическом университете «МИСИС» (Россия), Институте проблем энергетики Академии наук Республики Узбекистан, Физико-техническом институте, Национальном научно-исследовательском институте возобновляемых источников энергии, Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова и других научных и образовательных учреждениях.

К настоящему времени вопросы расчёта и минимизации потерь электроэнергии, исследования режимов работы распределительных электрических сетей, интеграции возобновляемых и распределённых источников генерации в электрические сети, а также оценки их влияния на параметры сети широко исследованы известными зарубежными учёными и ведущими специалистами, в том числе Gopiya Naik, J.A. García, M. Abedini, B.G. Saneyev, M.H. Moradi, R.S. Rao, S. Shriram, A.V. Pazderin, Y.M. Atwa,

E.F. El-Saadany, M.A. Salama, R. Seethapathy, M.E. Baran, F.F. Wu, T. Ackermann, G. Andersson, L. Söder, N.M. Pindoriya, K.A. Joshi и другими.

Значительный вклад в исследование вопросов повышения устойчивости и надёжности электроэнергетических систем, обеспечения показателей качества электроэнергии, интеграции солнечных фотоэлектрических станций в централизованные электрические сети, определения их технических, экономических и экологических показателей, а также оценки энергетического потенциала внесли узбекские учёные Р.А. Захидов, Т.Х. Носиров, Х.М. Муратов, У.А. Таджиев, Н.А. Матчанов, М. Мухаммадиев, Д.Б. Кодиров, О. Бозоров, А.И. Тураев и другие, которыми получены весомые научные результаты.

Несмотря на достигнутые в данной области значительные научные результаты, вопросы снижения потерь мощности в распределительных сетях при параллельной работе солнечных фотоэлектрических станций с централизованной электрической сетью, а также оценки влияния источников распределённой генерации на режимы работы сети, пофазную загрузку и относительные потери электроэнергии изучены недостаточно. В настоящей диссертационной работе комплексно рассмотрены вопросы минимизации потерь мощности и электроэнергии в распределительных электрических сетях с подключёнными солнечными фотоэлектрическими станциями, улучшения показателей качества электроэнергии, оптимизации режимов работы сети и повышения энергоэффективности, а также предложены соответствующие методы и решения по их реализации.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательских планов Джизакского политехнического института по проекту №101128871 – ERASMUS EDU-2023-CBHE DEBSEUz «Разработка целевой образовательной программы для бакалавров по солнечной энергетике в Узбекистане».

Цель исследования заключается в снижении потерь мощности за счёт оптимизации режимов работы распределительных электрических сетей с несимметричной нагрузкой и подключёнными солнечными фотоэлектрическими станциями.

Задачи исследования:

исследовать показатели качества электрической энергии в распределительных электрических сетях с несимметричной нагрузкой и оценить их влияние на режимы работы сети;

разработать математическую модель, описывающую потоки мощности между солнечными фотоэлектрическими установками и распределительной электрической сетью с несимметричной нагрузкой;

разработать алгоритм снижения несимметрии нагрузки в распределительных электрических сетях на основе использования солнечных фотоэлектрических установок;

усовершенствовать метод повышения эффективности управления мощностью солнечных фотоэлектрических установок, интегрированных в распределительную электрическую сеть с несимметричной нагрузкой;

обосновать технико-экономическую эффективность распределительных электрических сетей с несимметричной нагрузкой, интегрированных с солнечными фотоэлектрическими установками.

Объектом исследования являются несимметрично распределённые потребители в системе низковольтного электроснабжения, а также солнечные панели, подключённые к электрическим сетям, и установленные в них инверторы.

Предметом исследования является разработка методов использования солнечных панелей и управления потоками мощности с учётом параметров распределительных электрических сетей с несимметричной нагрузкой.

Методы исследования. В процессе исследования использованы методы математической статистики и теории вероятностей, метод Ньютона–Рафсона, а также методы математического анализа.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

усовершенствован метод повышения эффективности передачи активной мощности инвертором фотоэлектрической станции, подключённой к распределительной электрической сети с несимметричной нагрузкой, в зависимости от изменения угла нагрузки;

обоснована возможность поддержания высших гармонических составляющих тока, передаваемого инвертором солнечной фотоэлектрической станции в электрическую сеть, в пределах установленных норм;

усовершенствован метод автоматического регулирования выходного напряжения инвертора на основе компенсации отклонений напряжения в точке общего присоединения электрической сети и солнечной фотоэлектрической станции;

разработан алгоритм адаптивного управления инвертором в распределительных электрических сетях с несимметричной нагрузкой и подключёнными солнечными фотоэлектрическими станциями с учётом изменений параметров нагрузки и электрической сети.

Практические результаты исследования:

устранение межфазной несимметрии в распределительных электрических сетях за счёт подключения солнечных панелей;

снижение уровня высших гармоник в точке общего присоединения распределительных электрических сетей с несимметричной нагрузкой и солнечных панелей.

Достоверность результатов исследования подтверждается:

применением современных метрологически аттестованных измерительных приборов и программных средств, а также согласованностью теоретических и экспериментальных результатов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость определяется достижением повышения эффективности при подключении солнечных панелей к распределительным электрическим сетям с

несимметричной нагрузкой и разработкой математической модели потоков мощности. Практическая значимость заключается в разработке метода использования солнечных панелей в распределительных электрических сетях с несимметричной нагрузкой. Применение разработанного метода позволяет повысить эффективность электрической сети на 16%.

Внедрение результатов исследования. На основе научных результатов, полученных по снижению потерь мощности за счёт использования солнечных фотоэлектрических станций в распределительных электрических сетях с несимметричной нагрузкой:

разработанный метод определения потерь мощности в низковольтных распределительных электрических сетях с несимметричной нагрузкой и подключёнными солнечными фотоэлектрическими станциями с учётом загрузки трансформатора и присоединённых к нему потребителей внедрён в распределительных электрических сетях Джизакского территориального филиала АО «Региональные электрические сети» (справка АО «Региональные электрические сети» от 13 февраля 2026 года №01-02-59/253). В результате обеспечена возможность определения оптимальных параметров установки солнечных фотоэлектрических станций общей мощностью 34 кВт в сети потребителей, электроснабжение которых осуществляется от трансформатора мощностью 250 кВА по кабельной линии протяжённостью 444 метра;

научно-практические результаты, разработанные для оценки технико-экономической эффективности использования солнечных фотоэлектрических станций в распределительных электрических сетях с несимметричной нагрузкой, внедрены в Джизакском территориальном филиале АО «Региональные электрические сети» (справка АО «Региональные электрические сети» от 13 февраля 2026 года №01-02-59/253). В результате установлено, что срок окупаемости затрат на установку солнечных фотоэлектрических станций общей мощностью 34 кВт составляет 3,7 года, а годовой экономический эффект достигает 45 609 225 сумов.

Апробация результатов исследования. Результаты исследования апробированы на 10 научно-практических конференциях и семинарах, в том числе на 5 международных (из них 3 конференции, индексируемые в базе данных Scopus) и 5 республиканских конференциях.

Опубликованность результатов исследований. По теме диссертации опубликовано всего 16 научных работ, из них 6 статей – в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных результатов диссертаций (2 – в зарубежных и 4 – в отечественных журналах), а также получено 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной литературы, включающего 68 наименований. Общий объём основного текста составляет 111 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и необходимость выбранной темы,

описаны цели и задачи, объект и предмет исследования, их соответствие приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, изложены научная новизна и практические результаты исследований, освещена научная и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения о внедрении результатов исследования в практику, опубликованных научных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации под названием **«Состояние распределительных электрических сетей с несимметричной нагрузкой, к которым подключены солнечные панели. Цель и задачи исследования»** рассмотрены роль и необходимость развития солнечных фотоэлектрических станций в энергетике Республики Узбекистан, состояние распределительных сетей с несимметричной нагрузкой и перспективы их стабилизации.

Вместе с тем в данной главе проведены исследования характеристик потребителей, подключённых к распределительным сетям с несимметричной нагрузкой, анализа показателей качества электрической энергии в таких сетях при подключении солнечных панелей, а также возможностей генерации электрической энергии солнечными панелями в указанных условиях. На основе проведённого анализа сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, направленные на снижение потерь мощности в распределительных электрических сетях с несимметричной нагрузкой при подключении солнечных панелей.

Во второй главе диссертации под названием **«Определение влияния солнечных панелей на распределительные сети с несимметричной нагрузкой»** исследовано влияние солнечных панелей, подключённых к таким сетям, на напряжение, влияние ёмкости конденсаторов солнечных панелей, подключённых к сети, а также методы повышения качества электрической энергии в распределительных сетях с несимметричной нагрузкой. Полученные результаты проанализированы.

Для рассмотрения системы управления инвертором используются три основных блока: управление током, синхронизация с сетью и управление напряжением постоянного тока. На рис. 1 представлена блок-схема системы управления. Система управления напряжением применяется для поддержания постоянного напряжения на требуемом уровне, тогда как система управления током обеспечивает поддержание тока на заданных значениях и используется для управления мощностью, передаваемой в сеть.

Регулирование активной и реактивной мощности однофазных инверторов напряжения не может быть реализовано путём преобразования в d-q системе координат. В связи с этим предложено формирование тока в блоке синхронизации с сетью, обеспечивающем управление активной и реактивной мощностью.

При использовании упрощённой матричной модели достигается снижение объёма вычислительных операций, связанных с воспроизведением всех составляющих сетевого напряжения. После определения реактивных составляющих становится возможным управление реактивной мощностью.

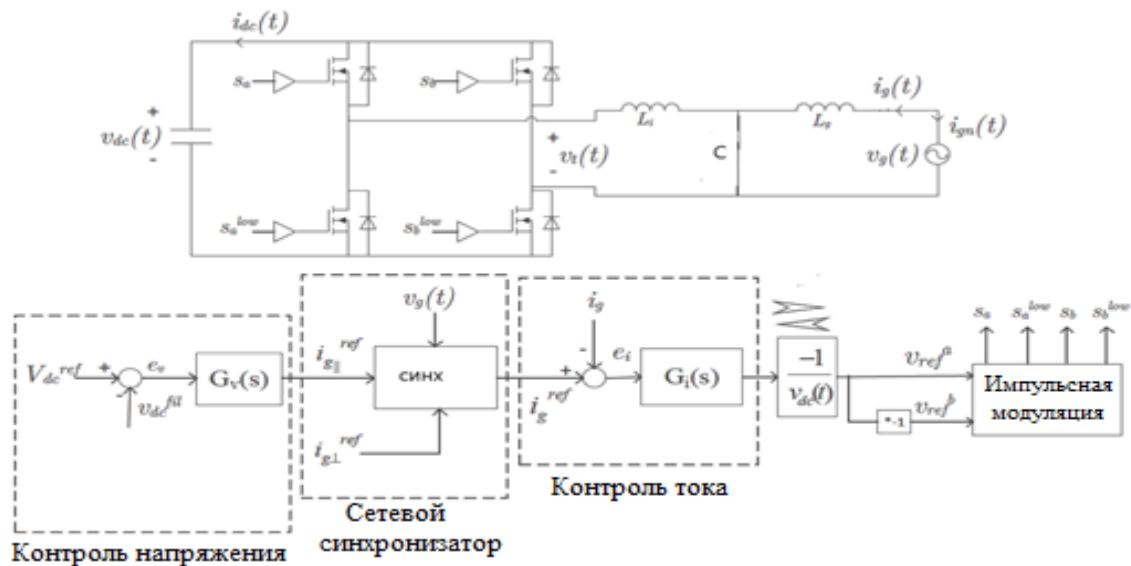


Рис. 1. Общая структура управления инвертором

Оценщик сетевого напряжения и идентификатор амплитуды являются двумя основными компонентами синхронизатора сетевого напряжения. На рис. 2 представлена блок-схема синхронизатора сети.



Рис. 2. Синхронизатор электрической сети и управление реактивной мощностью

Блок оценки напряжения сети использует в качестве входного сигнала напряжение электрической сети и на его основе формирует два взаимосвязанных сигнала. Первый сигнал представляет собой синфазную компоненту, совпадающую по фазе с напряжением сети, а второй — ортогональную компоненту, сдвинутую относительно него по фазе на 90° . Математическая модель данного блока оценки представлена в виде следующего пространственного состояния:

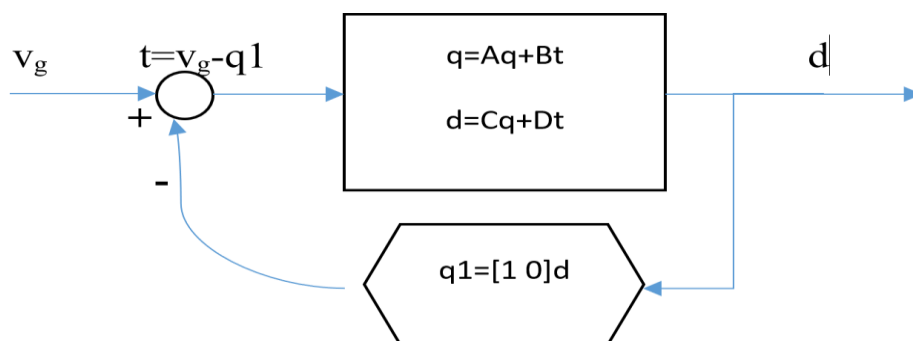


Рис. 3. Блок обратной связи для оценки напряжения сети

$$\begin{pmatrix} q1 \\ q2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -\omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} q1 \\ q2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} k_{sinx} \\ 0 \end{bmatrix} (v_g - q_1) \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} v_g \\ v_t \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} d1 \\ d2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} q1 \\ q2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

В приведённой выше блок-схеме обратной связи входной сигнал представлен в виде $v_g - q_1$. Где q_1 представляет параллельную составляющую общего сигнала. Как видно из рисунка 3, сигнал q_1 служит для соответствующей коррекции значения напряжения v_g .

В результате работы блока обратной связи формируется сигнал v_g который изменяется по синусоидальному закону с частотой, соответствующей частоте электрической сети. В приведённой матрице, матрица A описывает состояние напряжения сети на фундаментальной частоте ω_0 .

Где коэффициент k_{sinx} служит для выделения составляющей напряжения электрической сети, соответствующей фундаментальной частоте ω_0 , а посредством сигнала q_1 напряжение v_g согласуется с параметрами сети. Важной особенностью сигнала q_1 является его нечувствительность к гармоническим составляющим высших порядков в напряжении сети.

Рассматриваемая система функционирует относительно номинального напряжения и номинальной частоты электрической сети. Однако в реальных условиях напряжение и частота сети подвержены постоянным изменениям. Эти изменения отражаются в следующем выражении:

$$\Delta V = \frac{V_N - V_T}{V_N} * 100\% \quad (3)$$

где V_N (В) – номинальное напряжение распределительной электрической сети, V_T (В) – фактическое значение напряжения распределительной электрической сети.

Частота распределительной электрической сети сравнивается с её номинальным значением и выражается следующим образом:

$$\Delta f = f_N - f_{Nq} \quad (4)$$

где Δf - отклонение частоты сети, f_N – номинальное значение частоты (50 Гц), f_T – текущее значение частоты сети.

Инверторы с прямоугольной формой выходного сигнала и с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) относятся к наиболее эффективным типам однофазных инверторов. Наиболее простым способом преобразования постоянного тока в переменный является использование прямоугольного сигнала, однако из-за низкой частоты переключения возникают трудности при перемагничивании магнитопровода трансформатора.

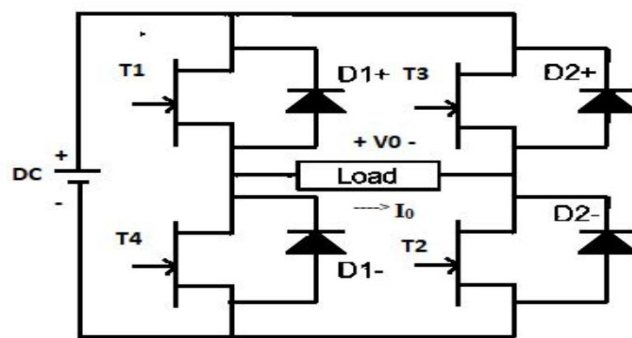


Рис. 4. Однофазный полумостовой инвертор

Схема работы однофазного полумостового инвертора представлена на рис.4.

Графики изменения напряжения и тока для данного типа инвертора приведены на рис.5.

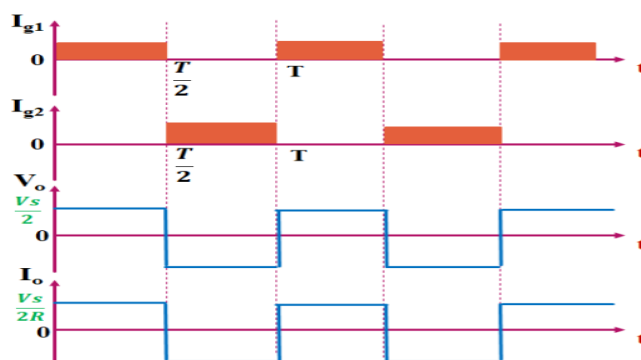


Рис. 5. Изменение напряжения и тока однофазного инвертора

Для формирования переменного тока прямоугольной формы ключи (обозначенные от D1 до D4) управляются с использованием техники коммутации прямоугольного сигнала. Используя управляющий сигнал с коэффициентом заполнения 50%, подаваемый на ключи D1 и D4, достигается формирование переменного тока. Для ключей D2 и D3 применяется инвертированная версия того же сигнала. В соответствии с данной стратегией коммутации, даже при отключении D2 и D3 обеспечивается работа D1 и D4. Как показано на рис. 5, в результате формируется сигнал прямоугольной формы.

Преимуществом использования полумостового инвертора является то, что для управления четырьмя транзисторами требуется лишь один простой управляющий сигнал.

Инвертор, подключённый к распределительной электрической сети, как показано на рис. 5, формирует значения переменного напряжения, близкие по амплитуде. Для преобразования полученного сигнала в синусоидальную форму необходимо ограничение напряжения постоянного тока на требуемом уровне. С этой целью в инверторах используются ёмкостные конденсаторы постоянного тока.

Конденсатор постоянного тока играет важную роль в обеспечении баланса между входной и выходной мощностью инвертора. Размер (ёмкость) конденсаторов определяется на основе следующих выражений.

Напряжение и ток в электрической сети обозначаются следующим образом:

$$u_g(t) = U_g \cos(\omega_g t) \quad (5)$$

$$i_g(t) = I_g \cos(\omega_g t - \varphi) \quad (6)$$

На основании приведённых выше выражений определено мгновенное значение мощности на выходе инвертора и установлено, что оно состоит из постоянной и переменной составляющих:

$$P_{\text{выход}}(t) = S \cos \varphi + S \cos(2\omega_g t - \varphi) \quad (7)$$

Где S — полная мощность на выходе инвертора. Переменная составляющая мощности вызывает пульсации тока на входе инвертора с удвоенной частотой:

$$i_{DC-AC}^k = \frac{S}{U_{DC}^k} \cos(2\omega_g t - \varphi) = I_{DC-AC} \cos(2\omega_g t - \varphi) \quad (8)$$

Ёмкость конденсатора, расположенного в звене постоянного тока, определяется через амплитуду пульсаций напряжения U_{DC-AC}^{mak} о следующим образом:

$$C_{DC} = \frac{I_{DC-AC}}{2\omega_g U_{DC}^k U_{DC-AC}^{mak}} \quad (9)$$

В эксперименте ёмкость конденсатора для инвертора типа SG350NH составляет:

$$C_{DC} = \frac{2.8 \text{ кВА}}{2 * 380 \frac{\text{Вад}}{\text{сек}} * 380 \text{ В} * 800 \text{ В}} = 201.6 \text{ мФ} \quad (10)$$

Согласно полученному результату, был выбран конденсатор ёмкостью 230 мФ типа Cornell Dubilier с ресурсом работы 200 000 часов при температуре 50°C.

Срок службы конденсатора определяется следующим выражением:

$$D_{\text{период работы}} = D_{\text{период работы}}(0) * 2^{\frac{T_0 - T_s}{\Delta T}} \quad (11)$$

где $D_{\text{период работы}}$ — срок службы ёмкостного конденсатора, $D_{\text{период работы}}(0)$ — номинальный срок службы конденсатора при максимальной внешней температуре (это значение указывается в паспортных данных устройства), T_s — фактическая температура окружающей среды, ΔT — повышение температуры окружающей среды, влияющее на сокращение срока службы устройства в два раза (это значение также приводится в паспортных данных устройства). Обычно $D_{\text{период работы}}(0)$ для ёмкостного конденсатора с напряжением выше 380 В при температуре 85°C составляет от 4 до 7 тысяч часов, или от 9 до 18 месяцев.

Как отмечалось выше, солнечные электростанции рассматриваются как источники высших гармоник. В процессе преобразования постоянного тока в переменный генерируются колебания как низкой, так и высокой частоты. Основная гармоника составляет 50 Гц, тогда как инверторные транзисторы могут генерировать высокочастотные гармоники вплоть до 500–600-го порядка.

Согласно стандарту IEEE-1547 (Institute of Electrical and Electronics Engineers), любые гармоники тока с порядком выше 35-го не должны превышать 0,3% от номинального тока, а общий коэффициент гармонических

искажений (THD) должен находиться в пределах 2–5%. Оригинальная таблица нормирования гармоник IEEE-1547 приведена в приложении А. Если минимальные гармоники данного инвертора снижены до уровня 0,3%, значение THD может быть легко удержано на уровне около 5%.

Таким образом, основным принципом проектирования выходного фильтра инвертора является ограничение гармонического тока до уровня менее 0,3% от номинального значения. При этом проектирование выходного фильтра не учитывает гармонические искажения напряжения сети, поскольку в соответствии со стандартом IEEE-1547 гармонические токи должны быть независимы от гармонических искажений напряжения, присутствующих в энергосистеме.

Для предотвращения передачи высших гармоник в электрическую сеть применяются различные типы LCL-фильтров. В инверторе типа SG350NH используется фильтр, эквивалентная схема которого представлена на рис. 6.

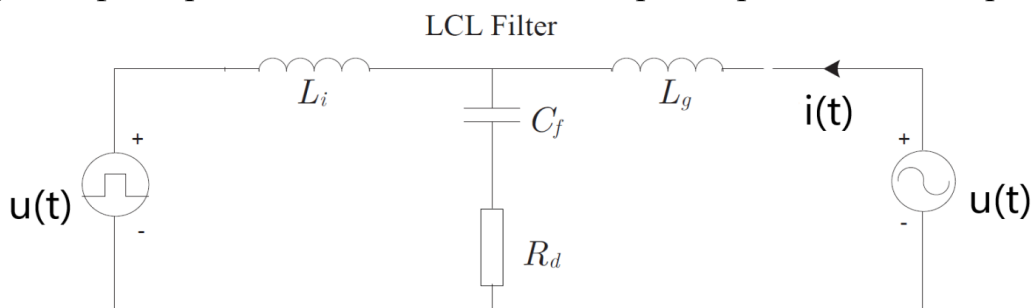


Рис. 6. Подключение LCL-фильтра к выходу инвертора и электрической сети

На рис. 6 представлен LCL-фильтр третьего порядка, применяемый для достижения вышеуказанной цели снижения гармоник. На основе выбора параметров фильтра и практического использования цифрового контроллера была выбрана частота коммутации 30 кГц.

Выходное напряжение полного моста $u(t)$, состоящее из основной компоненты и высших гармонических составляющих, является терминальным (выходным) напряжением. Для определения тока сети в области Лапласа с использованием принципа суперпозиции получены следующие передаточные функции:

$$\frac{I_t(k)}{U_i(k)} = \frac{-kC_f R_d - 1}{k^3 L_i L_g C_f + k^2 (L_i + L_g) R_d C_f + k(L_i + L_g)} \quad (12)$$

$$\frac{I_t(k)}{U_t(k)} = \frac{1 + k^2 C_f L_i + k R_d C_f}{k^3 L_i L_g C_f + k^2 (L_i + L_g) R_d C_f + k(L_i + L_g)} \quad (13)$$

Из приведённых выше выражений видно, что ток сети $i_t(t)$ непосредственно зависит от напряжения в точке общего присоединения $u_i(t)u_i(t)u_i(t)$ и напряжения электрической сети $u_t(t)$.

Как отмечалось ранее, поскольку стандарт IEEE-1547 (Institute of Electrical and Electronics Engineers) допускает наличие гармонических искажений тока, возникающих вследствие искажений напряжения сети, при проектировании выходного фильтра это не учитывается. В связи с этим при расчёте выходного фильтра уравнение (12) не принимается во внимание.

Ток сети $i_t(t)$ может подвергаться значительным частотным искажениям под воздействием напряжения $u_t(t)$, содержащего как основную компоненту, так и высокочастотные составляющие, присутствующие в терминальном напряжении. Поэтому уравнение (15) принимается в качестве передаточной функции выходного фильтра и имеет следующий вид:

$$F_f(k) = \frac{I_t(k)}{U_i(k)} = \frac{kC_f R_d + 1}{k^3 L_i L_g C_f + k^2 (L_i + L_g) R_d C_f + k(L_i + L_g)} \quad (14)$$

Среднеквадратическое значение напряжения высших гармоник определяется по следующей формуле:

$$|U_i(jh\omega_t)| = \frac{1}{\sqrt{2}} * 2 * \frac{(U_{Ao})_h * U_{ds}^n}{\frac{1}{2U_{ds}^n} * 2} = \frac{1}{\sqrt{2}} * k(h) * U_{ds}^n \quad (15)$$

где напряжение постоянного тока принято равным U_{ds}^n , а $(U_{Ao})_h$ – амплитудное значение напряжения каждой высшей гармоники. В соответствии с полной мостовой конфигурацией коэффициент высшей гармоники определяется как $k(h) = \frac{(U_{Ao})_h}{\frac{1}{2U_{ds}^n} * 2}$, что характеризует порядок высшей гармоники.

Используя выражения (17) и (18), ток высших гармоник определяется следующим образом:

$$|I_i(jh\omega_t)| = \frac{1}{\sqrt{2}} * |F_f(jh\omega_t)| * k(h) * U_{ds}^n \quad (16)$$

где значение тока высшей гармоники $|I_i(jh\omega_t)|$ не должно превышать 0,3% от номинального тока, протекающего через инвертор.

Также рассмотрена система управления током, влияющая на уровень высших гармоник, генерируемых инвертором. Объединяя выражения (15) и (16), получаем следующее соотношение:

$$I_t(k) = F_f(k) \left(\frac{k^2 L_i C_f + k C_f R_d + 1}{k C_f R_d + 1} * U_t - U_i \right) \quad (17)$$

Где

$$F_f(k) = \frac{k C_f R_d + 1}{k^3 L_i L_g C_f + k^2 (L_i + L_g) R_d C_f + k(L_i + L_g)} \quad (18)$$

Упрощая выражение (20), получаем:

$$I_t(k) = F_f(k) (U_t - U_i) \quad (19)$$

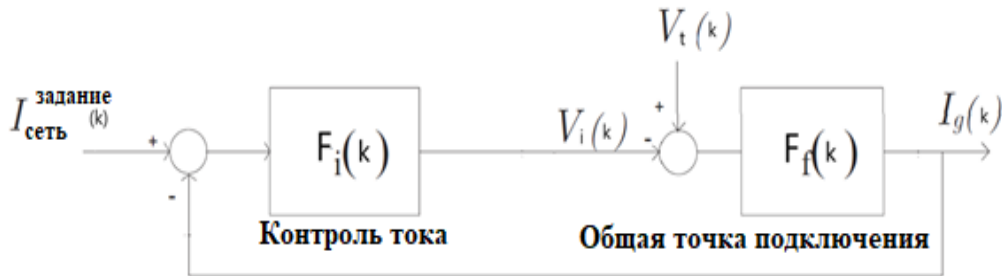


Рис.7. Схема работы системы управления током

Взаимосвязь изменения тока, передаваемого через инвертор, и изменения тока в электрической сети представлена на рис.7. Инвертор непрерывно адаптируется к изменениям тока в электрической сети.

Предложенный метод синхронизации с электрической сетью обладает двумя основными преимуществами. В отличие от традиционного метода

однофазной синхронизации, представленного в приложении, предложенный синхронизатор не только воспроизводит фильтрованный сигнал, совпадающий по фазе с напряжением сети, но и учитывает составляющие компоненты сетевого напряжения.

Это обеспечивает возможность более эффективного использования инвертора для генерации реактивной мощности. В отличие от стандартных инверторов, применяемых в солнечных панелях, которые передают только активную мощность, предлагаемый инвертор способен также генерировать и регулировать реактивную мощность, поскольку обладает функцией управления потоками реактивной мощности.

В третьей главе диссертации под названием **«Моделирование распределительных электрических сетей с несимметричной нагрузкой при подключении солнечных панелей»** рассматриваются вопросы снижения перегрузки распределительных сетей с несимметричной нагрузкой за счёт использования солнечных панелей, оценки возможностей передачи мощности инверторов в зависимости от изменения напряжения сети, а также анализа результатов моделирования распределительных сетей с использованием программного комплекса DigSilent PowerFactory.

В данном разделе проанализирована одна из четырёх линий распределительной электрической сети, питаемых от конкретного трансформаторного пункта. В рассматриваемой сети расположено 27 домохозяйств, при этом значение фазного напряжения в крайних точках сети составляет 180 В. В данную сеть были интегрированы три фотоэлектрические станции малой мощности, которые были смоделированы в программном обеспечении PowerFactory, после чего были оценены уровни напряжения и режимы нагрузки. В результате установлено, что значения напряжения у потребителей, расположенных в наиболее удалённых точках сети, достигли допустимого уровня, а перегрузка сети была устранена.

Анализируемая сеть является реальным объектом и расположена в махалле Кахрамон Ш. Рашидовского района Джизакской области. Электроснабжение домов, расположенных на улицах Рохат, Фазо, Сарбон и Кахрамона данного села, осуществляется через трансформатор мощностью 250 кВА. Распределительная сеть улицы Кахрамона, ввиду наименьшего уровня напряжения и наличия перегрузки по сравнению с другими, была принята в качестве объекта исследования. Протяжённость распределительной электрической сети на улице Кахрамона составляет 0,444 км. Как показано на рисунке 8, данная сеть обеспечивает электроснабжение 27 жилых домов. В результате проведённых измерений было установлено, что в домах, расположенных в конце улицы, фазное напряжение составляет 180 В вместо нормативных 220 В. Данный показатель является абсолютно неудовлетворительным с точки зрения требований к качеству электрической энергии. В процессе моделирования сети в домах №3, №10, и №26 были размещены солнечные фотоэлектрические станции (ФЭС). Максимальная установленная мощность ФЭС составляет 34 кВт.

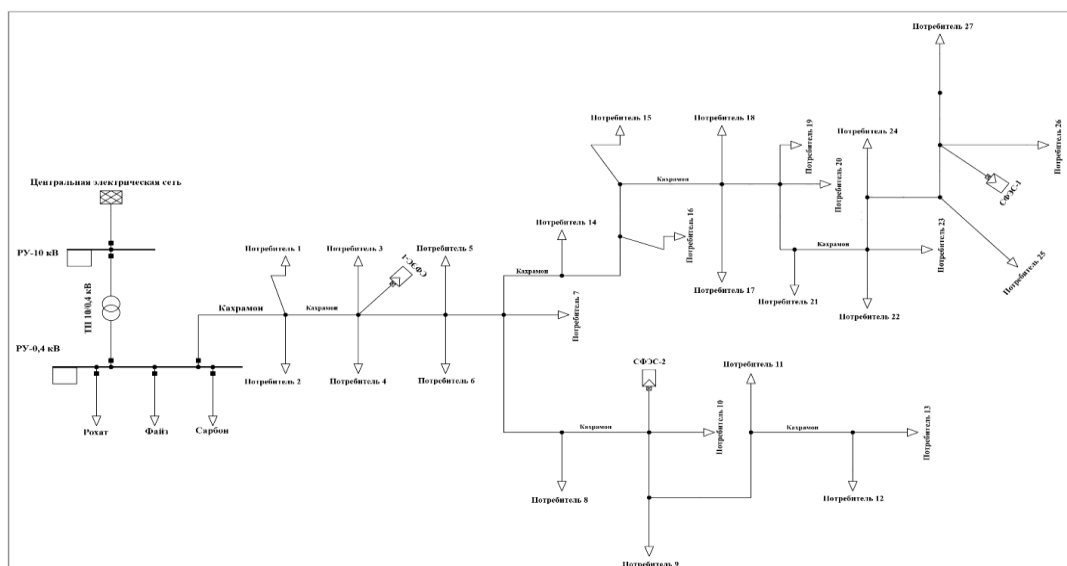


Рис. 8. Модель сети электроснабжения и распределения электроэнергии на улице Кахрамона, разработанная в программном обеспечении «PowerFactory»

Суточные профили нагрузки потребителей подразделяются на две группы. Первая группа характеризуется максимальным потреблением мощности в дневное время, а вторая группа — потреблением мощности в ночное время (рис. 9). При анализе суточного режима работы распределительной электрической сети на улице Кахрамона 17 июня 2025 года было установлено, что в период с 08:00 до 13:00 сеть работала с перегрузкой, а в период с 18:00 до 20:00 — с нагрузкой, близкой к предельно допустимой мощности передачи.

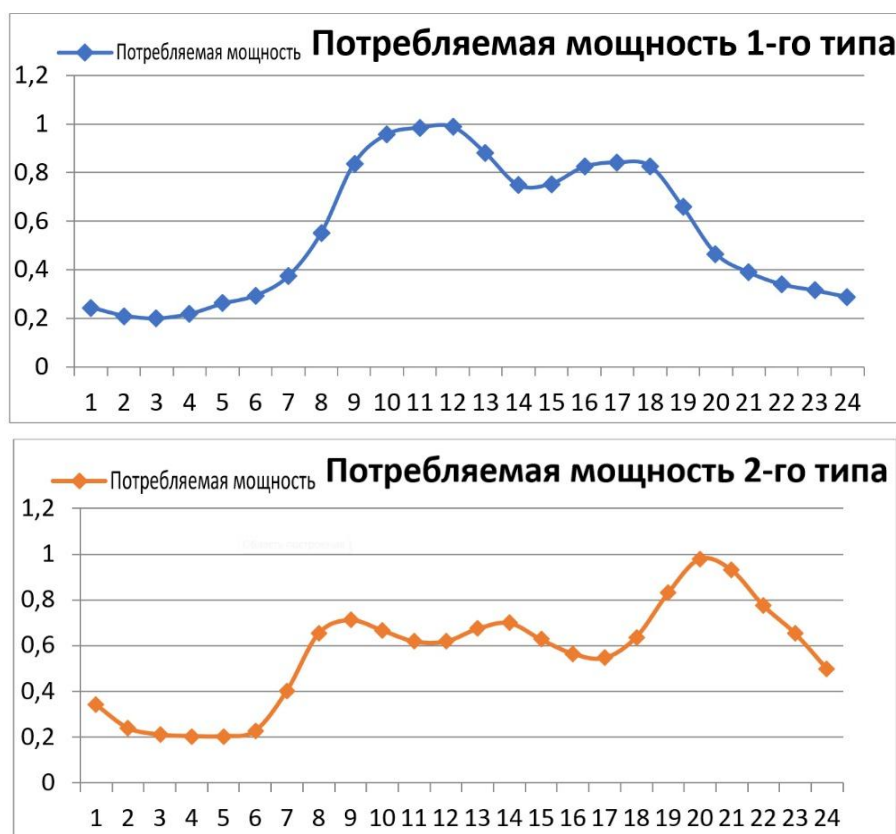


Рис. 9. Изменение коэффициентов потребляемой мощности в жилых домах в течение суток

Суточный график нагрузки сети представлен на рис. 10. Потребители распределительной сети, как правило, подключаются по звёздной схеме. Сопротивление одной фазы распределительной сети обозначается как R_ϕ , а сопротивление подключённого потребителя – как R_H . Ток, протекающий по каждой фазе и подаваемый потребителям, обозначается как I , при этом он равен фазному току потребителя I_ϕ . Связь между линейным напряжением сети V_T и фазным напряжением V_ϕ определяется следующим образом: $V_T = \sqrt{3}V_\phi$.

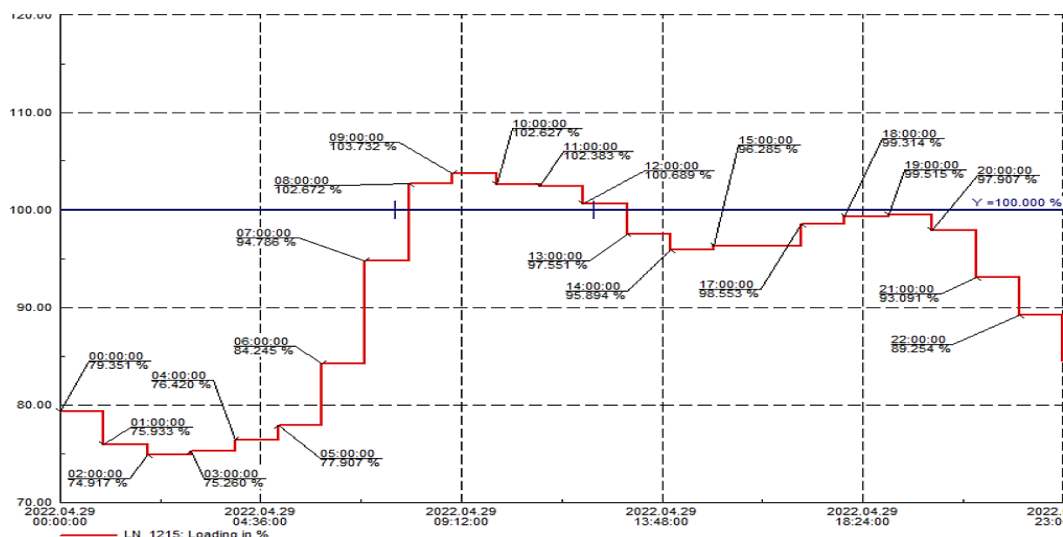


Рис. 10. Суточный график нагрузки распределительной электрической сети на улице Кахрамона за 17.06.2025 г.

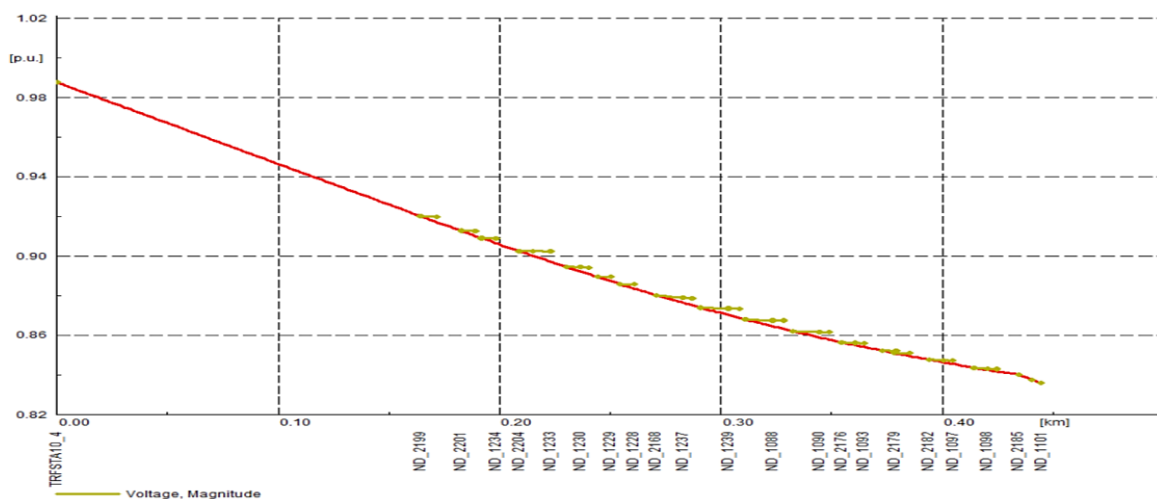


Рис. 11. Падение напряжения у каждого потребителя распределительной электрической сети на улице Кахрамона

Результаты анализа показывают, что перегрузка сети приводит к снижению напряжения ниже допустимых предельных значений, начиная с 6-го жилого дома. В домах, расположенных в конце улицы, фазное напряжение снижается до 180 В, что примерно на 20% ниже номинального значения 220 В. В соответствии с действующими стандартами допустимое отклонение напряжения ограничивается значением 10%.

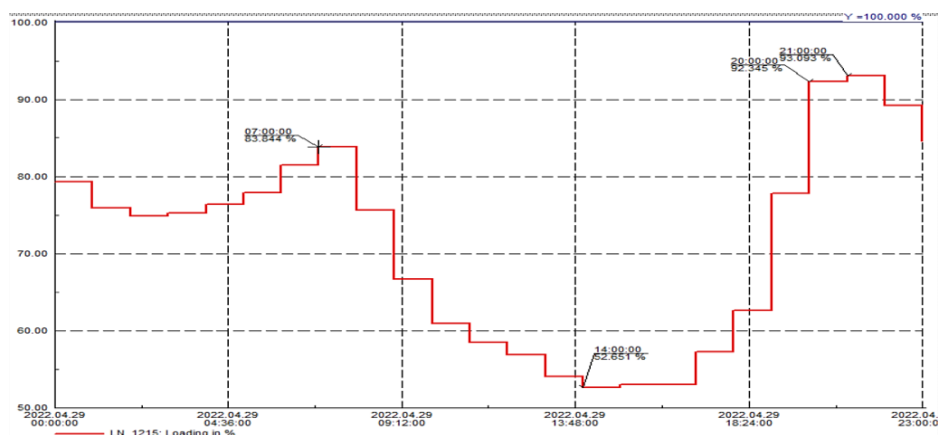


Рис. 12. Суточный график нагрузки распределительной электрической сети с интегрированной фотоэлектрической солнечной электростанцией

Была изучена возможность размещения дополнительных генерирующих установок в выбранных жилых домах, в результате чего в домах № 3, 10 и 26 были установлены фотоэлектрические солнечные электростанции (ФЭС) мощностью соответственно 8, 10 и 16 кВт. Распределительная электрическая сеть, как показано на рисунке 8, была смоделирована в программном обеспечении «PowerFactory». Согласно суточному графику нагрузки, представленному на рисунке 10, в 09:00 нагрузка сети достигала 103,7 %, а перегрузка продолжалась до 13:00. После интеграции ФЭС минимальная нагрузка снизилась до 52,6 % в 14:00, тогда как максимальная нагрузка составила 93 % в 21:00 (рис.12).

Одним из основных показателей качества электрической энергии является падение напряжения, которое представлено на рис. 13. Из графика видно, что в распределительной сети наблюдается снижение напряжения, однако его величина не превышает 3%.

Падение напряжения достигает 2,6% у 9-го домохозяйства, а в конечных точках сети составляет около 2,1%. Таким образом, установка дополнительных источников генерации в распределительных сетях, в частности использование солнечных фотоэлектрических станций, не только обеспечивает потребителей надёжным электроснабжением, но и способствует улучшению показателей качества электрической энергии.

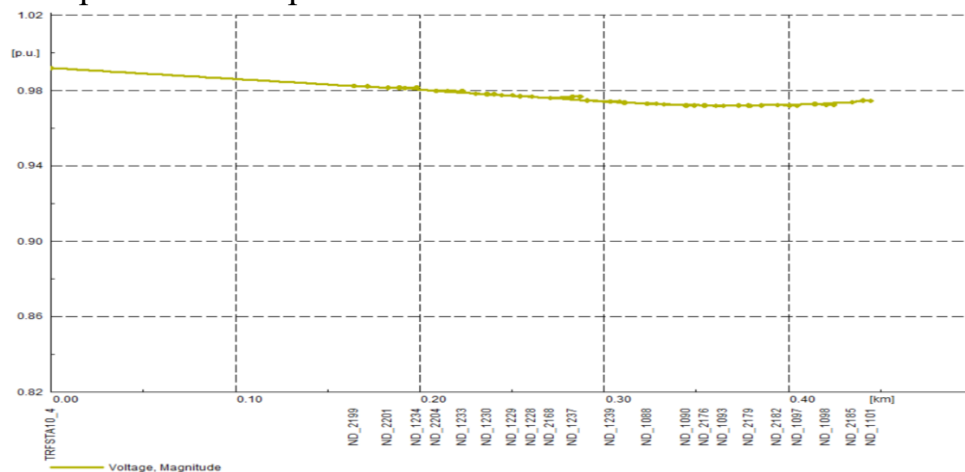


Рис. 13. Падение напряжения у каждого потребителя распределительной сети объекта с подключёнными ФЭС

При преобразовании постоянного тока (DC) в переменный ток (AC) с помощью инвертора используется метод модуляции, обеспечивающий максимальное приближение формы тока к синусоидальной. Линейное напряжение на выходе инвертора ($V_{a'b'}$) зависит от напряжения постоянного тока на входе (V_{DC}) и коэффициента модуляции M , что описывается широтно-импульсной модуляцией (PWM – Pulse Width Modulation).

Если коэффициент модуляции находится в пределах от 0 до 1, зависимость выходного напряжения переменного тока от входного напряжения постоянного тока носит линейный характер.

На основе изложенного в программной среде DigSilent создана модель солнечной фотоэлектрической станции, включающей 100 инверторов. Общая установленная мощность станции составляет 32 МВт. Выходное напряжение инверторов 0,8 кВ посредством повышающих трансформаторов сначала преобразуется до 33 кВ, а затем до 220 кВ, после чего станция подключается к централизованной электрической сети (рис. 14).

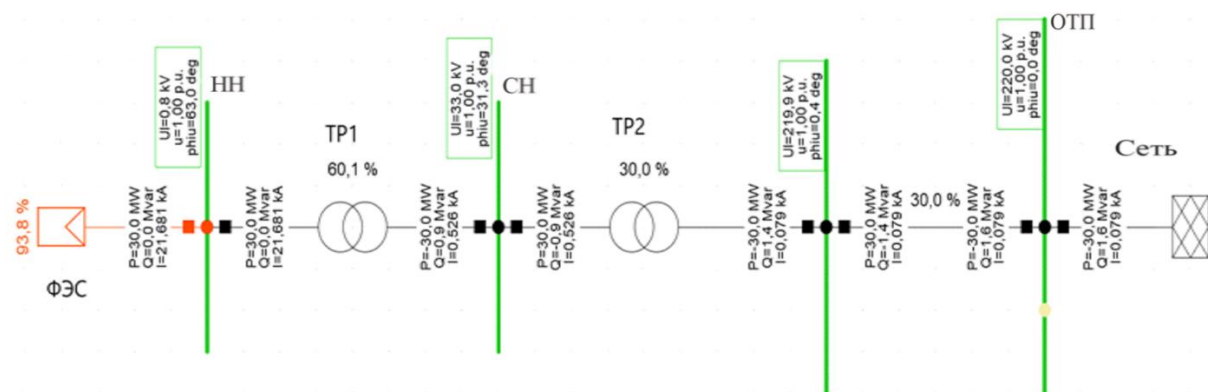


Рис. 14. Модель солнечной фотоэлектрической станции с инверторами SG350HX в программном комплексе DigSilent

Данные, предоставленные производителем о том, что инверторы обладают индуктивным (способность потреблять реактивную мощность) или ёмкостным (способность генерировать реактивную мощность) характером, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Индуктивные или ёмкостные характеристики инверторов

P_{QFES} МВт + ёмкостная – индуктивная	0	0.16	0.18	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3	0.32
$V_{с\grave{e}т\grave{ь}}$ ед.	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$
0.9	0.211	0.211	0.211	0.211	0.19	0.17	0.13	0.	0.	0
1	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211	0.19	0.15	0.11	0
1.1	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211	0.15	0

На основе приведённых выше данных возможность передачи мощности инвертора была смоделирована в программном комплексе DigSilent (рис. 15).

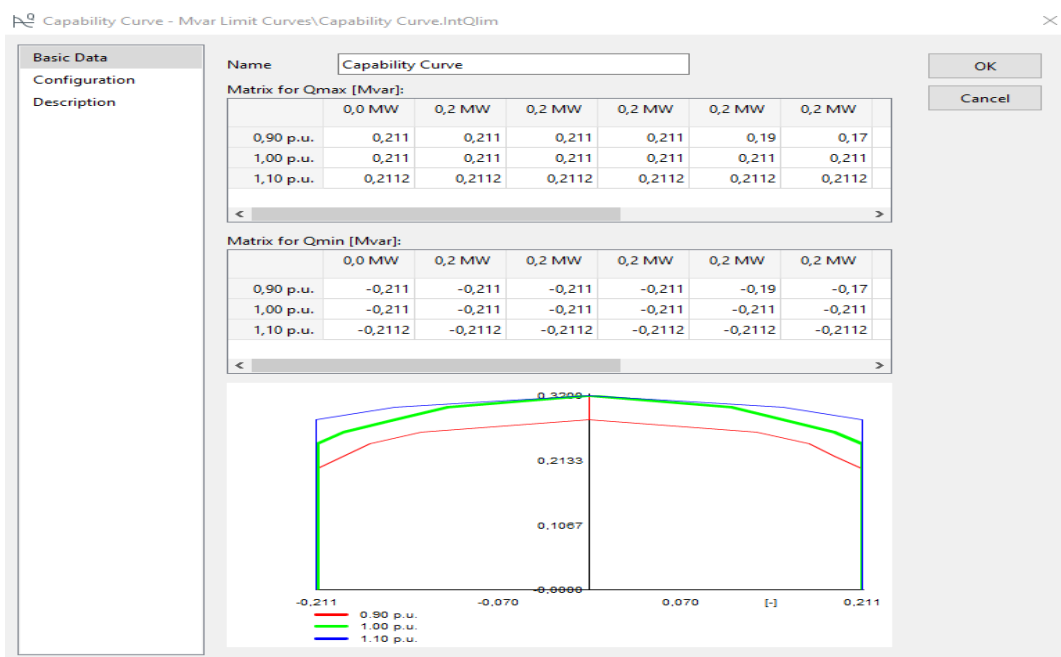


Рис. 15. Возможности передачи мощности инвертора SG350HX в программном комплексе DigSilent

К потребителям и производителям электроэнергии, подключаемым к централизованным электрическим сетям, включая ветровые и солнечные электростанции, предъявляются высокие требования по реактивной мощности. Установлено, что при снижении напряжения сети ниже номинального значения существенно уменьшаются как возможности передачи активной мощности инвертора, так и его способность генерировать или потреблять реактивную мощность.

При изменении напряжения сети на +15%, +10%, -5%, -10% и -20% было выявлено, что минимальные значения передаваемой мощности наблюдаются при отклонении +15%, тогда как максимальные — при +10%.

При интеграции возобновляемых источников энергии, в частности солнечных фотоэлектрических станций, в распределительные электрические сети может наблюдаться изменение потоков реактивной мощности, отклонение напряжения от нормативных значений, а также увеличение потерь активной мощности под воздействием высших гармоник. Для снижения указанных воздействий был разработан адаптивный алгоритм, основанный на согласованном управлении активной и реактивной мощностью инвертора ФЭС. В качестве критерия оптимизации принято минимизировать потери активной мощности в распределительной электрической сети:

$$P_{loss} = \sum_{k=1}^L R_k I_k^2 \quad (20)$$

Целевая функция оптимизации:

$$F = \min P_{loss} \quad (21)$$

Активная мощность инвертора ФЭС регулируется в соответствии с режимом нагрузки в сети. На начальном этапе фазовый угол нагрузки в i -м узле определяется на основе соотношения активной и реактивной мощностей:

$$\varphi_{L,i} = \arctan\left(\frac{Q_{L,i}}{P_{L,i}}\right) \quad (22)$$

Где $P_{L,i}$ и $Q_{L,i}$ — соответственно активная и реактивная мощности нагрузки в i -м узле. Оптимальная активная мощность инвертора определяется в зависимости от фазового угла нагрузки следующим образом:

$$P_{PV,i}^{opt} = P_{PV,i}^{max} \cdot \cos(\varphi_{L,i}) \quad (23)$$

Где $P_{PV,i}^{max}$ — максимальная активная мощность инвертора, а $\cos(\varphi_{L,i})$ коэффициент мощности нагрузки.

В процессе оптимального управления мощность инвертора определяется на основе технических ограничений, установленных для напряжений в узлах и токов в линиях:

$$\begin{aligned} 0 \leq P_{PV,i}^{opt} \leq P_{PV,i}^{max}, \\ U_{min} \leq U_i \leq U_{max}, \\ I_k \leq I_{k,max}. \end{aligned} \quad (24)$$

В предложенной модели активная мощность инвертора ФЭС адаптивно регулируется на основе фазового угла нагрузки φ_L и коэффициента мощности $\cos \varphi_L$. В результате активная мощность передаётся в соответствии с потребностью нагрузки, а мощность, потребляемая из внешней сети, и активные потери мощности в линиях снижаются.

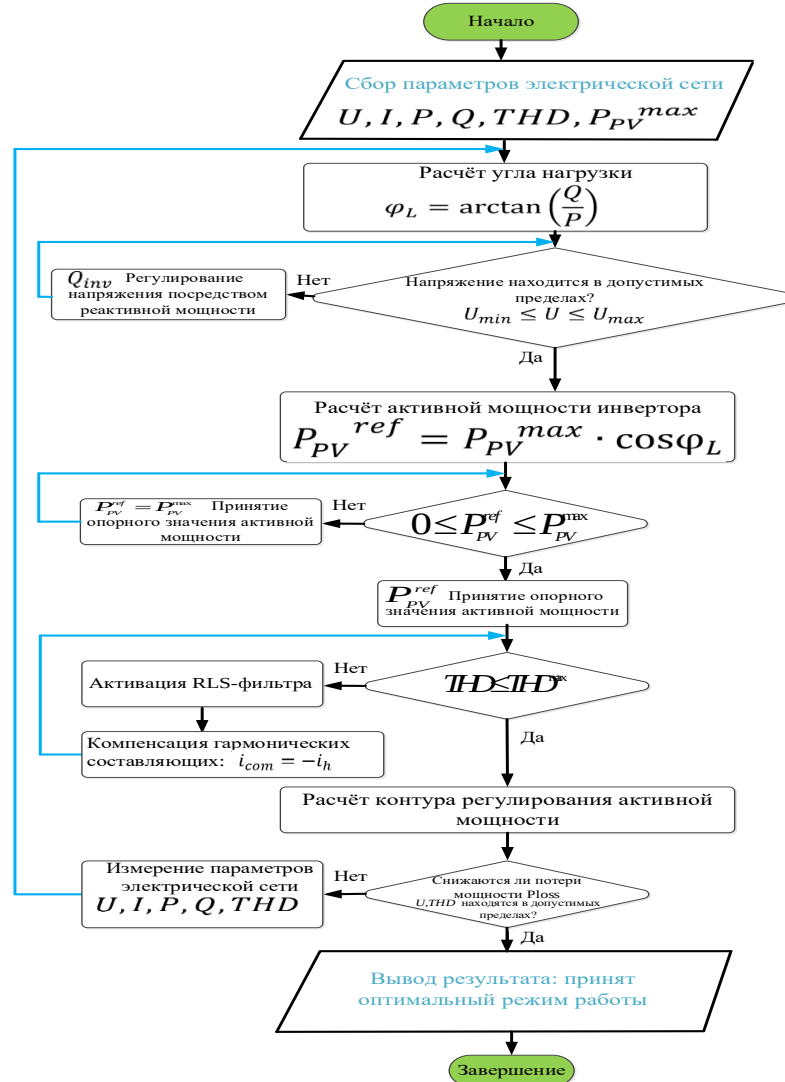


Рис. 16. Блок-схема алгоритма адаптивного управления инвертором

Разработан алгоритм адаптивного управления активной мощностью инвертора ФЭС на основе сформированной математической модели. Блок-схема структуры алгоритма приведена на (рис.16). Алгоритм начинается с измерения напряжения сети U , тока I , активной мощности P , реактивной мощности Q и коэффициента гармонических искажений THD. На основе полученных данных определяется фазовый угол нагрузки, оценивается текущее состояние сети. Если напряжение находится в допустимом диапазоне, инвертор управляется по оптимальному значению активной мощности. При выходе напряжения за измерительные пределы напряжение стабилизируется посредством управления реактивной мощностью инвертора.

В четвёртой главе диссертации под названием «Оценка результатов моделирования распределительных сетей с несимметричной нагрузкой при подключении солнечных панелей и их технико-экономической эффективности» эффективность предложенного метода оценена на основе экспериментально-расчётных данных.

В распределительной электрической сети низкого напряжения потери мощности трансформаторного пункта номинальной мощностью 250 кВА и подключённых к нему потребителей были проанализированы в два этапа. На первом этапе были определены потери мощности в существующей сети, а на втором — при подключении ФЭС, после чего полученные результаты были сопоставлены. Основные технические характеристики трансформатора приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Технические параметры трансформатора ТП	
TRF 10/0.4 kV 250 кВА Трансформатор	
Номинальное напряжение, кВ (ВН/НН)	10 / 0.4
Номинальная мощность, кВА	250
Ток короткого замыкания (%)	4
Автоматическое регулирование напряжения	ВН ± 5
Шаг РПН (%)	1.25
Группа и схема соединения	YNd11

От трансформаторного пункта по кабельной линии электроэнергией обеспечиваются в общей сложности 27 домохозяйств. Основные технические характеристики кабельной линии, используемой в распределительной сети, приведены в таблице 3.

Таблице 3.

Технические параметры кабеля распределительной сети

Тип кабеля	Номинальный ток (в земле), А	Номинальное напряжение, В	Тип проводника	Длина, км	R, Ω/km	X, Ω/km
NAUCW Y-3*150	268	1000	алюминий	0.444	0.0209	0.073

В ходе эксперимента потребление мощности домами приведено в таблице 4. При этом данные были получены за промежуток времени дневного периода с 12:00 до 14:00.

Таблица 4.

Потребление мощности домов			
Порядковый номер дома	Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, кВАр	Расстояние между домами, м
1-дом	7.4	2.4	78+7
2-дом	2.4	0.8	19+6
3-дом ФЭС	4.1	1.3	8+5
4-дом	1.9	0.6	17+6
5-дом	1.9	0.6	6
6-дом	5.9	1.9	22+6
7-дом	3.1	1	6
8-дом	6.3	2.1	14+6
9-дом	3.8	1.2	10+6
10-дом ФЭС	8	2.6	12+12
11-дом	3.9	1.3	12
12-дом	7.1	2.3	20+13
13-дом	10.3	3.4	13
14-дом	3.8	1.3	21+12
15-дом	5.6	1.8	12
16-дом	7.1	2.3	21+12
17-дом	5.5	1.8	12
18-дом	11.7	3.9	23+6
19-дом	11.3	3.7	6
20-дом	4	1.3	18+6
21-дом	4.1	1.3	6+7
22-дом	4.4	1.4	16+6
23-дом	5.2	1.7	6
24-дом	10.9	3.6	21+6
25-дом	6.1	2	6
26-дом ФЭС	15	4.9	20+6
27-дом	7.3	2.4	6
Итого	175.2	54.6	515

Разработана модель солнечных панелей, установленных в домохозяйствах № 3, №10 и №26 из 27 домохозяйств, обеспечиваемых через ТП, в программной среде PowerFactory. Генерирующие мощности солнечных фотоэлектрических установок в указанных домохозяйствах приведены в таблице 5.

Таблица 5.

Суммарная мощность солнечных панелей, установленных в домах

Порядковый номер дома	Мощность, кВт
3-дом	8
10-дом	10
26-дом	16

Для оценки потерь реактивной энергии, возникающих в трансформаторе в течение года, использовалось следующее математическое выражение:

$$\Delta W_{\text{тр}} = \Delta Q_{\text{ур}} \frac{S_{\gamma}^2}{S_n^2} \tau + \Delta W_{\text{т}} \quad (25)$$

где ΔW – постоянные потери энергии в течение года, S_n – номинальная мощность трансформатора, S_{γ} – нагрузка трансформатора, $\tau = 320 \cdot 10$ часов = 3200 часов – средняя продолжительность работы солнечных панелей в течение года.

где ΔW — потери энергии за год; S_n — номинальная мощность трансформатора; $S_{\text{тр}}$ — мощность нагрузки трансформатора; $\tau = 320 \cdot 10 = 3200$ ч — среднее время работы солнечных панелей в течение года.

В режиме без установленных солнечных панелей нагрузка трансформатора составляет 116,66 %, потери реактивной мощности — 13,61 кВАр, при этом годовые потери реактивной энергии составляют:

$$\Delta W_{\text{тр}} = 13,61 \cdot 1,1666^2 \cdot 3200 = 59\,272 \text{ кВАР} \cdot \text{час}$$

При подключении солнечных панелей к сети нагрузка трансформатора снижается до 101,63 %, потери реактивной мощности уменьшаются до 10,33 кВАр, а годовые потери реактивной энергии составляют:

$$\Delta W_{\text{тр}} = 10,33 \cdot 1,0163^2 \cdot 3200 = 34\,142 \text{ кВАР} \cdot \text{час}$$

было определено в размере.

Таким образом, в трансформаторе мощностью 250 кВА в результате использования солнечных панелей годовые потери реактивной энергии снизились на **25 130 кВАр·ч**, то есть примерно на **42 %**.

Рассчитаны годовые потери активной и реактивной энергии в распределительной кабельной сети общей протяжённостью 444 метра.

До установки солнечных панелей:

$$\Delta W_{\text{актив}} = 17,93 \cdot 3200 = 57\,376 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

$$\Delta W_{\text{реактив}} = 6,21 \cdot 3200 = 19\,872 \text{ кВАр} \cdot \text{ч}.$$

После подключения солнечных панелей к сети:

$$\Delta W_{\text{актив}} = 11,248 \cdot 3200 = 35\,994 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

$$\Delta W_{\text{реактив}} = 3,926 \cdot 3200 = 12\,563 \text{ кВАр} \cdot \text{ч}.$$

Полученные результаты показывают, что интеграция солнечных фотоэлектрических панелей в распределительную сеть позволяет значительно снизить потери активной и реактивной энергии в кабельных линиях.

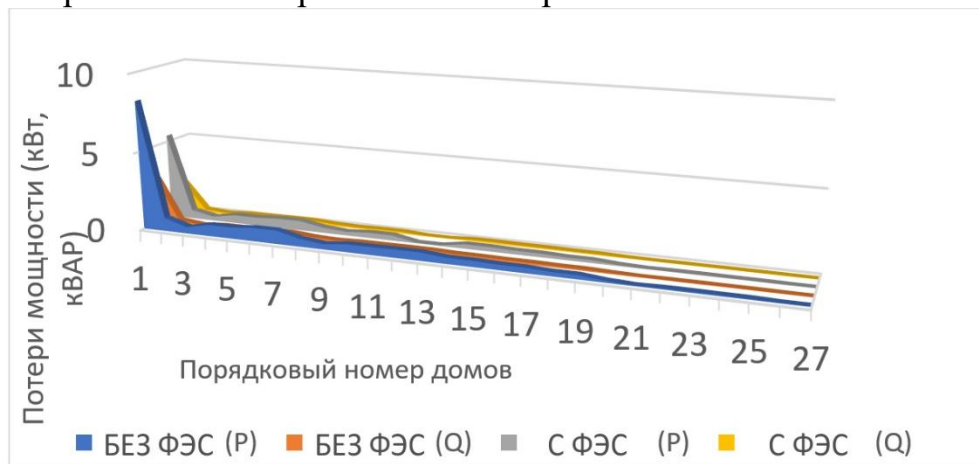


Рис. 17. Потери мощности по домам

В результате эксплуатации солнечных панелей общей мощностью 34 кВт

в кабельной распределительной сети протяжённостью 0,444 км потери активной энергии составили 21 382 кВт·ч (37 %), а потери реактивной энергии — 7 309 кВАр·ч (37 %). В результате подключения солнечных панелей нагрузка сети на участке первого домохозяйства снизилась со 105 % до 85 %, а на участках последних домохозяйств — с 14 % до 6 % (рис. 18).

фотоэлектрическая станция не имеет накопительной (аккумулирующей) части и работает синхронно с электрической сетью.

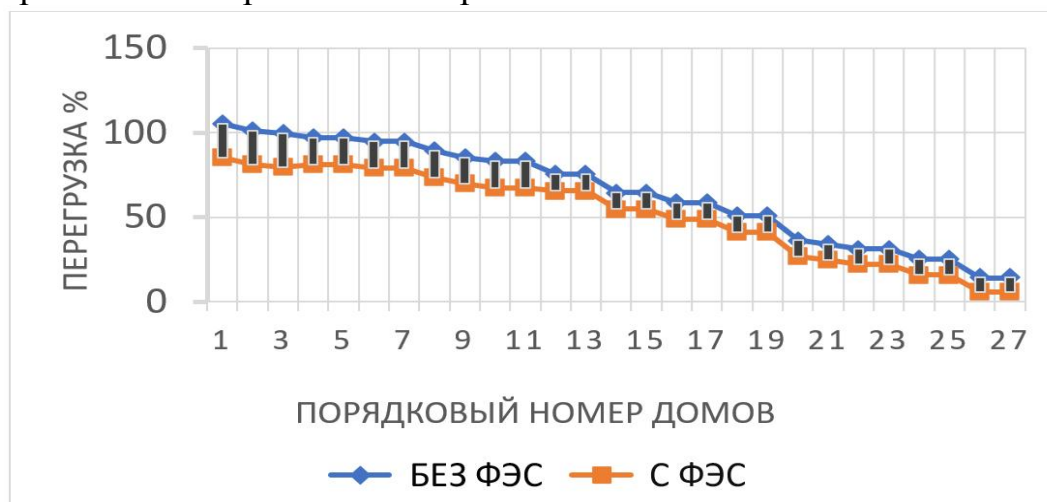


Рис. 18. Степень перегрузки по домам

На сегодняшний день (01.05.2025) в условиях Узбекистана установка солнечной фотоэлектрической станции мощностью 1 кВт в среднем составляет около 5 млн узбекских сумов. Затраты на установку солнечных панелей общей мощностью 34 кВт в 3-м, 10-м и 26-м домах определяются следующим образом:

$$C = 5000000 * 34 = 170000000 \text{ сум}$$

Годовое количество электрической энергии, вырабатываемой солнечными панелями, определяется следующим образом.

$$P_{\text{фэс}} = P_{\text{ежд}} * 320 = \frac{P_{\text{max}}}{2} * 10 \text{ час} * 320 = \frac{34 \text{ кВт}}{2} * 10 \text{ час} * 320 = 54400 \text{ кВт} * \text{час}$$

С учётом снижения потерь электрической энергии в течение года и объёма электроэнергии, вырабатываемой солнечными панелями, суммарное значение составляет $21382 + 54400 = 75\,782 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

При расчёте годового дохода с использованием действующего тарифа на электрическую энергию (по состоянию на 01.05.2025 — 600 сум за 1 кВт·ч, АО «Территориальные электрические сети», источник: <https://www.het.uz/oz/lists/view/2191>) получено следующее значение.

$$D = (54400 \text{ кВт} * \text{час} + 21382 \text{ кВт} * \text{час}) * 600 \frac{\text{сум}}{\text{кВт} * \text{час}}$$

При установке солнечных панелей предусмотрено освобождение от уплаты земельного налога сроком до 3 лет. Согласно данным, приведённым в источнике (<https://old.soliq.uz/taxation/land-property-tax>), средняя ставка земельного налога составляет 411,84 сума за 1 м².

Для размещения предлагаемых солнечных панелей требуется площадь 340 м². Общая сумма экономии по земельному налогу определяется следующим образом.

$$T = (411,84 \text{ сум/м}^2 * 34 * 10 \text{ м}^2) = 140025 \text{ сум/год}$$

Таким образом, годовой доход от солнечных панелей мощностью 34 кВт определяется следующим образом:

$$D_{\text{год}} = D + T = 45469200 + 140025 = 45609225 \text{ сум/год}$$

Срок окупаемости произведённых затрат определяется следующим образом:

$$M_{\text{срок год}} = \frac{C}{D_{\text{год}}} = \frac{170000000 \text{ млн сум}}{45609225 \text{ сум/год}} = 3.7 \text{ год}$$

Таким образом, при установке солнечных панелей общей мощностью 34 кВт в домах, электроснабжение которых осуществляется от трансформатора мощностью 250 кВА через кабельную сеть протяжённостью 444 м, срок окупаемости вложенных затрат составляет 3,7 года, а годовая прибыль достигает 45 609 225 сумов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов исследований, проведённых в рамках диссертационной работы на соискание степени доктора философии (PhD) по техническим наукам на тему «Снижение потерь мощности в распределительных электрических сетях с несимметричной нагрузкой при подключении солнечных панелей», сформулированы следующие выводы:

1. Установлено, что ухудшение качества электрической энергии в низковольтных распределительных сетях, вызванное неравномерным распределением нагрузок по фазам, может быть устранено за счёт подключения солнечных панелей.

2. Перегрузка несимметричных распределительных электрических сетей снижается за счёт использования солнечных панелей, что приводит к значительному уменьшению потерь мощности.

3. При подключении солнечных панелей к несимметричной сети инверторы рассматриваются как источник высших гармоник, и безопасность сети обеспечивается за счёт применения фильтров высших гармоник.

4. Потери электрической энергии в несимметричной распределительной кабельной сети уменьшаются на 37 % за счёт подключения солнечных панелей.

5. Установлено, что солнечные панели мощностью 34 кВт, подключённые к несимметричной распределительной сети, обеспечивают годовую прибыль в размере 45 609 225 сумов, а срок окупаемости затрат составляет 3,7 года.

**ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN
INSTITUTE OF ENERGY PROBLEMS GRANT OF SCIENTIFIC DEGREES
IN THE PRESENCE DSc.05/2025.28.11.T.02.01
DIGITAL SCIENTIFIC COUNCIL**

JIZZAKH POLYTECHNIC INSTITUTE

SUYAROV ANVAR OLIMJON UGLI

**REDUCTION OF POWER LOSSES IN DISTRIBUTION ELECTRICAL
NETWORKS WITH UNBALANCED LOADS WITH THE INTEGRATING
SOLAR PANELS**

05.05.01 – Energy systems and complexes

**ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION (PhD)
ON TECHNICAL SCIENCES**

Tashkent – 2026

The topic of dissertation of doctor of philosophy (PhD) in technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission under the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan under number B2025.2.PhD/T5681.

Dissertation has been prepared at Jizzakh Polytechnic Institute.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of Scientific council (www.energetika.uz) and on Information-educational portal «ZiyoNet» (www.ziyo.net).

Scientific supervisor:

Sattarov Khurshid Abdishukurovich
Candidate of Technical Sciences, Professor

Official opponents:

Isakov Abdusaid Jalilovich
Doctor of Technical Sciences, Professor

Erkinov Bakhodir Narimanovich
Doctor of Philosophy in Technical Sciences Associate
Professor

Leading Organization:

“UzAssystem” Joint Venture Limited Liability Company

The defense will take place on «28» October 2026 y. in 10⁰⁰ at the meeting of Scientific Council DSc 05/2025.28.11.T.02.01 at the Institute of Energy Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. (Address: 40, Durmon yuli str., Tashkent, 100125, Uzbekistan. Phone number: (+99855) 520-01-52, e-mail: energetika_in@mail.uz).

The dissertation can be found at the Information Resource Centre of the Institute of Energy Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan (Registration number 8). (Address: 40, Durmon yuli str., Tashkent, 100125, Uzbekistan. Phone number: (+99855) 520-01-52).

Abstract of the dissertation was distributed on «12» October 2026 year.

(mailing report № «8» on «9» October 2026 year).

O.Kh. Ishnazarov

Chairman of the Scientific Council for the awarding scientific degrees, Doctor of Technical Sciences, Professor

J.N. Tolipov

Scientific secretary of the scientific council for awarding scientific degrees, Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Senior researcher

Sh.V. Khamidov

Chairman of the Scientific Seminar under Scientific Council on awarding scientific degrees, Doctor of Technical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research is to reduce power losses by optimizing the operating modes of unbalanced-load distribution networks with integrated solar photovoltaic power plants.

Research objectives:

analyze the power quality indicators in distribution electrical networks with unbalanced loads;

develop a mathematical model of power flows between solar panels and an unbalanced distribution electrical network;

develop an algorithm for eliminating unbalance in the distribution network using solar panels;

improve power control of solar panels connected to distribution networks with unbalanced loads;

justify the economic efficiency of distribution electrical networks with unbalanced loads integrated with solar panels.

Research objects

The object of the study is symmetric and asymmetrically distributed consumers in a low-voltage power supply system, as well as solar panels connected to electrical networks and the inverters installed in them.

The research subject is the development of methods for utilizing solar panels and controlling power flows, taking into account the parameters of distribution electrical networks with unbalanced loads.

Research methods. The study employs methods of mathematical statistics and probability theory, the Newton–Raphson method, and methods of mathematical analysis.

The scientific novelty of the research is as follows:

the method for improving the active power transfer efficiency of a photovoltaic power plant inverter connected to an unbalanced-load distribution network has been improved by taking into account variations in the load angle;

the feasibility of maintaining the higher-order harmonic components of the current injected into the electrical grid by the solar photovoltaic station inverter within the specified limits has been substantiated;

a method for automatic regulation of the inverter output voltage has been improved based on the compensation of voltage deviations at the point of common coupling between the electrical grid and the solar photovoltaic station;

an adaptive inverter control algorithm has been developed for unbalanced-load distribution networks with integrated solar photovoltaic power plants, taking into account variations in load and network parameters.

Implementation of research results. Based on the scientific results obtained on reducing power losses through the use of solar photovoltaic power plants in distribution networks with unbalanced loads:

the developed method for determining power losses in low-voltage distribution networks with unbalanced loads and integrated solar photovoltaic power plants, taking into account the loading conditions of the transformer and connected

consumers, was implemented in the distribution networks of the Jizzakh Territorial Branch of JSC “Regional Electric Networks” (Reference No. 01-02-59/253 of JSC “Regional Electric Networks” dated February 13, 2026). As a result, it became possible to determine the optimal parameters for installing solar photovoltaic power plants with a total capacity of 34 kW in a consumer network supplied from a 250 kVA transformer through a 444 m cable line;

the scientific and practical results developed for assessing the technical and economic efficiency of using solar photovoltaic power plants in distribution networks with unbalanced loads were implemented in the Jizzakh Territorial Branch of JSC “Regional Electric Networks” (Reference No. 01-02-59/253 of JSC “Regional Electric Networks” dated February 13, 2026). As a result, it was established that the payback period for the installation of solar photovoltaic power plants with a total capacity of 34 kW is 3.7 years, with an annual economic effect of 45,609,225 UZS.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, and a list of 68 references. The main text comprises 111 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Саттаров Х.А., Суяров А.О., Тураев А.И. Носимметрик юкламали тақсимлаш электр тармоқларида филтрларни қўллаш орқали юқори гармоникаларни бартараф этиш. // Энергия ва ресурс тежаш муаммолари. илмий техник журнал. №2. Тошкент – 2022 й., 41-49 б. (05.00.00; №21) <https://energy.tdtu.uz/index.php/journal/issue/view/8/6>
2. Саттаров Х.А., Суяров А.О. Носимметрик юкламали тақсимлаш тармоқларига уланган қуёш панелларининг кучланишга таъсири // Мухаммад ал-Хоразмий авлодлари, илмий техник журнал. №2 2023 й., 174-176 б. (05.00.00; №10)
3. Саттаров Х.А., Суяров А.О. Тақсимлаш электр тармоқлари кучланиш ва юклама характеристикаларини қуёш фотоэлектрик станцияларини улаш орқали яхшилаш // Мухаммад ал-Хоразмий авлодлари, илмий техник журнал. №3 2022 й., 168-171 б. (05.00.00; №10)
4. Саттаров Х.А., Суяров А.О. Қуёш панельлари уланган инверторларнинг кувват узатиш имкониятини тармоқ кучланишининг ўзгаришига нисбатан баҳолаш // Мухаммад ал-Хоразмий авлодлари, илмий техник журнал. №2 2024 й., 138-140 б. (05.00.00; №10)
5. Абдуллаев Э.А., Хасанов М.Ю., Суяров А.О., Баратов Л.С., Саидов А.Х. Оптимизация размещения объектов распределённой генерации в распределительных системах с использованием биоинспирированного алгоритма оптимизации // Главный энергетик, Российская Федерация. Институт электроэнергетики. №7 2026 г., 36-54 ст. (05.00.00; №25). <https://panor.ru/articles/optimizaciia-razmeshheniia-obiektov-raspredelennoi-generacii-v-raspredelitelnyx-sistemax-s-ispolzovaniem-bioinspirirovannogo-algoritma-optimizacii/124346.html#>
6. Саттаров Х.А., Суяров А.О. Повышение режимов напряжения и нагрузки распределительных электрических сетей за счёт интеграции солнечных фотоэлектрических станций // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». №6 2026 г., 59-68 ст. (05.00.00; №11). <https://www.isjaee.com/jour/article/view/2828>

II бўлим (Часть II; Part II)

7. Саттаров Х.А., Сапаев М., Суяров А.О., Тураев А.И. Improving efficiency in a distribution network with asymmetric load due to connected solar panels with a phase relationship // E3S Web of Conferences 401, 04001 (2023) CONMECHYDRO – 2023. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/-pdf/2023/38/e3sconf_conmechydro23_04001.pdf
8. Саттаров Х.А., Суяров А.О., Тураев А.И. Evaluation of the power transfer Capability of inverters connected To solar panels, depending on the Change

in grid voltage // International Conference on New Approaches, ICNAE'22 Konya, Turkey, October 6-7, 2022, 43-46 b.

9. Суяров А.О. Improving the excess load of an asymmetric loading Distribution network using photovoltaic stations // World Journal of Engineering Research and Technology, WJERT, 2026, Vol. 12 Issue 3, 97-104. ISSN 2454-695X, 97-104. («Impaktfaktor»ga ega (12) Index Copernicus) www.wjert.org/admin/assets/article_issue/99022026/1772283672.pdf

10. Хонтўраев И.М., Ҳасанов М.Ю., Анарбаев М.А., Курбанов А.А., Суяров А.О., Жалилов Ў.А. Atom search optimization algorithm for allocating distributed generators in radial distribution // E3S Web of Conferences 264, 04084 (2021), CONMECHYDRO – 2021, 1-11b. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/40/e3sconf_conmechhydro2021_04084.pdf

11. Курбанов А.А., Ҳасанов М.Ю., Суяров А.О., Жалилов Ў.А., Наримонов Б.А., Болиев А.М., An Appropriate Wind Model for The Reliability Assessment of Incorporated Wind Power in Power Generation System // E3S Web of Conferences 264, 04084 (2021), CONMECHYDRO – 2021, 1-116. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/40/e3sconf_conmechhydro2021_04083.pdf

12. Суяров А.О. Қуёш панеллари уланган инверторларининг қувват узатиш имкониятини тармоқ кучланишининг ўзгаришига нисбатан баҳолаш // Ишлаб чиқаришнинг техник, муҳандислик ва технологик муаммоларининг инновацион ечимлари, халқаро миқёсдаги илмий техник-анжуман, Жиззах 2022 й. 1 қисм. 768 774 б.

13. Суяров А.О., Ахмедова Г. Қуёш панеллари уланган носимметрик юкламали тақсимлаш тармоқларида электр энергияси сифат кўрсаткичларининг таҳлили // «Рақамли энергетика тизимини яратишнинг истиқболлари, муқобил энергия олишнинг муаммолари ва ечимлари-2023» Халқаро илмий-амалий конференциясининг илмий мақола ва тезислар тўплами. Жиззах 2023 й. 19 - 20 май. 21- 25 б.

14. Суяров А.О. Носимметрик юкламали тақсимлаш тармоқларидаги қуёш панелларининг электр энергияси ҳосил қилиш имкониятлари // «Рақамли энергетика тизимини яратишнинг истиқболлари, муқобил энергия олишнинг муаммолари ва ечимлари-2023» Халқаро илмий-амалий конференциясининг илмий мақола ва тезислар тўплами. Жиззах 2023 й. 19 - 20 май. 880 - 884 б.

15. Суяров А.О. Носимметрик юкламали тақсимлаш тармоқларига уланган истеъмолчиларнинг характеристикалари // «Қайта тикланувчи энергия ресурсларидан фойдаланишнинг долзарб муаммолари, энергия тежамкор қурилмаларнинг самарадорлигини оширишда сунъий интеллект ва рақамли технологияларни тадбиқ этиш» мавзусидаги халқаро илмий – техник анжуман. Андижон 2023 йил 18- сентябрь. 550-552 б.

16. Ҳасанов М.Ю., Суяров А.О. Қуёш панеллари уланган тақсимланган электр тармоқларида қувват исрофларини ҳисоблаш учун дастур «Қуёш_ТЕТ»// Ўзбекистон Республикаси Адлия Вазирлиги, № DGU 47747.

Босишга рухсат этилди: 08.10.2026 йил
Бичими 60x84 1/16, «Times New Roman»
гарнитуроюда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 3,75. Адади:60. Буюртма: № 86.
Тошкент тўқимачилик ва енгил саноат босмахонасида чоп этилган.
Манзил: 100100, Тошкент ш., Шохжаҳон кўчаси, 5- уй.

