FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI PhD.03/2025.27.12.T.19.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH

FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI
XO‘JA AHMAD YASSAVIY NOMIDAGI XALQARO QOZOQ–TURK UNIVERSITETI

BABAXAN SHOXRUX ABDILKASIMULI

GIBRID SHAMOL-QUYOSH QURILMASINING ENERGETIK XARAKTERISTIKALARI

05.05.06 – Qayta tiklanadigan energiya turlari asosidagi energiya qurilmalari

TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

Farg‘ona – 2026

UO‘K 620.98

Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам

Contents of the Dissertation Abstract of Philosophy Doctor (PhD) on technical sciences

Babaxan Shoxrux Abdilkasimuli

Gibrid shamol-quyosh qurilmasining energetik xarakteristikalari..... **3**

Бабахан Шохрух Абдилкасымулы

Энергетические характеристики гибридного ветро-солнечного устройства.. **23**

Babakhan Shokhrukh Abdilkasimuli

Energy characteristics of a hybrid wind-solar device..... **43**

E’lon qilingan ishlar ro‘yxati

Список опубликованных работ

List of published works 49

FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI PhD.03/2025.27.12.T.19.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH

FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI XO‘JA AHMAD YASSAVIY NOMIDAGI XALQARO QOZOQ–TURK UNIVERSITETI

BABAXAN SHOXRUX ABDILKASIMULI

GIBRID SHAMOL-QUYOSH QURILMASINING ENERGETIK XARAKTERISTIKALARI

05.05.06 – Qayta tiklanadigan energiya turlari asosidagi energiya qurilmalari

TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

Farg‘ona – 2026

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.4.PhD/T4240 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya ishi Farg‘ona davlat texnika universiteti va Xo‘ja Ahmad Yassaviy nomidagi Xalqaro qozoq-turk universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.fstu.uz) va «ZiyoNet» Axborot ta’lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:	**Avezova Nilufar Rabbanakulovna** texnika fanlari doktori, katta ilmiy xodim
Rasmiy opponentlar:	**Matchanov Nuraddin Azadovich** texnika fanlari doktori, katta ilmiy xodim
	Voxidov Akmal Ulashevich texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD)
Yetakchi tashkilot:	Osh texnologiya universiteti (Qirg‘iziston Respublikasi)

Dissertatsiya himoyasi Farg‘ona davlat texnika universiteti huzuridagi PhD.03/2025.27.12.T.19.01 raqamli Ilmiy kengashning 2026 yil “28 11 soat 1300 dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. Manzil: 150100, Farg‘ona sh. Farg‘ona k. 86 uy. Tel: (+99873) 241-12-06, faks (+99873) 241-12-06, e-mail: ilmiy-kengash@fstu.uz, kichik majlislar zali.

Dissertatsiya bilan Farg‘ona davlat texnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№358 raqami bilan ro‘yxatga olingan). Manzil: 150100, Farg‘ona sh. Farg‘ona k. 86 uy. Farg‘ona davlat texnika universiteti. Tel: (+99873) 241-12-06.

Dissertatsiya avtoreferati 2026 yil «10» 11 kuni tarqatildi.
(2026 yil «10» 11 dagi № 7 raqamli reestr bayonnomasi).

U.R. Salomov
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash raisi, t.f.d., professor

A.A. Quchqorov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash ilmiy kotibi, PhD, dotsent

L.K. Mamadaliyeva
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, t.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda markazlashmagan elektr ta’minoti tizimlarining rivojlanishi sharoitida shamol va quyosh nurlanishining qayta tiklanuvchi energiyasidan foydalanadigan gibrid shamol-quyosh energiya qurilmalarini qo‘llashga qiziqish ortib bormoqda. Gibrid shamol-quyosh qurilmalari shamol va quyosh resurslarining o‘zaro to‘ldirilishi hisobiga organik yoqilg‘i sarfisiz elektr yuklamasini ishonchli qoplashini hisobga olganda, ayniqsa kichik quvvatli avtonom tizimlar tarkibida, bunday tizimlar turli sohalarda keng qo‘llanilmoqda. Jahonda qayta tiklanuvchi energiya manbalari obyektlarining o‘rnatilgan umumiy quvvati 5149 GW ga yetgani va yillik o‘sish sur’ati 15,5 % ni tashkil etgani[1] nuqtai nazaridan, bunday energiya qurilmalari energiya samaradorligini oshirishning samarali yechimi hisoblanadi. Shu bilan birga, o‘rtacha shamol tezliklari va o‘zgaruvchan quyosh radiatsiyasi sharoitida elektr energiyasi ishlab chiqarishni oshiradigan gibrid shamol-quyosh qurilmasini ishlab chiqish dolzarb hisoblanadi.

Jahonda gibrid shamol-quyosh energiya qurilmalarining samaradorligini rotor mexanik yo‘qotishlarini kamaytirish, fotoelektrik panellarni shamol qurilmasi konstruksiyasida birgalikda joylashtirish va energiyani o‘zgartirish bosqichlari sonini qisqartirish hisobiga oshirishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Bunda past shamol tezliklari va o‘zgaruvchan bulutlilik sharoitida elektr energiyasining barqaror ishlab chiqarilishini ta’minlash maqsadida bunday qurilmalarning konstruktiv-rejim parametrlarini ishlab chiqish va optimallashtirishga alohida e’tibor qaratilmoqda.[2] Bundan tashqari, gibrid qurilmalar energetik balansini matematik modellashtirish hamda hisobiy modellarni laboratoriya va tabiiy sharoitlarda eksperimental verifikatsiyalashga alohida e’tibor berilmoqda.

Respublikamizda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan keng foydalanish va samaradorligini oshirishga yordam beradigan yangi texnologiyalarni yaratish bo‘yicha tadqiqotlar o‘tkazish va ularni amalda qo‘llash bo‘yicha keng ko‘lamli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. 2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan «Iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta’minlash hamda “Yashil iqtisodiyot” texnologiyalarini barcha sohalarga faol joriy etish, iqtisodiyotning energiya samaradorligini 20 foizga oshirish»[3] bo‘yicha vazifalari belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda,

[1] Renewable capacity statistics 2026. Abu Dhabi, International Renewable Energy Agency (IRENA), 2026.

[2] Anugrah R.A., Budiman Y., Widyianto A., Hadi A., Novanto H.S., Yudianto A. Novel construction of hybrid wind turbine with solar panels. A comprehensive analysis through experimental study and numerical simulation // Cleaner Energy Systems. 2026. Vol. 13. 100242. DOI 10.1016/j.cles.2026.100242.

[3] Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон “2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида”ги Фармони.

xususan, qayta tiklanuvchi energiya manbalari asosida yangi ishlab chiqarish quvvatlarini qurish va mavjudlarini modernizatsiya qilish, jumladan avtonom elektr energiyasi bilan ta’minlash uchun magnit elementli rotor, induksion g‘altak va fotoelektrik panellarga ega gibrid shamol-quyosh qurilmasini hamda uning energetik xarakteristikalarini hisoblash metodikasini ishlab chiqish va maqbul parametrlarini aniqlash muhim hisoblanadi.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son «2022–2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida»gi Farmoni [4] 2019-yil 22-avgustdagi PQ-4422-son «Iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohaning energiya samaradorligini oshirish, energiya tejovchi texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirishga doir tezkor chora-tadbirlar to‘g‘risida»gi[5], 2020-yil 10-iyuldagi PQ-4779-son «Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb qilish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg‘i-energetika mahsulotlariga bog‘liqligini kamaytirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida»gi qarorlari[6] hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me’yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining IV–“Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish usullarini rivojlantirish, nanotexnologiyalar, fotonika va boshqa zamonaviy ilg‘or texnologiyalar asosida qurilmalar va texnologiyalarni yaratish” ustuvor yo‘nalishiga hamda “Qozog‘iston Respublikasida oliy ta’lim va fanni rivojlantirishning 2023–2029-yillarga mo‘ljallangan konsepsiyasi”ga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Shamol energetik qurilmalari va gibrid shamol-quyosh energiya qurilmalarining, jumladan fotoelektrik panellari birgalikda joylashtirilgan kichik quvvatli qurilmalarning energetik samaradorligi va ishonchliligini oshirish masalalari bilan xorijda A. Betz, J.F. Manwell, T. Burton, E. Hau, S. Heier[7], J.A. Duffie, W.A. Beckman, H. Yang, T. Lambert, N.J. Dekker, R.A. Anugrah, S. Budea[8] va boshqalar shug‘ullangan. Bundan tashqari, ushbu soha

[4] O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son «2022–2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida»gi Farmoni. URL https://lex.uz

[5] O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 22-avgustdagi PQ-4422-son «Iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohaning energiya samaradorligini oshirish, energiya tejovchi texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirishga doir tezkor chora-tadbirlar to‘g‘risida»gi qarori. URL https://lex.uz

[6] O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 10-iyuldagi PQ-4779-son «Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb qilish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg‘i-energetika mahsulotlariga bog‘liqligini kamaytirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida»gi qarori. URL https://lex.uz

[7] Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L. Wind Energy Explained. Theory, Design and Application. 2nd ed. Chichester, Wiley, 2009. 689 p.

[8] Budea S., Maravela G.L., Florea G.-F., Mihai A., Voicu I. Design and the operation analysis of a hybrid solar wind system for sustainable urban energy // Energies. 2025. Vol. 18, No. 23. 6362. DOI 10.3390/en18236362.

rivojiga P.P. Bezrukix, V.V. Yelistratov, O.S. Popel, B.V. Lukutin, Ye.V. Solomin[9], S. Earnshaw va J.G. Slootweg katta hissa qo‘shgan bo‘lib, ularning ishlari shamol g‘ildiragi va generator modellarini qurish, qayta tiklanuvchi manbalar asosidagi kombinatsiyalangan energokomplekslarni asoslash, rotorni magnit yengillashtirish hamda gibrid tizimlar tarkibini optimallashtirishga qaratilgan.

Qozog‘istonlik tadqiqotchilar orasida N.T. Rustamov, A.T. Meyrbekov, B.S. Abdrasilov, K.S. Meyramqulova, O.D. Meirbekova, B. Aliyarov hamda gibrid shamol energetik qurilmalarini yaratish va takomillashtirishning nazariy va amaliy jihatlari rivojiga salmoqli hissa qo‘shgan boshqa olimlarni ta’kidlash lozim.[10] Ularning ishlari shamol qurilmalarining energetik samaradorligini oshirish, rotorning mexanik yo‘qotishlarini kamaytirish hamda Qozog‘iston Respublikasining muhofaza hujjatlari bilan himoyalangan magnit elementli parrak konstruksiyalarini ishlab chiqishga qaratilgan.[11]

O‘zbekistonda shamol va quyosh energiyasini elektr energiyasiga aylantirish hamda gibrid energiya qurilmalarining samaradorligini oshirish masalalari ham tadqiqotlarning ustuvor yo‘nalishi hisoblanadi. Ushbu sohaga R.A. Zohidov, A.Sh. Arifjonov[12], R.R. Avezov, N.R. Avezova, O.Z. Toirov[13], G.N. Uzoqov, M.A. Mamatqosimov, E.Yu. Raximov katta hissa qo‘shgan bo‘lib, ular qayta tiklanuvchi manbalar asosidagi manbalarni taqsimlash tarmoqlariga ulash, shamol qurilmalari asinxron generatorlaridagi yo‘qotishlarni kamaytirish, generatsiya jarayonlarini modellashtirish va gibrid qurilmalarning konstruktiv parametrlarini hisoblash masalalari bilan shug‘ullanadilar.[14]

Mazkur tadqiqotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, gibrid shamol-quyosh energiya qurilmalari sohasidagi salmoqli yutuqlarga qaramay, rotor tayanchlarini magnit yengillashtirish va qo‘zg‘almas g‘altakda induksion tok hosil bo‘lishini fizik asoslash, fotoelektrik panellarni machtada o‘zaro soyalanishsiz joylashtirish qonunini asoslash hamda uchta generatsiya kanaliga ega qurilmaning energetik xarakteristikalarini hisoblash bilan bog‘liq hal etilmagan masalalar saqlanib qolmoqda, bu esa ushbu yo‘nalishdagi keyingi tadqiqotlarning dolzarbligini belgilaydi.

---

[9] Соломин Е.В. Масштабируемые гибридные ветросолнечные установки малой мощности // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 2 (106). С. 49–60.

[10] Rustamov N., Babakhan Sh., Naci G., Kibishov A., Meirbekova O. An improved hybrid wind power plant for small power generation // International Journal of Renewable Energy Research. 2023. Vol. 13, No. 2. P. 629–635.

[11] Абдрасилов Б.С., Мейрбеков А.Т., Рустамов Н.Т., Мейрамкулова К.С., Бабахан Ш.А. Гибридный ветрогенератор. Патент РК на полезную модель № 6142 от 11.06.2021.

[12] Arifjanov A.Sh., Zakhidov R.A. Grid connection management of distributed generators on the basis of renewable energy sources // Applied Solar Energy. 2017. Vol. 53, No. 4.

[13] Toirov O., Taniev M., Hamdamov M., Sotiboldiev A. Power losses of asynchronous generators based on renewable energy sources // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 434. 01020. DOI 10.1051/e3sconf/202343401020.

[14] Авезова Н.Р., Тоиров О.З., Рустамов Н.Т., Бабахан Ш.А. Гибридная ветро-солнечная установка для автономного электроснабжения. Часть 1. Конструкция и расчёты основных параметров // Проблемы информатики и энергетики. 2024. № 6. С. 36–53.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta’lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Xo‘ja Ahmad Yassaviy nomidagi Xalqaro qozoq-turk universiteti Injenerlik fakulteti «Elektroinjenerlik» kafedrasi hamda Farg‘ona davlat texnika universiteti « Energetika muhandisligi» fakulteti «Elektronika va asbobsozlik» kafedrasining «Qayta tiklanuvchi energiya manbalari» ilmiy yo‘nalishi bo‘yicha ilmiy-tadqiqot ishlari dasturlari rejalariga muvofiq hamda FZ-2020100661-son «O‘zbekistonning turli tabiiy-iqlim mintaqalarida iste’molchilarni energiya bilan ta’minlash uchun avtonom fotoelektrik stansiyalarning optimal konfiguratsiyalarini asoslash maqsadida energiyani jamlash va o‘zgartirishning kombinatsiyalangan tizimlarini nazariy-hisobiy va amaliy tadqiq etish» fundamental loyihasi (2021–2025) doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi iste’molchilarni avtonom elektr energiyasi bilan ta’minlash uchun magnit elementli rotor, induksion g‘altak va fotoelektrik panellarga ega gibrid shamol-quyosh qurilmasini hamda uning energetik xarakteristikalarini hisoblash metodikasini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

gibrid shamol-quyosh qurilmalariga oid ilmiy manbalar va patentlarni tahlil qilish, hal etilmagan ilmiy masalalarni aniqlash hamda shamol va quyosh energiyasidan birgalikda foydalanish tamoyilini asoslash;

rotor tayanchlaridagi yuklamani magnit kuchlar yordamida kamaytirish, qo‘zg‘almas g‘altakda induksion tok hosil qilish va fotoelektrik panellarni machtada spiral joylashtirish asosida gibrid qurilmaning konstruksiyasi hamda ishlash tamoyilini ishlab chiqish;

uzatish funksiyalaridan foydalangan holda gibrid qurilmaning matematik modelini hamda soatlik iqlim ma’lumotlari asosida uning energetik xarakteristikalarini hisoblash metodikasini ishlab chiqish;

qurilmaning laboratoriya namunasini tajribada tadqiq etish, hisoblash natijalarini tajriba ma’lumotlari bilan taqqoslash hamda Qozog‘iston janubining tabiiy-iqlim sharoitlari uchun berilgan quvvatli qurilmaning energetik xarakteristikalarini baholash.

Tadqiqotning obyekti sifatida shamol rotori gorizontal aylanish o‘qiga ega bo‘lgan, generatori, induksion g‘altagi va fotoelektrik panellari umumiy o‘zgarmas tok shinasiga birlashtirilgan gibrid shamol-quyosh qurilmasi olingan.

Tadqiqotning predmeti gibrid qurilmada shamol va quyosh energiyasini elektr energiyasiga aylantirish, generator, induksion g‘altak va fotoelektrik panellarda hosil bo‘lgan toklarni umumiy shinada birlashtirish jarayonlari hamda qurilmaning energetik xarakteristikalarini hisoblash usullaridan iborat.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqotda tizimli tahlil, aerodinamika, elektr mashinalari va elektromagnit maydon nazariyalari, quyosh nurlanishini hisoblash hamda uzatish funksiyalari usullaridan foydalanilgan. Shuningdek, MATLAB/Simulink muhitida imitatsion modellashtirish, laboratoriya tajribalari va o‘lchash noaniqligini baholash usullari qo‘llanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

parraklardagi magnit elementlar va qo‘zg‘almas induksion g‘altakli gibrid shamol-quyosh qurilmasi panellarni machtada 137,5° qadamli spiral joylashtirish orqali takomillashtirilib, belgilangan geometrik shartlarda o‘zaro soyalanishni bartaraf etish va janubga yo‘naltirilgan panellarga nisbatan yillik nurlanishning 86,6 % ini qabul qilish imkoniyati asoslangan;

shamol tezligi va quyosh nurlanishi o‘zgarganda o‘tkinchi jarayonlarni hisoblash hamda shamol kanalining turg‘unligini baholash imkonini beruvchi, shamol moduli, induksion g‘altak va fotoelektrik panellarning fizik parametrlar orqali ifodalangan uzatish funksiyalariga asoslangan gibrid qurilmaning dinamik matematik modeli ishlab chiqilgan;

rotor tayanchlaridagi yuklamani magnit kuchlar yordamida kamaytirish va induksion g‘altakdan foydalanishning energetik samaradorlik shartini hisobga olgan holda, soatlik iqlim ma’lumotlari asosida gibrid qurilmaning energetik xarakteristikalarini hisoblash metodikasi takomillashtirilgan;

laboratoriya namunasida rotor tayanchlaridagi mexanik yo‘qotishlarni magnit kuchlar yordamida kamaytirish hisobiga generator quvvati magnit elementlarsiz variantga nisbatan 8–41 % ga ortishi hamda qo‘zg‘almas induksion g‘altakning shamol kanali jami quvvatidagi ulushi 14–23 % ni tashkil etishi tajriba asosida aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

shamol generatori, qo‘zg‘almas induksion g‘altak va fotoelektrik panel umumiy o‘zgarmas tok shinasiga birlashtirilgan gibrid shamol-quyosh qurilmasining laboratoriya namunasi yaratilgan hamda havo oqimining 4–16 m/s tezliklari oralig‘ida shamol kanalining energetik ko‘rsatkichlari aniqlangan;

rotor tayanchlaridagi yuklamani magnit kuchlar yordamida kamaytirish rotor aylana boshlashi uchun zarur shamol tezligini 3,0 m/s dan 2,4 m/s gacha pasaytirishi asoslangan; shamolning o‘rtacha tezligi 7–8 m/s bo‘lganda induksion g‘altakdan foydalanish shamol kanalining yillik elektr energiyasi ishlab chiqarishini 9,4–13,1 % ga oshirishi hisoblashlar orqali ko‘rsatilgan;

laboratoriya natijalari bilan tekshirilgan model asosida Qozog‘iston janubi sharoitlari uchun 10 kW quvvatli qurilmaning yillik elektr energiyasi ishlab chiqarishi 16,6–29,4 MW·h ni, obyektning elektr energiyasiga bo‘lgan talabini

qoplash ulushi 47–66 % ni hamda CO_2 chiqindilarining hisobiy kamayishi yiliga 8,5–11,9 t ni tashkil etishi aniqlangan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi aerodinamika va elektromexanikaning asosiy qonunlariga tayangan hisoblash usullarining qo‘llanilgani, hisobiy natijalarning tajriba ma’lumotlari bilan taqqoslangani hamda o‘lchash noaniqligi baholangani bilan asoslanadi. Magnit kuchlar ta’sirida generator quvvati ortishining hisobiy va tajribaviy qiymatlari o‘rtasidagi o‘rtacha farq 3,4 foiz punktini tashkil etgan. Fotoelektrik panel quvvatining sutkalik o‘zgarishi bo‘yicha normallashtirilgan og‘ish 8,4 % bo‘lgan. O‘lchashlarning asbobga bog‘liq tarkibiy qismi uchun kengaytirilgan noaniqlik k = 2 qamrov koeffitsiyentida 1,8 % ni tashkil etgan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati rotor tayanchlaridagi yuklamani magnit kuchlar yordamida kamaytirish, induksion g‘altak parametrlari, fotoelektrik panellarning joylashuvi, yuklama rejimi va iqlim sharoitlarining qurilma samaradorligiga ta’sirini baholash imkonini beruvchi matematik model hamda hisoblash metodikasi ishlab chiqilgani bilan izohlanadi. Hisobiy ish rejimida shamol tezligi 6 m/s bo‘lganda shamol kanalining vaqt doimiysi taxminan 5,5 s ni tashkil etishi ko‘rsatilgan.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati ishlab chiqilgan konstruksiya va hisoblash metodikasidan avtonom elektr ta’minoti uchun gibrid qurilmaning parametrlarini tanlashda foydalanish mumkinligi bilan belgilanadi. Hisoblashlar 10 kW quvvatli qurilmada yillik elektr energiyasi ishlab chiqarish 29,4 MW·h gacha yetishini ko‘rsatgan. Joriy etish dalolatnomasida esa korxona ma’muriy binosining tarmoqdan olinadigan elektr energiyasini yil davomida qariyb 50 % ga tejash natijasi qayd etilgan.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Gibrid shamol-quyosh qurilmasi va uning energetik xarakteristikalarini hisoblash metodikasini ishlab chiqish bo‘yicha olingan natijalar asosida:

avtonom elektr ta’minoti uchun shamol qurilmasi asosidagi gibrid energiya tizimi, uni ekspluatatsiya qilish bo‘yicha konseptual yondashuv hamda ishlab chiqariladigan va iste’mol qilinadigan quvvat balansini ushlab turish algoritmi Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universitetida Davlat ilmiy-texnika dasturi doirasida bajarilgan IL-4821091630-raqamli «Shamol va suv oqimi parametrlari o‘zgarishida lokal energetika tizimiga o‘zgarmas chastotali stabil o‘zgarmas elektr quvvatini uzatuvchi yangi avtomatik qurilma yaratish» mavzusidagi 2022–2024-yillarga mo‘ljallangan innovatsion loyihani bajarishda foydalanilgan (O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi Oliy ta’limni rivojlantirish tadqiqotlari markazining 2025-yil 23-sentabrdagi 02/01-01-366-son ma’lumotnomasi). Natijada, shamol va suv energiyasi asosidagi gibrid

energetik qurilma ishlab chiqilgan hamda turli shamol tezliklari o‘zgarishida asinxron generatorning aylanish tezligini rostlaydigan avtomatik boshqarish tizimining funksional sxemasi va elektr energiyasi sifat ko‘rsatkichlarining me’yoriy qiymatlarini ta’minlovchi nazorat-boshqaruv tizimi yaratilgan;

gibrid shamol-quyosh qurilmasining konstruksiyasi (FAP 6142) va uning energetik xarakteristikalarini hisoblash metodikasi Toshkent davlat texnika universiteti Kengashining 2023-yil 12-avgustdagi 5-son qarori bilan tasdiqlangan 02-2023-0135-son guvohnomaga muvofiq «Shamol energetikasi» o‘quv qo‘llanmasini ishlab chiqishda foydalanilgan (O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi Oliy ta’limni rivojlantirish tadqiqotlari markazining 2025-yil 23-sentabrdagi 02/01-01-366-son ma’lumotnomasi). Natijada, tadqiqot natijalari «Muqobil energiya manbalari» bakalavriat ta’lim yo‘nalishi va magistratura mutaxassisliklariga tegishli «Shamol energetikasi» hamda «Quyosh energiyasidan foydalanishning energetik tizimlari va qurilmalari» fanlarining o‘quv dasturlari mazmuniga singdirilgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqotning asosiy natijalari Qozog‘iston Respublikasi va O‘zbekiston Respublikasida o‘tkazilgan 8 ta xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyada ma’ruza qilingan va muhokamadan o‘tgan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 24 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan O‘zbekiston Respublikasi va Qozog‘iston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyalarining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 13 ta maqola, jumladan 2 tasi xorijiy (Scopus ma’lumotlar bazasida referatlangan) jurnallarda nashr etilgan hamda Qozog‘iston Respublikasining foydali modelga 2 ta patenti olingan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiya kirish, to‘rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 120 sahifani tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi qayd etilgan, muammoning o‘rganilganlik darajasi bo‘yicha tahlil natijalari keltirilgan, maqsad va vazifalar shakllantirilgan, tadqiqot obyekti, predmeti va usullari ko‘rsatilgan, ilmiy yangilik bayon etilgan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ularning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, natijalarni joriy etish va ishning aprobatsiyasi, shuningdek dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi haqida qisqacha ma’lumotlar berilgan.

Dissertatsiyaning birinchi bobi «Gibrid shamol-quyosh energiya qurilmalari samaradorligini oshirishning hozirgi holati va ilmiy asoslari»da kichik quvvatli shamol va quyosh energetikasining hozirgi holati va rivojlanish tendensiyalari tahlil qilingan, gibrid qurilmalar konstruksiyalari hamda ularning o‘zgaruvchan va o‘zgarmas tok shinalari bo‘yicha ulanish sxemalari qiyosiy tahlil etilgan, Qozog‘iston janubining shamol va gelioenergetik salohiyati baholangan hamda patent-axborot tahlili bajarilgan.

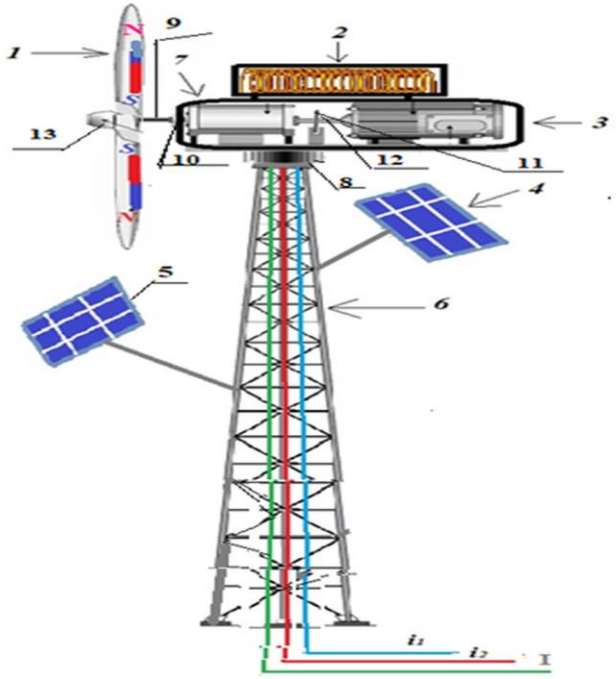
Tahlillar natijasida kichik quvvatli shamol qurilmalarida energiyani o‘zgartirishning har bir qo‘shimcha bosqichi yakuniy quvvatni kamaytirisi aniqlanganki, bunda inverter FIK 0,85 va taqsimlash tarmog‘i FIK 0,95 bo‘lganda uzatishning yig‘indi koeffitsiyenti 0,8 ni tashkil etadi va 3 kW quvvatli qurilmadan iste’molchi 2,4 kW dan ortiq quvvat olmaydi. Seriyali kichik shamol qurilmalarida trogish tezligi 2–4 m/s ni tashkil etadi, shu sababli o‘rtacha shamol sharoitida vaqtning sezilarli qismi to‘xtash rejimiga to‘g‘ri keladi.

Ulanish sxemalarini qiyoslash shuni ko‘rsatdiki, bir nechta xilma-xil generatsiya elementiga ega avtonom qurilma uchun umumiy o‘zgarmas tok shinasi eng maqbul hisoblanadi va u o‘zgartirish bosqichlari sonini qisqartiradi, manbalarni chastota va faza bo‘yicha sinxronlashni talab etmaydi hamda jamg‘aruvchini ulashni soddalashtiradi. 2002–2026-yillar davri bo‘yicha Germaniya, AQSH, Rossiya, Qozog‘iston muhofaza hujjatlari va xalqaro arizalarning patent-axborot tahlili shuni ko‘rsatdiki, fotoelektrik panellarni shamol qurilmasi konstruksiyasida joylashtirish, rotordagi magnit elementlar va umumiy o‘zgarmas tok shinasi alohida-alohida ma’lum, biroq ularning machtada fotopanellarni spiral joylashtirish bilan birgalikdagi majmuasi amalga oshirilmagan. Eng yaqin analog sifatida Qozog‘iston Respublikasining №7391-son foydali modelga patenti aniqlangan, unda talabgor hammuallif hisoblanadi.

Dissertatsiyaning ikkinchi bobi «Gibrid shamol-quyosh qurilmasi konstruksiyasi va ishlash tamoyilini nazariy asoslash»da qurilmaning konseptual sxemasi shakllantirilgan, magnit yengillashtirish va induksion tok hosil bo‘lishining

fizik mexanizmi ochib berilgan hamda fotopanellarni machtada joylashtirish qonuni asoslangan.

Ishlab chiqilgan qurilmaning umumiy ko‘rinishi 1-rasmda keltirilgan. Qurilma gorizontal aylanish o‘qiga ega uch parrakli shamol g‘ildiragini o‘z ichiga oladi, uning parraklariga doimiy magnitlar mahkamlangan, gondolada esa qo‘zg‘almas induksion g‘altak o‘rnatilgan. Machtada fotoelektrik panellar spiral qonun bo‘yicha joylashtirilgan. Qurilma Qozog‘iston Respublikasining №6142 va №7391-son foydali modelga patentlari bilan himoyalangan.



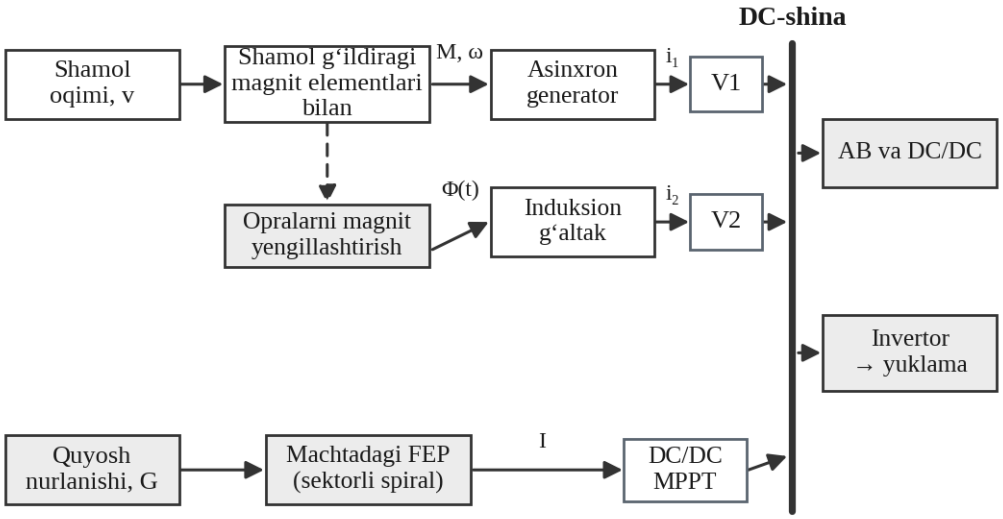
1-rasm. Gibrid shamol-quyosh qurilmasining umumiy ko‘rinishi: 1 – magnit elementli parrak, 2 – induksion g‘altak, 3 – generator, 4, 5 – fotoelektrik panellar, 6 – machta, 7 – multiplikator, 8 – tayanch-burilish qurilmasi, 9 – g‘ildirak gupchagi, 10 – mufta, 11 – mexanik tormoz, 12 – generator vali, 13 – oqim yo‘naltirgich, i_1 – generator toki, i_2 – induksion g‘altak toki, I – fotoelektrik panellar toki (Qozog‘iston Respublikasining №6142 va №7391-son foydali modelga patentlari)

Qurilma elektr energiyasini uchta mustaqil kanal bo‘yicha ishlab chiqaradi (2-rasm). Birinchi kanal asinxron generator bilan, ikkinchisi induksion g‘altak bilan, uchinchisi machtadagi fotoelektrik panellar bilan hosil qilinadi. To‘g‘rilash va moslashtirishdan so‘ng uchala tok umumiy shinada yig‘iladi.

Umumiy o‘zgarmas tok shinasiga keladigan quvvat mos o‘zgartkichlar FIKini hisobga olgan holda uchta kanal quvvatlarining yig‘indisi bilan aniqlanadi:

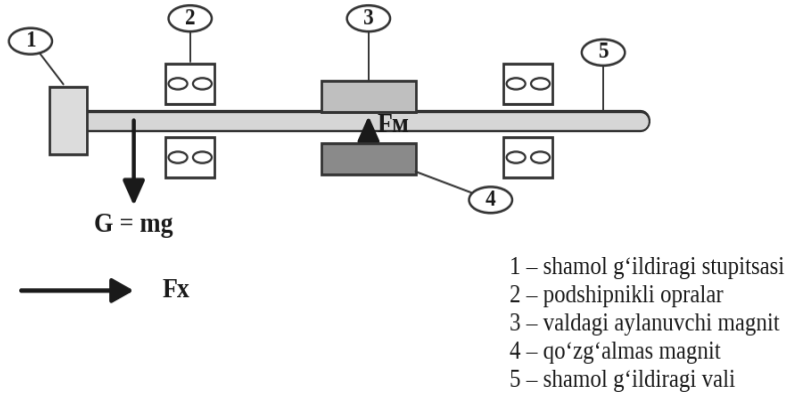
$$P_{sh} = P_1\eta_{в1} + P_2\eta_{в2} + P_f\eta_p \qquad (1)$$

bu yerda P_1 – generatorning elektr quvvati (W), P_2 – induksion g‘altak quvvati (W), P_f – fotoelektrik panellar quvvati (W), η_{v1}, η_{v2} – to‘g‘rilagichlar FIK$_i$, η_p – fotopanellar o‘zgartkichi FIKi.



2-rasm. Gibrid shamol-quyosh qurilmasida energiyani o‘zgartirishning funksional sxemasi: B1, B2 – to‘g‘rilagichlar, MPPT – maksimal quvvat nuqtasini kuzatuvchi o‘zgartkich, AB – akkumulyator batareyasi

Rotor tayanchlarini magnit yengillashtirish uzeli 3-rasmda keltirilgan. Ernshou teoremasiga muvofiq faqat doimiy magnitlardan iborat tizim jismning barcha erkinlik darajalari bo‘yicha turg‘un muvozanatini ta’minlay olmaydi, shu sababli qurilmada rotorning to‘liq levitatsiyasi emas, balki tayanchlarni qisman magnit yengillashtirish amalga oshiriladi.



3-rasm. Shamol g‘ildiragi opralarini magnit yengillashtirish uzelining sxemasi: G – rotorning og‘irlik kuchi, Fm – magnit itarish kuchi, Fx – shamol oqimining o‘q kuchi

Magnit maydonining sirtga ko‘rsatadigan bosimi va yengillashtirish darajasiga qarab trogish tezligining o‘zgarishi quyidagi ifodalar bilan aniqlanadi:

$$p_{\text{м}} = \frac{B^2}{2\mu_0} \qquad (2)$$

$$\frac{v_{\text{тр}}}{v_{\text{тр0}}} = \sqrt{1 - x\delta} \qquad (3)$$

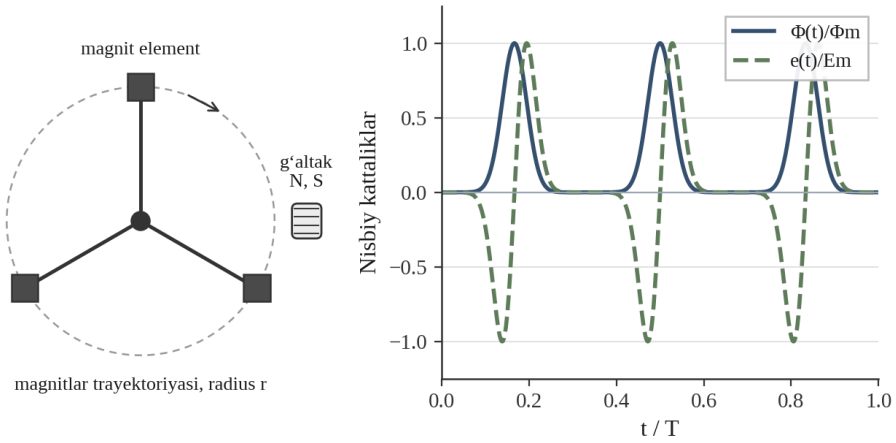
bu yerda B – tirqishdagi magnit induksiyasi (T), μ_0 – magnit doimiysi, $x = F_m/G$ – tayanchlarni yengillashtirish darajasi, δ – qarshilik momentidagi tayanchlar ishqalanishining ulushi. Hisob-kitoblar shuni ko‘rsatdiki, tirqishdagi 0,2–0,5 T

induksiyada magnit bosimi 16–100 kPa ni tashkil etadi va massasi 10 kg bo‘lgan rotorni yengillashtirish uchun 20–55 sm² magnit yuzasi yetarli bo‘ladi.

Induksion g‘altak qurilmaning ikkinchi generatsiya elementi hisoblanadi. Parrak magnit elementlari g‘altak torsi yonidan o‘tganda uning o‘ramlarida EYuK induksiyalanadi (4-rasm):

$$E_m \approx \frac{(N\, B_g\, S_g\, \omega\, r_m)}{b_m} \qquad (4)$$

bu yerda N – g‘altak o‘ramlari soni, B_g – magnit maydonining g‘altak torsidagi o‘rtacha induksiyasi (T), S_g – o‘ram yuzasi (m²) ω – rotorning burchak tezligi, (rad/s), r_m – magnitlarning o‘rnatilish radiusi (m), b_m – o‘zaro ta’sir zonasining uzunligi (m).



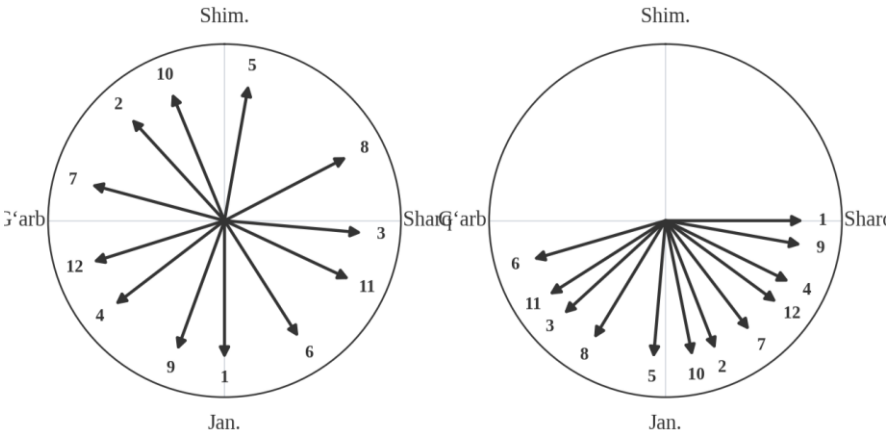
4-rasm. Parrak magnit elementlari va induksion g‘altakning o‘zaro joylashuv sxemasi (chapda) **hamda uchta magnit elementda shamol g‘ildiragining bir aylanishi davomida magnit oqimi va g‘altak EYuKining shakli** (o‘ngda)

(4) ifodadan ko‘rinadiki, shamol g‘ildiragi doimiy tezkorlik bilan ishlaganda g‘altak EYuKining amplitudasi shamol tezligiga taxminan chiziqli ravishda ortadi. Bu esa g‘altakning generatsiya rejimini shamol rejimi bilan bog‘laydi.

Fotoelektrik panellarni machtada joylashtirish uchun oltin burchak ($\psi_0 \approx 137{,}5°$) qadamiga ega sektorli spiral taklif etilgan, unda azimutlar janubga nisbatan simmetrik sektorga akslantiriladi:

$$A_k = A_0 + \Delta\left\{\frac{((k-1)\psi_0)}{360°}\right\}, k = 1,2,\dots,n_\phi \qquad (5)$$

bu yerda A_k – k-panelning azimuti, A_0 – sektor boshining azimuti, Δ – sektor kengligi, figurali qavslar sonning kasr qismini bildiradi. O‘n ikkita panelni to‘liq va sektorli spiral bo‘yicha joylashtirish sxemalari 5-rasmda, variantlarni qiyosiy baholash esa 1-jadvalda keltirilgan.



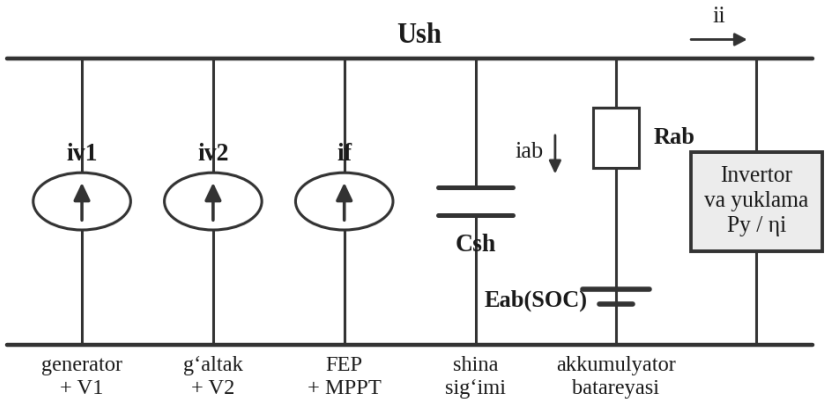
5-rasm. O‘n ikkita fotoelektrik panelning azimutlari (yuqoridan ko‘rinish, raqamlar – yuqoridan pastga panel tartib raqami): a – 137,5° qadamli to‘liq spiral, b – (5) ifoda bo‘yicha Δ = 180° da sektorli spiral

1-jadval

Machtada o‘n ikkita fotoelektrik panelni joylashtirish variantlarini qiyosiy baholash (Turkiston sh., β = 50°)

Ko‘rsatkich	Barcha panellar janubga	To‘liq spiral	Sektorli spiral
Panelga yillik nurlanish, kW·soat/m²	2296	1559	1989
Nisbiy nurlanish, %	100	67,9	86,6
6–10 soat oralig‘idagi nurlanish ulushi, %	16,4	19,2	20,3
Qo‘shni panellarning o‘zaro soyalanishi	katta qadam talab etiladi	minimal	minimal

Dissertatsiyaning uchinchi bobi «Gibrid shamol-quyosh qurilmasining energetik xarakteristikalarini hisoblashning matematik modeli va metodikasi»da qurilmaning nochiziqli matematik modeli, uzatish funksiyalari shaklidagi chiziqlashtirilgan modeli, MATLAB/Simulink muhitidagi imitatsion modeli hamda energetik xarakteristikalarni hisoblash metodikasi ishlab chiqilgan. Qurilmaning o‘zgarmas tok shinasi tomonidan uchta tok manbaini, jamg‘aruvchini va yuklamani birlashtiruvchi hisobiy almashtirish sxemasi 6-rasmda keltirilgan.



6-rasm. Gibrid shamol-quyosh qurilmasining o‘zgarmas tok shinasi tomonidan hisobiy almashtirish sxemasi

Modelni barqaror rejim atrofida chiziqlashtirish natijasida mexanik bo‘g‘in, generator, g‘altak va fotoelektrik quyi tizimning uzatish funksiyalari olingan.

Shamol kanalining ekvivalent uzatish funksiyasi mexanik bo‘g‘inning generator va g‘altak bo‘g‘inlari bilan ketma-ket ulanishi orqali aniqlanadi:

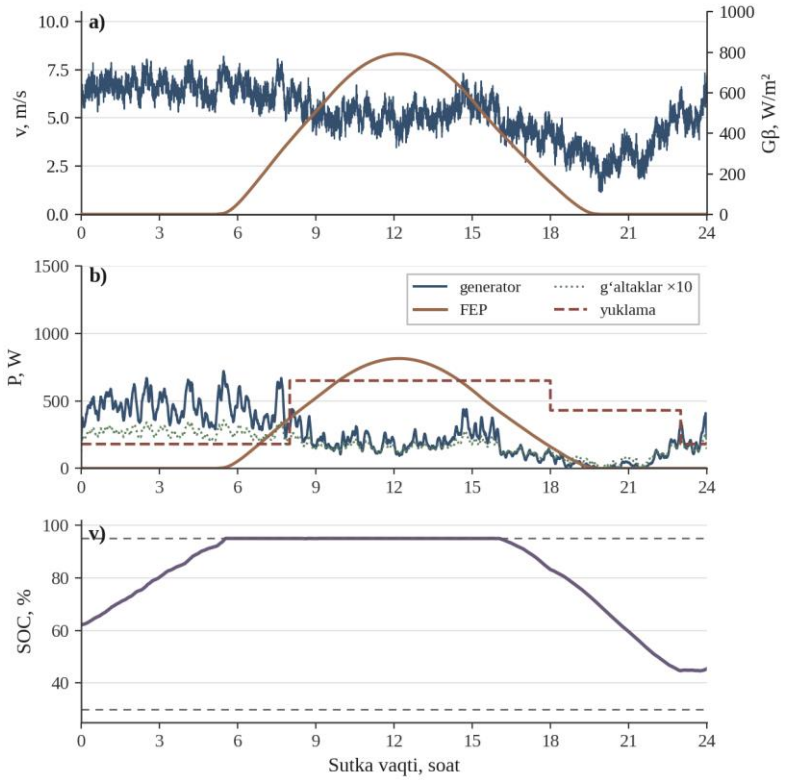
$$W_{m(p)} = \frac{k_\omega}{T_м p+1} \qquad (6)$$

$$W_{v(p)} = W_{m(p)} \left[\eta_{(v1)W_{1(p)}} + \eta_{(v2)W_{2(p)}}\right] \qquad (7)$$

bu yerda T_m = J/Be – shamol modulining elektromexanik vaqt doimiysi, (s), k_ω – mexanik bo‘g‘inning uzatish koeffitsiyenti. Hisobiy misol uchun v_0 = 6 m/s rejimida T_m = 5,46 s, $W_v(0)$ = 179 W/(m/s) qiymatlari olingan. Uzatish funksiyasining barcha qutblari haqiqiy va manfiy bo‘lib, shamol kanalining asimptotik turg‘unligini tasdiqlaydi, g‘altak zanjirining vaqt doimiysi esa millisekundning ulushlarini tashkil etadi. Induksion g‘altakning energetik maqsadga muvofiqligi sharti quyidagi ko‘rinishga ega:

$$\eta_g \eta_{v2} > \eta_{gen} \eta_{v1} \qquad (8)$$

bu yerda η_g – induksion g‘altak zanjirining FIKi, η_{gen} – generatorning FIKi, η_{v1}, η_{v2} – mos ravishda generator va g‘altak to‘g‘rilagichlarining FIKlari, ya’ni g‘altak nominal shamol tezligidan past rejimlarda ishlab chiqarishni faqat uning zanjiri va to‘g‘rilagichi FIKlarining ko‘paytmasi generator uchun shunday ko‘paytmadan katta bo‘lgandagina oshiradi. Nominal tezlikdan yuqorida generator nominal quvvat bilan cheklanadi va g‘altak shamol g‘ildiragining ortiqcha quvvatini o‘zlashtiradi.



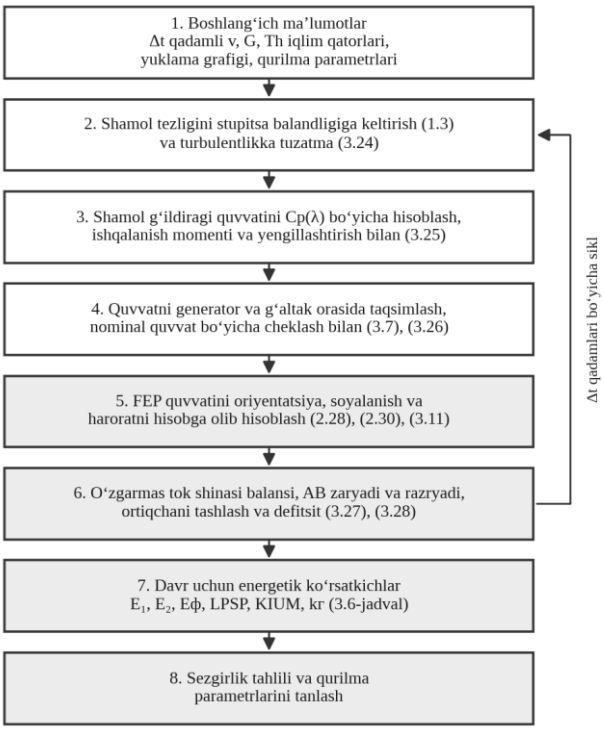
7-rasm. Sutkalik modellashtirish natijalari: a) shamol tezligi va panellar nurlanishi, b) generator, fotoelektrik panellar, g‘altaklar (×10 masshtabda) va yuklama quvvatlari, v) akkumulyator batareyasining zaryadlanish darajasi

Turkiston sh. sharoitlari uchun sutkalik imitatsion modellashtirish natijalari 7-rasmda keltirilgan. Modellashtirish shamol va quyosh kanallarining o‘zaro to‘ldirilishini ko‘rsatadi, bunda tungi va ertalabki soatlarda yuklamani shamol kanali qoplaydi va akkumulyator batareyasi zaryadlanadi, kunduzi asosiy ulushni fotoelektrik panellar ta’minlaydi, kechqurun esa yuklama batareyaning razryadi hisobiga qoplanadi.

Yillik energetik xarakteristikalarni hisoblash uchun soatlik iqlim ma’lumotlaridan foydalanadigan sakkiz bosqichli metodika ishlab chiqilgan (8-rasm). Shamol oqimi quvvati tezlikning kubiga proporsional bo‘lgani va tezlik kubining o‘rtacha qiymati o‘rtacha tezlik kubidan katta bo‘lgani sababli turbulentlikka tuzatma kiritiladi:

$$(v^3)_{o'rt} = \bar{v}^3 \cdot (1 + 3 \cdot I_t^2) \qquad (9)$$

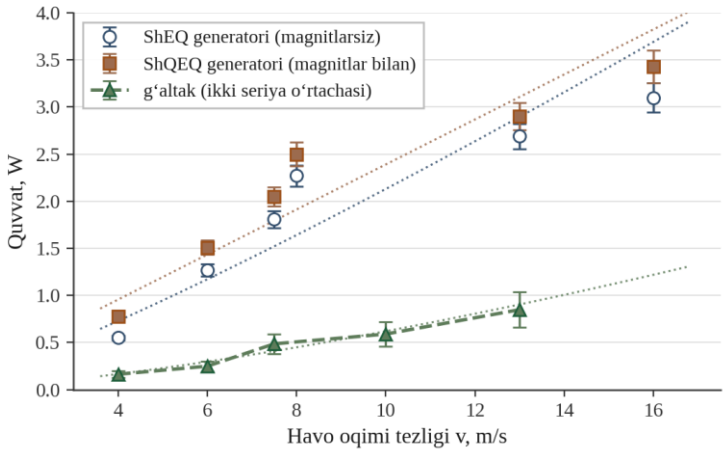
bu yerda I_t – turbulentlik intensivligi. Tuzatma bilan metodika imitatsion modeldan 0,2 % dan ortiq farq qilmaydi, tuzatmasiz esa ishlab chiqarishni 2–3 % ga kamaytiradi.



8-rasm. Gibrid shamol-quyosh qurilmasining energetik xarakteristikalarini hisoblash metodikasi algoritmi

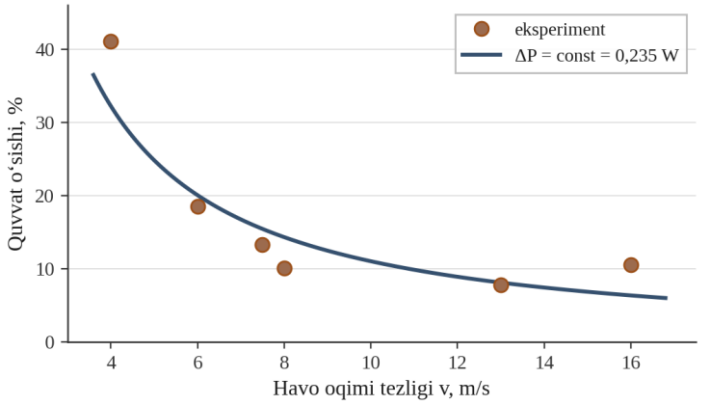
Dissertatsiyaning to‘rtinchi bobi «Gibrid shamol-quyosh qurilmasining eksperimental tadqiqotlari, modelni verifikatsiyalash va energetik xarakteristikalarini baholash»da laboratoriya namunasi, o‘lchash tizimi, eksperimental tadqiqotlar dasturi va metodikasi tavsiflangan, o‘lchash noaniqligi baholangan, model verifikatsiyalangan hamda 10 kW quvvatli qurilmaning energetik va energoiqtisodiy ko‘rsatkichlari hisoblangan.

Laboratoriya namunasi ikkita konfiguratsiyada sinovdan o‘tkazildi, bunda ShEQ konfiguratsiyasida magnit elementlar parraklardan olib tashlanadi, ShQEQ konfiguratsiyasida esa ular o‘rnatiladi va bir vaqtda generator hamda induksion g‘altak toklari o‘lchanadi. Havo oqimining tezligi 4 dan 16 m/s gacha o‘zgartirildi. Natijalar 9-rasmda keltirilgan.



9-rasm. Havo oqimi tezligiga qarab ShEQ va ShQEQ konfiguratsiyalarida generator quvvati hamda induksion g‘altak quvvatining eksperimental bog‘liqliklari (nuqtali chiziqlar – darajali approksimatsiyalar, vertikal kesmalar – kengaytirilgan noaniqlik)

Eksperimental aniqlanganki, ShQEQ konfiguratsiyasida generator quvvati ShEQ konfiguratsiyasidagiga nisbatan 8–41 % ga yuqori bo‘lib, quvvatning absolyut o‘sishi amalda o‘zgarmas va o‘rtacha 0,235 W ni tashkil etadi. Bu magnit yengillashtirish qarshilik momentini kamaytirishi va shamol g‘ildiragining aerodinamik quvvatini o‘zgartirmasligi haqidagi model xulosasini tasdiqlaydi (10-rasm).

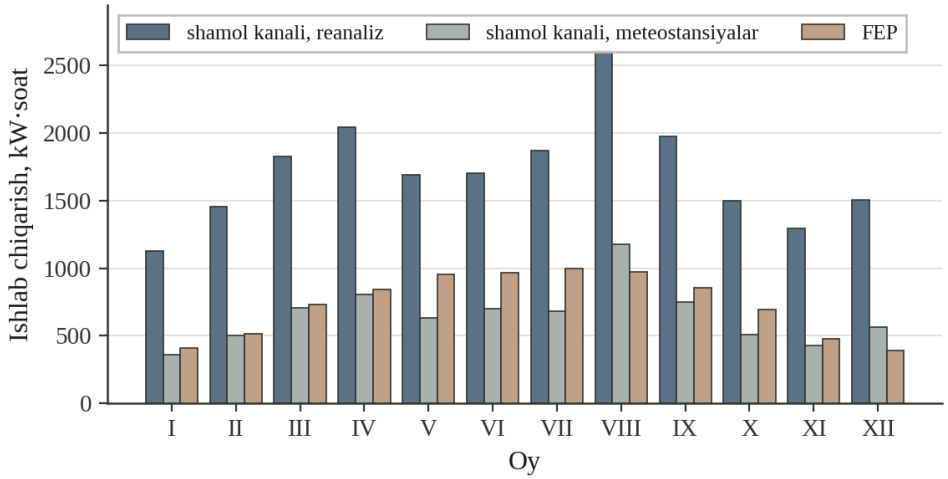


10-rasm. Magnit elementlar hisobiga generator quvvatining nisbiy o‘sishi: nuqtalar – eksperiment, chiziq – yo‘qotishlarning 0,235 W ga doimiy kamayishidagi hisob

Induksion g‘altakning ulushi shamol kanali yig‘indi quvvatining 14–23 % ini tashkil etadi va oqim tezligi ortishi bilan o‘sadi. G‘altak zanjirining FIKi 0,87–0,91 ni tashkil etdi, bu (8) shartga yaqin.

O‘xshashlik nazariyasi asosida laboratoriya namunasi xarakteristikalari «Kentau transformator zavodi» AJ obyekti uchun 10 kW quvvatli qurilmaga qayta hisoblandi. Kentau sh. uchun yillik ishlab chiqarish MERRA-2 reanalizi va

meteostansiya kuzatuvlari bo‘yicha ikkita shamol rejimi ssenariysida hisoblandi (11-rasm, 2-jadval).



11-rasm. Kentau sh. sharoitlarida 10 kW quvvatli qurilma shamol kanali va fotoelektrik panellarining oylik ishlab chiqarishi

2-jadval

10 kW quvvatli gibrid shamol-quyosh qurilmasining yillik energetik ko‘rsatkichlari (obyektning yillik iste’moli 30 MW·soat)

Ko‘rsatkich	Reanaliz MERRA-2	Meteostansiyalar ssenariysi
Generator ishlab chiqarishi E_1, MW·soat	19,62	7,35
Induksion g‘altaklar ishlab chiqarishi E_2, MW·soat	0,98	0,46
Fotoelektrik panellar ishlab chiqarishi Ef, MW·soat	8,80	8,80
Yig‘indi ishlab chiqarish, MW·soat	29,40	16,61
Yuklamaning qoplanish ulushi, %	66,0	46,7
O‘rnatilgan quvvatdan foydalanish koeffitsiyenti, %	21,8	12,3
CO_2 chiqindilarining kamayishi, t/yil	11,9	8,5

Energoiqtisodiy samaradorlik elektr energiyasining normallashtirilgan tannarxi bo‘yicha baholandi:

$$LCOE = \frac{K \cdot CRF + C_э}{E},\ CRF = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \qquad (10)$$

bu yerda K – kapital xarajatlar, C_e – yillik ekspluatatsiya xarajatlari, E – yillik ishlab chiqarish, i – diskontlash stavkasi, T = 20 yil – xizmat muddati. Hisoblar shuni ko‘rsatdiki, qurilma LCOE bo‘yicha dizel elektr stansiyalarining yoqilg‘i tashkil etuvchisi (0,19–0,25 dollar/kW·soat) bilan raqobatbardosh, shu sababli uni qo‘llashning eng samarali sohasi avtonom va uzoq iste’molchilar hamda shamol salohiyati yuqori bo‘lgan hududlar hisoblanadi.

XULOSA

Dissertatsiya ishida parraklarida magnit elementlari, induksion g‘altagi va machtasida fotoelektrik panellari bo‘lgan gibrid shamol-quyosh qurilmasini hamda iste’molchilarni avtonom elektr ta’minoti uchun uning energetik xarakteristikalarini

hisoblash uslubiyatini ishlab chiqish bo‘yicha ilmiy vazifa hal etilgan. Olingan asosiy ilmiy va amaliy natijalar quyidagilardan iborat.

1. Kichik quvvatli shamol va quyosh energetikasining zamonaviy holati, gibrid shamol-quyosh energiya qurilmalarining konstruksiyalari va ularning elektr ulanish sxemalari bo‘yicha tizimli tahlil, shuningdek 2002–2026 yillardagi himoya hujjatlari bo‘yicha patent-axborot tahlili bajarilgan va shu asosda fotoelektrik panellarni shamol qurilmasi konstruksiyasiga joylashtirish, rotorning magnit elementlari hamda umumiy o‘zgarmas tok shinasi alohida-alohida ma’lum ekanligi, ularning machtada panellarni spiral joylashtirish bilan birgalikdagi majmuasi esa ma’lum yechimlarda amalga oshirilmaganligi aniqlangan. Natijada ilmiy bo‘shliq belgilangan va tadqiqotning ilmiy vazifasi shakllantirilgan bo‘lib, uning yechimi Qozog‘iston janubiga xos bo‘lgan mo‘tadil shamol tezliklarida ixcham avtonom qurilmaning elektr energiyasi ishlab chiqarishini oshirishni ta’minlaydi.

2. Umumiy o‘zgarmas tok shinasi va energiya to‘plagichi bilan birlashtirilgan, elektr energiyasini ishlab chiqarishning uchta kanaliga ega gibrid shamol-quyosh qurilmasining konstruksiyasi ishlab chiqilgan, uning ishlash prinsipi ochib berilgan, energetik balans tenglamalari olingan va boshqaruv algoritmi bilan beshta ish rejimi aniqlangan. Natijada shunday texnik yechim olinganki, unda parraklarning magnit elementlari bir vaqtning o‘zida rotor tayanchlarini yuklamadan qisman bo‘shatadi va qo‘zg‘almas g‘altakda elektr yurituvchi kuchni induksiyalaydi, manbalar bilan yuklama orasidagi energiya o‘zgartirish bosqichlari soni esa bitta invertorlash bosqichigacha qisqartirilgan.

3. Rotorning magnit yordamida yuklamadan bo‘shatilishiga fizik asos berilgan bo‘lib, unga ko‘ra ishchi tirqishdagi induksiya 0,2–0,5 Tl bo‘lganda magnit bosimi 16–100 kPa ni tashkil etadi, bo‘shatish samarasi esa qarshilik momentidagi tayanchlar ishqalanishining ulushi bilan belgilanadi. Laboratoriya namunasida generator quvvatining 8–41 % ga ortishi tajriba yo‘li bilan olingan bo‘lib, mutlaq o‘sish 0,235 W darajasida amalda o‘zgarmas qolgan. Natijada magnit yordamida yuklamadan bo‘shatish rotorning ishga tushish tezligini 3,0 dan 2,4 m/s gacha kamaytirishi va shamol tezligi o‘rtacha 3 m/s bo‘lganda shamol kanalining ishlash soatlari sonini 33 % ga oshirishi ko‘rsatilgan, bu esa qurilmaning qo‘llanish sohasini shamoli kuchsiz hududlarga kengaytiradi.

4. Qo‘zg‘almas g‘altakda induksion tok hosil bo‘lish mexanizmi ochib berilgan, uning elektr yurituvchi kuchi, toki va quvvati uchun bog‘lanishlar hamda g‘altakning energetik maqsadga muvofiqlik sharti olingan bo‘lib, unga ko‘ra g‘altak o‘z zanjiri va to‘g‘rilagichi foydali ish koeffitsiyentlari ko‘paytmasi generator uchun shunday ko‘paytmadan ortgandagina ishlab chiqarishni oshiradi. Tajribada g‘altakning hissasi namunaning shamol kanali quvvatining 14–23 % ini tashkil etgan va oqim tezligi ortishi bilan ortib borgan. Natijada g‘altaklarni qo‘llashning

maqsadga muvofiq sohasi aniqlangan bo‘lib, unda o‘rtacha shamol tezligi 7–8 m/s bo‘lganda shamol kanalining yillik ishlab chiqarishi 9,4–13,1 % ga ortadi, 4–5 m/s da esa o‘sish 1,6 % dan oshmaydi.

5. Fotoelektrik panellarni machtada 137,5° oltin burchak bo‘yicha burchak qadami bilan sektorli spiral joylashtirish asoslangan va panellarning rotor hamda bir-biri bilan soyalanmasligi shartlari olingan bo‘lib, ularga ko‘ra rotorning chiqishi 0,5 m bo‘lganda vertikal tirqish 1,4 m dan, panellarning balandlik bo‘yicha qadami esa 0,46 m dan kam bo‘lmasligi kerak. Natijada janubiy yo‘nalish yillik nurlanishining 86,6 % i saqlab qolingan, to‘liq spiralda esa bu ko‘rsatkich 67,9 % ni tashkil etadi, bu umumiy quvvati 1,32 kW bo‘lgan o‘n ikkita panelda quyosh kanalining yillik ishlab chiqarishini taxminan 1936 kW·soat darajasida ta’minlaydi.

6. Qurilmaning nochiziqli matematik modeli, fizik parametrlar orqali ifodalangan mexanik bo‘g‘in, generator, g‘altak va fotoelektrik quyi tizimning uzatish funksiyalari, energiya to‘plagichli avtonom tizim tarkibidagi imitatsion modeli hamda iqlim ma’lumotlari bo‘yicha soatlik qadam bilan energetik xarakteristikalarni hisoblashning sakkiz qadamli uslubiyati ishlab chiqilgan. Laboratoriya namunasi sinovlari natijalari bo‘yicha verifikatsiya magnit yordamida yuklamadan bo‘shatish samarasi bo‘yicha hisobning tajribadan chetlanishi 3,4 foiz punkt, panellar quvvatining sutkalik o‘zgarishi bo‘yicha esa 8,4 % ekanligini ko‘rsatgan. Natijada konstruksiya parametrlari va hududning iqlim ma’lumotlari bo‘yicha har bir kanalning ishlab chiqarishini, yuklamani qoplash ulushini, o‘rnatilgan quvvatdan foydalanish koeffitsiyentini va quvvat tanqisligi ehtimolini imitatsion modeldan 0,2 % dan ortmaydigan chetlanish bilan aniqlash imkonini beruvchi hisob apparati olingan.

7. O‘xshashlik nazariyasi asosida laboratoriya namunasi xarakteristikalarini berilgan quvvatli qurilmaga qayta hisoblash tartibi ishlab chiqilgan va «Kentau transformator zavodi» AJ obyekti uchun fotoelektrik panellari 5,4 kW va energiya to‘plagichi 20 kW·soat bo‘lgan 10 kW quvvatli qurilma hisobi bajarilgan bo‘lib, uning yillik ishlab chiqarishi 16,6–29,4 MW·soat ni, iste’mol 30 MW·soat bo‘lganda yuklamani qoplash ulushi esa 47–66 % ni tashkil etadi. Natijada joriy etish dalolatnomasida ko‘rsatilgan elektr energiyasining 50 % gacha tejalishi tasdiqlangan, karbonat angidrid chiqindilarining yiliga 8,5–11,9 t ga kamayishi aniqlangan hamda elektr energiyasining keltirilgan tannarxi 0,155–0,376 dollar/kW·soat bo‘lganda qurilmani qo‘llashning eng samarali sohasi avtonom iste’molchilar va shamol salohiyati yuqori hududlar ekanligi, bunday sharoitlarda u dizel elektr stansiyalari bilan raqobatbardosh ekanligi belgilangan.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/2025.27.12.T.19.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ФЕРГАНСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

ФЕРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
МЕЖДУНАРОДНЫЙ КАЗАХСКО-ТУРЕЦКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ХОДЖИ АХМЕДА ЯСАВИ

БАБАХАН ШОХРУХ АБДИЛКАСЫМУЛЫ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБРИДНОГО ВЕТРО-СОЛНЕЧНОГО УСТРОЙСТВА

05.05.06 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ

Фергана – 2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № B2023.4.PhD/T4240.

Диссертация выполнена в Ферганском государственном техническом университете и Международном казахско-турецком университете имени Ходжи Ахмеда Ясави.

Автореферат диссертации на трех языках (русский, узбекский, английский) размещен на веб-странице Научного совета (www.fstu.uz) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель:	**Авезова Нилуфар Раббанакуловна** доктор технических наук, старший научный сотрудник
Официальные оппоненты:	**Матчанов Нураддин Азадович** доктор технических наук, старший научный сотрудник
	Вохидов Акмал Улашевич доктор философии (PhD) по техническим наукам
Ведущая organizatsia:	Ошский технологический университет (Республика Киргизстан)

Защита состоится «28» 11 2026 года в 1300 часов на заседании Научного совета PhD.03/2025.27.12.T.19.01 при Ферганском государственном техническом университете. (Адрес: 150100, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел.: (+99873) 241-12-06, факс: (+99873) 241-12-06, e-mail: ilmiy-kengash@fstu.uz, малый зал заседания).

С dissertatsieй можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ферганского государственного технического университета (зарегистрирована за №358). Адрес: 150100, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06.

Автореферат диссертации разослан «10» 11 2026 года.
(протокол рассылки №7 от «10» 11 2026 г.)

У.Р. Саломов
Председатель научного совета по присуждению ученых степеней, д.т.н., проф.

А.А. Кучкаров
Ученый секретарь научного совета по присуждению ученых степеней, PhD, доцент

Л.К. Мамадалиева
Председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.т.н., проф.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность диссертационной темы. В мире, в условиях развития децентрализованных систем электроснабжения, повышается интерес к применению гибридных ветро-солнечных энергоустановок, использующих возобновляемую энергию ветра и солнечного излучения. Учитывая, что гибридные ветро-солнечные установки за счёт взаимного дополнения ветрового и солнечного ресурсов обеспечивают надёжное покрытие электрической нагрузки без расхода органического топлива, особенно в составе автономных систем малой мощности, такие системы находят широкое применение в различных отраслях. С точки зрения того факта, что суммарная установленная мощность объектов возобновляемой энергетики в мире достигла 5149 ГВт при годовом приросте порядка 15,5 %[15], такие энергетические установки на возобновляемых источниках являются эффективным решением для повышения энергоэффективности. При этом разработка гибридного ветро-солнечного устройства, повышающего выработку электроэнергии при умеренных скоростях ветра и переменной солнечной радиatsii, считается актуальной.

В мире проводятся научные исследования, направленные на повышение эффективности гибридных ветро-солнечных энергоустановок за счёт снижения механических потерь ротора, совмещённого размещения фотоэлектрических панелей на конструкции ветроустановки и сокращения ступеней преобразования энергии. При этом особое внимание уделяется разработке и оптимизации конструктивно-режимных параметров таких устройств с целью обеспечения устойчивой выработки электрической энергии при низких скоростях ветра и переменной облачности[16]. Кроме того, особое внимание уделяется математическому моделированию энергетического баланса гибридных установок и экспериментальной верификatsii расчётных моделей в лабораторных и натурных условиях.

В стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы поставлены задачи, в том числе «..бесперебойное обеспечение экономики электроэнергией, активное внедрение технологий «Зелёной экономики» во все сферы, увеличение энергоэффективности экономики на 20 процентов»[17]. Для выполнения поставленных задач, в частности, строительство новых и

---

[15] Renewable capacity statistics 2026. Abu Dhabi, International Renewable Energy Agency (IRENA), 2026.

[16] Anugrah R.A., Budiman Y., Widyianto A., Hadi A., Novanto H.S., Yudianto A. Novel construction of hybrid wind turbine with solar panels. A comprehensive analysis through experimental study and numerical simulation // Cleaner Energy Systems. 2026. Vol. 13. 100242. DOI 10.1016/j.cles.2026.100242.

[17] Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» // Собрание законодательства Республики Узбекистан, 01.05.2021 г., № 06/21/6217/0409

модернизация существующих производств на основе возобновляемых источников энергии, в том числе разработка гибридного ветро-солнечного устройства с магнитными элементами лопастей, индукционной катушкой и фотоэлектрическими панелями на мачте и методика расчёта их энергетических характеристик для автономного электроснабжения потребителей важно проводить научные исследования, направленные на решение этих вопросов, являющиеся востребованными.

Постановления Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № ПФ-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы»[18], от 22 августа 2019 года № ПК-4422 «О срочных мерах по повышению энергетической эффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии»[19], от 10 июля 2020 года № ПК-4779 «О дополнительных мерах по повышению энергетической эффективности экономики и снижению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетических продуктов путём привлечения имеющихся ресурсов»[20] и другие нормативно-правовые документы, относящиеся к данной деятельности, определяют задачи, реализatsii которых в определённой степени служит данное диссертatsionное исследование.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан IV–«Развитие методов использования возобновляемых источников энергии, создание технологий и устройств на основе нанотехнологии, фотоники и других передовых технологий», а также согласно «Концепции развития высшего образования и науки в Республике Казахстан на 2023–2029 годы».

Степень изученности проблемы. Вопросами повышения энергетической эффективности и надёжности ветроэнергетических и гибридных ветро-солнечных установок, включая установки малой мощности с совмещёнными фотоэлектрическими панелями, за рубежом занимались A. Betz, J.F. Manwell, T. Burton, E. Hau, S. Heier[21], J.A. Duffie, W.A. Beckman,

[18] Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы». URL https://lex.uz

[19] Постановление 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». URL https://lex.uz

[20] Постановление Президента Республики Узбекистан от 10 июля 2020 года № ПП-4779 «О дополнительных мерах по сокращению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетической продукции путём повышения энергоэффективности экономики и задействования имеющихся ресурсов». URL https://lex.uz

[21] Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L. Wind Energy Explained. Theory, Design and Application. 2nd ed. Chichester, Wiley, 2009. 689 p.

H. Yang, T. Lambert, N.J. Dekker, R.A. Anugrah, S. Budea[22] и др. Кроме того, значительный вклад в развитие данной области внесли П.П. Безруких, В.В. Елистратов, О.С. Попель, Б.В. Лукутин, Е.В. Соломин[23], S. Earnshaw и J.G. Slootweg, работы которых направлены на построение моделей ветроколеса и генератора, обоснование комбинированных энергокомплексов на основе ВИЭ, магнитную разгрузку роторов и оптимизatsiю состава гибридных систем.

Среди казахских исследователей следует отметить Н.Т. Рустамова, А.Т. Мейрбекова, Б.С. Абдрасилова, К.С. Мейрамкулову, О.Д. Меирбекову, Б. Алиярова и других учёных, внёсших существенный вклад в развитие теоретических и прикладных аспектов создания и совершенствования гибридных ветроэнергетических установок. [24] Их работы направлены на повышение энергетической эффективности ветроустановок, снижение механических потерь ротора и разработку конструкций с магнитными элементами лопастей, защищённых охранными документами Республики Казахстан.[25]

В Узбекистане вопросы преобразования энергии ветра и солнечного излучения и повышения эффективности гибридных энергоустановок также являются приоритетным направлением исследований. Значительный вклад в данную область внесли Р.А. Захидов, А.Ш. Арифжанов [26] , Р.Р. Авезов, Н.Р. Авезова, О.З. Тоиров[27], Г.Н. Узаков, М.А. Маматкосимов, Э.Ю. Рахимов, которые занимаются вопросами подключения источников на основе ВИЭ к распределительным сетям, снижения потерь в асинхронных генераторах ветроустановок, моделирования процессов генератsii и расчёта конструктивных параметров гибридных ветро-солнечных установок.[28]

Таким образом, анализ научных источников показывает, что, несмотря на значительный прогресс в области гибридных ветро-солнечных энергоустановок, остаются нерешённые задачи, связанные с физическим обоснованием магнитной разгрузки ротора и генерации индукционного тока в неподвижной катушке, законом размещения фотоэлектрических панелей на

[22] Budea S., Maravela G.L., Florea G.-F., Mihai A., Voicu I. Design and the operation analysis of a hybrid solar wind system for sustainable urban energy // Energies. 2025. Vol. 18, No. 23. 6362. DOI 10.3390/en18236362.
[23] Соломин Е.В. Масштабируемые гибридные ветросолнечные установки малой мощности // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 2 (106). С. 49–60.
[24] Rustamov N., Babakhan Sh., Naci G., Kibishov A., Meirbekova O. An improved hybrid wind power plant for small power generation // International Journal of Renewable Energy Research. 2023. Vol. 13, No. 2. P. 629–635.
[25] Абдрасилов Б.С., Мейрбеков А.Т., Рустамов Н.Т., Мейрамкулова К.С., Бабахан Ш.А. Гибридный ветрогенератор. Патент РК на полезную модель № 6142 от 11.06.2021.
[26] Arifjanov A.Sh., Zakhidov R.A. Grid connection management of distributed generators on the basis of renewable energy sources // Applied Solar Energy. 2017. Vol. 53, No. 4.
[27] Toirov O., Taniev M., Hamdamov M., Sotiboldiev A. Power losses of asynchronous generators based on renewable energy sources // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 434. 01020. DOI 10.1051/e3sconf/202343401020.
[28] Авезова Н.Р., Тоиров О.З., Рустамов Н.Т., Бабахан Ш.А. Гибридная ветро-солнечная установка для автономного электроснабжения. Часть 1. Конструкция и расчёты основных параметров // Проблемы информатики и энергетики. 2024. № 6. С. 36–53.

мачте без взаимного затенения и расчётом энергетических характеристик устройства с тремя каналами выработки, что определяет актуальность дальнейших исследований в данном направлении.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертatsionное исследование выполнено в соответствии с планами научно-исследовательских работ по научному направлению «Возобновляемые источники энергии» кафедры «Электроинженерия» факультета Инженерии Международного казахско-турецкого университета имени Ходжи Ахмеда Ясави и кафедры «Электроники и приборостроения» факультета «Энергетической инженерии» Ферганского государственного технического университета, а также в рамках фундаментального проекта ФЗ-2020100661 «Теоретико-вычислительные и прикладные исследования комбинированных систем накопления и преобразования энергии для обоснования оптимальных конфигураций автономных фотоэлектрических станций для энергоснабжения потребителей в различных природно-климатических регионах Узбекистана» (2021–2025).

Целью исследования является разработка гибридного ветро-солнечного устройства с магнитными элементами лопастей, индукционной катушкой и фотоэлектрическими панелями на мачте и методика расчёта его энергетических характеристик для автономного электроснабжения потребителей.

Задачи исследования:

анализ современного состояния гибридных ветро-солнечных энергоустановок и патентно-информационный анализ с обоснованием научного пробела и принципа совмещённой выработки энергии;

разработка конструкции и принципа работы гибридного ветро-солнечного устройства с обоснованием магнитной разгрузки ротора, генерации индукционного тока и спирального размещения фотопанелей на мачте;

разработка математической модели и методики расчёта энергетических характеристик устройства с применением аппарата передаточных функций;

экспериментальные исследования лабораторного образца устройства с верификацией разработанной модели и расчётная оценка энергетических характеристик устройства заданной мощности в природно-климатических условиях юга Казахстана.

Объектом исследования является гибридное ветро-солнечное устройство с горизонтальной осью вращения на основе ветрогенератора, индукционной катушки и фотоэлектрических панелей, объединённых общей шиной постоянного тока.

Предметом исследования являются процессы преобразования энергии ветрового потока и солнечного излучения в электрическую энергию в гибридном устройстве, формирование и суммирование токов генератора, индукционной катушки и фотоэлектрических панелей, а также методы расчёта энергетических характеристик устройства.

Методы исследования. В ходе выполнения работы использовались методы системного анализа, методы аэродинамики и теории электрических машин, методы теории электромагнитного поля, методы расчёта солнечного излучения и имитационного моделирования в среде MATLAB/Simulink, теория передаточных функций, а также методы лабораторного эксперимента с оценкой неопределённости измерений.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработана усовершенствованная конструкция гибридного ветро-солнечного устройства на основе магнитных элементов лопастей, неподвижной индукционной катушки и секторного спирального размещения фотоэлектрических панелей на мачте с шагом по золотому углу 137,5°, позволяющая исключить взаимное затенение панелей и сохранить 86,6 % годового облучения южной ориентации;

разработана динамическая математическая модель устройства на основе передаточных функций ветрового модуля, индукционной катушки и фотоэлектрической подсистемы, выраженных через физические параметры, позволяющая рассчитывать переходные процессы при двух входных воздействиях и обеспечивающая оценку устойчивости ветрового канала с постоянной времени около 5,5 с;

усовершенствована методика расчёта энергетических характеристик устройства на основе часовых климатических данных с учётом магнитной разгрузки опор ротора и условия энергетической целесообразности индукционной катушки, позволяющая обоснованно выбирать параметры устройства, при которых скорость трогания ротора снижается с 3,0 до 2,4 м/с, а годовая выработка ветрового канала возрастает на 9,4–13,1 %;

разработано энергоэффективное гибридное ветро-солнечное устройство с общей шиной постоянного тока и тремя каналами выработки электроэнергии, позволяющее за счёт частичной магнитной разгрузки опор ротора и наведения ЭДС в неподвижной катушке увеличить мощность генератора на 8–41 % при вкладе индукционной катушки 14–23 % и повысить долю покрытия электрической нагрузки объекта до 66 %.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан и создан экономически выгодный и устойчивый для автономного электроснабжения удалённых потребителей лабораторный

образец гибридного ветро-солнечного устройс[29] обеспечивающий совместную выработку электроэнергии асинхронным генератором, индукционной катушкой и фотопанелью на общую шину постоянного тока при скоростях воздушного потока от 4 до 16 м/с;

расчётно-экспериментальным путём обосновано, что применение магнитных элементов лопастей, индукционных катушек и фотоэлектрических панелей на мачте в устройстве мощностью 10 кВт позволяет довести годовую выработку до 16,6–29,4 МВт·ч и долю покрытия нагрузки до 47–66 %, а также обеспечить сокращение выбросов CO_2 на 8,5–11,9 т в год.

Достоверность результатов исследования объясняется взаимосвязью аэродинамических, электромагнитных и энергетических показателей гибридного ветро-солнечного устройства, соответствием расчётных результатов данным экспериментальных испытаний, в которых среднее отклонение расчётного прироста мощности за счёт магнитной разгрузки от экспериментального составляет 3,4 процентного пункта, согласованием суточного хода мощности фотопанели с расчётной моделью с нормированным отклонением 8,4 % при расширенной неопределённости приборной составляющей 1,8 % и коэффициенте охвата $k = 2$, а также тем, что полученные результаты не противоречат основным законам электромеханики.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в развитии теории расчёта гибридных ветро-солнечных энергоустановок, а также в разработке математической модели, позволяющей оценивать влияние магнитной разгрузки ротора, параметров индукционной катушки, закона размещения фотопанелей на мачте, режима нагрузки и климатических условий на эффективность системы.

Практическая значимость результатов исследования определяется разработкой гибридного ветро-солнечного устройства, включающего ветроколесо с магнитными элементами лопастей, индукционную катушку, фотоэлектрические панели на мачте и общую шину постоянного тока с накопителем. Применение данной установки позволяет обеспечить годовую выработку до 29,4 МВт·ч при мощности 10 кВт, снизить скорость трогания ротора до 2,4 м/с, повысить мощность генератора до 41 % и заместить до 50 % сетевой электроэнергии на нужды административного здания в течение года.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов, полученных по разработке гибридного ветро-солнечного устройства и методики расчёта его энергетических характеристик:

[29] Рустамов Н.Т., Мейрбеков А.Т., Бабахан Ш.А. Гибридная ветро-солнечная электростанция. Патент Республики Казахстан на полезную модель № 7391 от 19.05.2023.

гибридная энергетическая система на базе ветроустановки для автономного электроснабжения, концептуальный подход к её эксплуатации, а также алгоритм поддержания баланса между вырабатываемой и потребляемой мощностью использованы при выполнении инновационного проекта № IL-4821091630 «Создание нового автоматического устройства, передающего стабильную электрическую мощность постоянной частоты в локальную энергетическую систему при изменении параметров потоков ветра и воды» на 2022–2024 годы, выполненного в рамках Государственной научно-технической программы в Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова (Справка Центра исследований развития высшего образования Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан № 02/01-01-366 от 23 сентября 2025 года). В результате разработана гибридная энергетическая установка на основе энергии ветра и воды, а также созданы функциональная схема системы автоматического управления, регулирующей частоту вращения асинхронного генератора при изменении скорости ветра, и система контроля и управления, обеспечивающая нормативные значения показателей качества электроэнергии;

конструкция гибридного ветро-солнечного устройства (FAP № 6142) и методика расчёта его энергетических характеристик использованы при разработке учебного пособия «Ветроэнергетика» в соответствии со свидетельством № 02-2023-0135, утверждённым решением Совета Ташкентского государственного технического университета № 5 от 12 августа 2023 года (Справка Центра исследований развития высшего образования Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан № 02/01-01-366 от 23 сентября 2025 года). В результате результаты исследования включены в содержание учебных программ дисциплин «Ветроэнергетика» и «Энергетические системы и установки использования солнечной энергии» направления бакалавриата «Альтернативные источники энергии» и соответствующих магистерских специальностей.

Апробация результатов исследования. Основные результаты данного исследования были доложены и обсуждены на 8 международных научно-практических конференциях, проведённых в Республике Казахстан и Республике Узбекистан.

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 24 научные работы, из них 13 научных статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан и Республики Казахстан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, в том числе 2 статьи в зарубежных журналах, реферируемых в

базе данных Scopus, а также получены 2 патента Республики Казахстан на полезную модель.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объём диссертации составляет 120 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, отмечено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, приведены результаты анализа степени изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, указаны объект, предмет и методы исследования, изложена научная новизна, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их научная и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также о структуре и объёме диссертации.

Первая глава диссертации «Современное состояние и научные основы повышения эффективности гибридных ветро-солнечных энергоустановок» посвящена анализу современного состояния и тенденций развития ветровой и солнечной энергетики малой мощности, сравнительному анализу конструкций гибридных установок и схем их сопряжения, оценке ветроэнергетического и гелиоэнергетического потенциала юга Казахстана и патентно-информационному анализу.

Установлено, что каждая дополнительная ступень преобразования энергии снижает итоговую мощность, которая при КПД инвертора 0,85 и КПД распределительной сети 0,95 суммарный коэффициент передачи составляет около 0,8, и от установки мощностью 3 кВт потребитель получает не более 2,4 кВт. Пусковая скорость ветра серийных малых ВЭУ составляет 2–4 м/с, поэтому при умеренных ветрах значительная часть времени приходится на режим простоя.

Сравнение схем сопряжения показало, что для автономной установки с несколькими разнородными генерирующими элементами наиболее patsiональна общая шина постоянного тока. Она в свою очередь сокращает число ступеней преобразования, не требует синхронизации источников по частоте и фазе и упрощает подключение накопителя. Патентно-информационный анализ охранных документов Германии, США, России, Казахстана и международных заявок за 2002–2026 годы показал, что размещение фотоэлектрических панелей на конструкции ветроустановки, магнитные элементы в роторе и общая шина постоянного тока известны по отдельности, однако их совокупность со спиральным размещением панелей на

мачте не реализована. Наиболее близким аналогом является патент Республики Казахстан на полезную модель № 7391, соавтором которого является соискатель.

Вторая глава диссертации «Конструкция и теоретическое обоснование принципа работы гибридного ветро-солнечного устройства» посвящена формированию концептуальной схемы устройства, раскрытию физического механизма магнитной разгрузки и генерации индукционного тока, а также обоснованию закона размещения фотопанелей на мачте.

Общий вид разработанного устройства приведён на Рис. 1. Устройство включает трёхлопастное ветроколесо с горизонтальной осью вращения, на лопастях которого закреплены постоянные магниты, а на гондоле установлена неподвижная индукционная катушка. На мачте по спиральному закону размещены фотоэлектрические панели. Устройство защищено патентами Республики Казахстан на полезную модель № 6142 и № 7391.

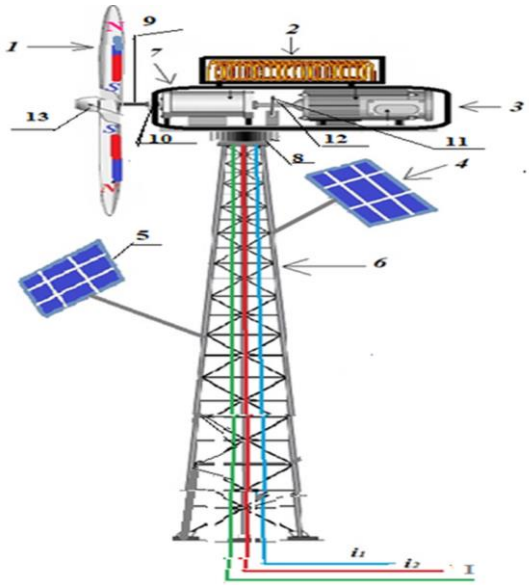


Рис. 1. Общий вид гибридного ветро-солнечного устройства: 1 – лопасть с магнитным элементом, 2 – индукционная катушка, 3 – генератор, 4, 5 – фотоэлектрические панели, 6 – мачта, 7 – мультипликатор, 8 – опорно-поворотное устройство, 9 – ступица, 10 – муфта, 11 – механический тормоз, 12 – вал генератора, 13 – обтекатель, i_1 – ток генератора, i_2 – ток индукционной катушки, I – ток фотоэлектрических панелей (патенты Республики Казахстан на полезную модель № 6142 и № 7391)

Устройство вырабатывает электроэнергию тремя независимыми каналами (Рис. 2). Первый канал образован асинхронным генератором, второй - индукционной катушкой, третий - фотоэлектрическими панелями на мачте. После выпрямления и согласования все три тока суммируются на общей шине.

Мощность, поступающая на общую шину постоянного тока, определяется суммой мощностей трёх каналов с учётом КПД соответствующих преобразователей:

$$P_{\text{ш}} = P_1\eta_{\text{в1}} + P_2\eta_{\text{в2}} + P_{\text{ф}}\eta_{\text{п}} \qquad (1)$$

где P_1 – электрическая мощность генератора, (Вт), P_2 – мощность индукционной катушки, (Вт), $P_ф$ – мощность фотоэлектрических панелей, (Вт), $\eta_{в1}, \eta_{в2}$ – КПД выпрямителей, $\eta_п$ – КПД преобразователя фотопанелей.

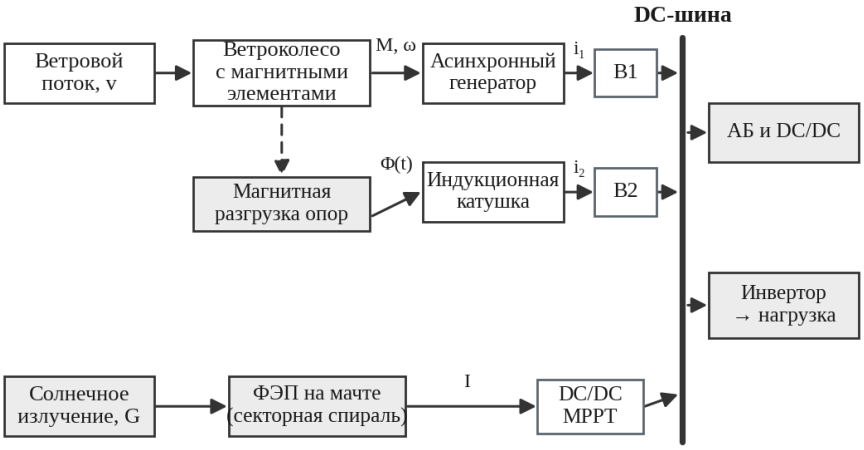


Рис. 2. Функциональная схема преобразования энергии в гибридном ветро-солнечном устройстве: B1, B2 – выпрямители, MPPT – преобразователь со слежением за точкой максимальной мощности, АБ – аккумуляторная батарея

Узел магнитной разгрузки опор ротора показан на Рис. 3. Согласно теореме Ирншоу система из одних только постоянных магнитов не может обеспечить устойчивое равновесие тела по всем степеням свободы, поэтому в устройстве реализуется не полная levitatsia ротора, а частичная магнитная разгрузка опор.

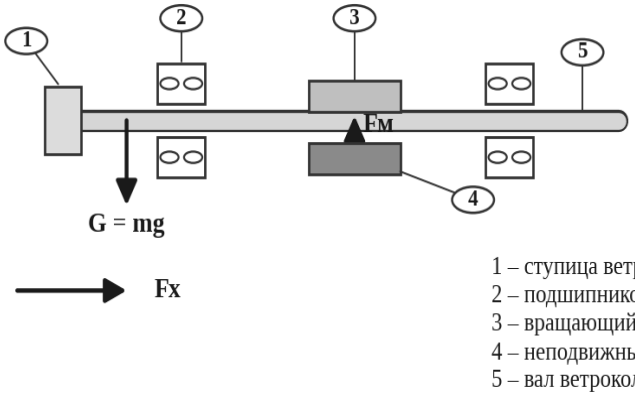


Рис. 3. Схема узла магнитной разгрузки опор ветроколеса: G – сила тяжести ротора, $F_м$ – сила магнитного отталкивания, F_x – осевая сила ветрового потока

Давление магнитного поля на поверхность и изменение скорости трогания в зависимости от степени разгрузки определяются соответственно выражениями:

$$p_м = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (2)$$

$$\frac{v_{тр}}{v_{тр0}} = \sqrt{1 - x\delta} \quad (3)$$

где B – магнитная индукция в зазоре, (Тл), μ_0 – магнитная постоянная, $x = F_м/G$ – степень разгрузки опор, δ – доля трения опор в моменте сопротивления.

Расчёты показали, что при индукции в зазоре 0,2–0,5 Тл магнитное давление составляет 16–100 кПа, и для разгрузки ротора массой 10 кг достаточно площади магнитов 20–55 см².

Индукционная катушка является вторым генерирующим элементом устройства. При прохождении магнитных элементов лопастей мимо торца катушки в её витках наводится ЭДС (Рис. 4):

$$E_{\text{м}} \approx \frac{(N\, B_{\text{г}}\, S_{\text{г}}\, \omega\, r_{\text{м}})}{b_{\text{м}}} \qquad (4)$$

где N – число витков катушки, $B_к$ – средняя индукция магнитного поля в плоскости торца катушки, (Тл), $S_к$ – площадь витка, (м²), ω – угловая скорость ротора, (рад/с), $r_м$ – радиус установки магнитов, (м), $b_м$ – протяжённость зоны взаимодействия, (м).

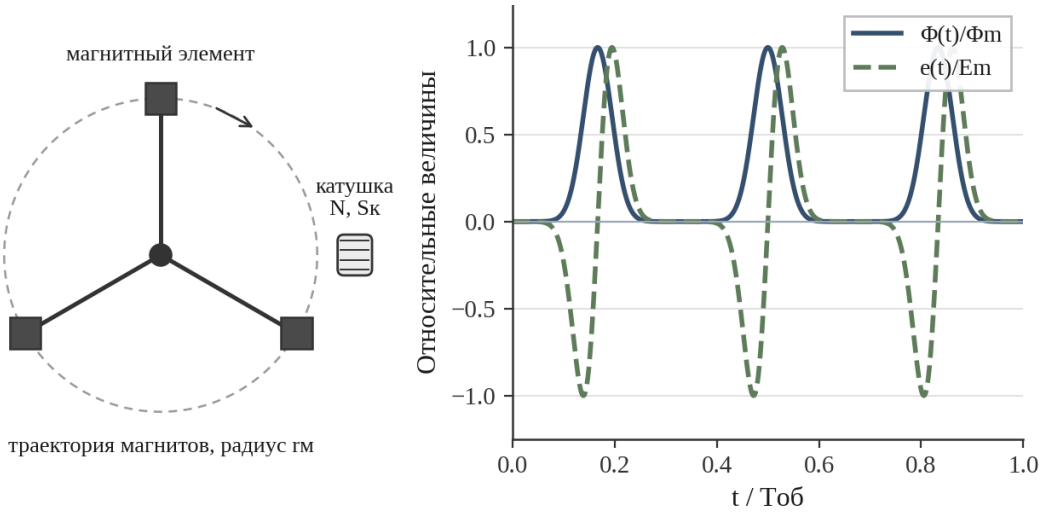


Рис. 4. Схема взаимного расположения магнитных элементов лопастей и индукционной катушки (слева) **и форма магнитного потока и ЭДС катушки за один оборот ветроколеса при трёх магнитных элементах** (справа)

Из (4) следует, что при работе ветроколеса с постоянной быстроходностью амплитуда ЭДС катушки возрастает приблизительно линейно со скоростью ветра, что связывает режим генератsii катушки с ветровым режимом.

Для размещения фотоэлектрических панелей на мачте предложена секторная спираль с шагом по золотому углу ($\psi_0 \approx 137{,}5°$), при которой азимуты отображаются на сектор, симметричный относительно направления на юг:

$$A_k = A_0 + \Delta\left\{\frac{((k-1)\psi_0)}{360°}\right\}, k = 1,2,\ldots,n_{\text{ф}} \qquad (5)$$

где A_k – азимут k-й панели, A_0 – азимут начала сектора, Δ – ширина сектора, Схемы размещения двенадцати панелей по полной и секторной спирали показаны на Рис. 5, а сравнительная оценка вариантов приведена в Табл. 1.

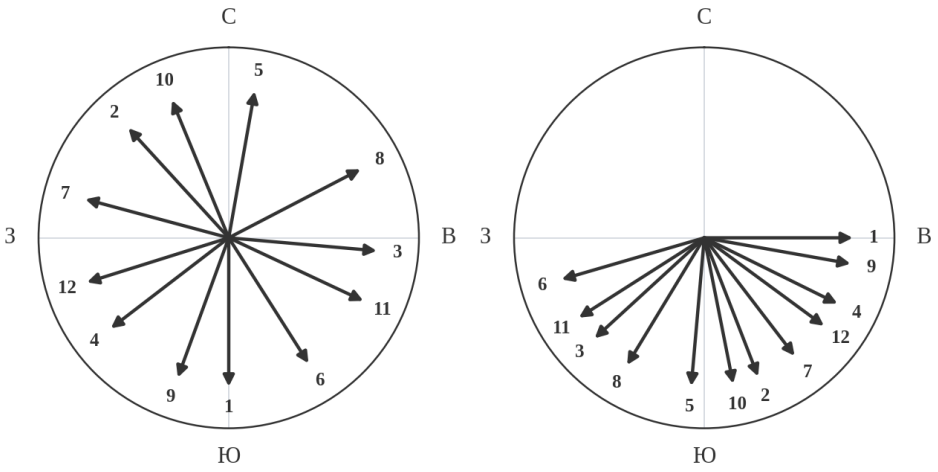


Рис. 5. Азимуты двенадцати фотоэлектрических панелей (вид сверху, цифры – номер панели сверху вниз)**: а – полная спираль с шагом 137,5°, б – секторная спираль по формуле (5) при Δ = 180°**

Таблица 1

Сравнительная оценка вариантов размещения двенадцати фотоэлектрических панелей на мачте (г. Туркестан, β = 50°)

Показатель	Все панели на юг	Полная спираль	Секторная спираль
Годовое облучение на панель, кВт·ч/м²	2296	1559	1989
Относительное облучение, %	100	67,9	86,6
Доля облучения в 6–10 ч, %	16,4	19,2	20,3
Взаимное затенение соседних панелей	требует большого шага	минимальное	минимальное

Третья глава диссертации «Математическая модель и методика расчёта энергетических характеристик гибридного ветро-солнечного устройства» посвящена разработке нелинейной математической модели устройства, линеаризованной модели в форме передаточных функций, имитационной модели в среде MATLAB/Simulink и методики расчёта энергетических характеристик.

Расчётная схема замещения устройства со стороны шины постоянного тока, объединяющая три источника тока, накопитель и нагрузку, приведена на Рис. 6.

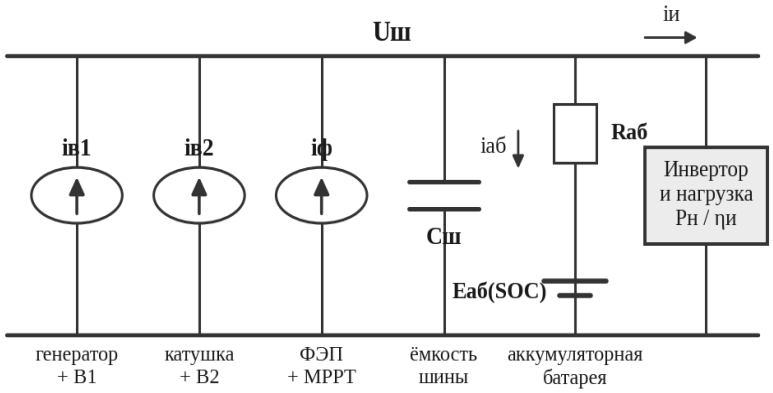


Рис. 6. Расчётная схема замещения гибридного ветро-солнечного устройства со стороны шины постоянного тока

В результате линеаризации модели в окрестности установившегося режима получены передаточные функции механического звена, генератора, катушки и фотоэлектрической подсистемы. Эквивалентная передаточная функция ветрового канала определяется последовательным соединением механического звена с параллельно соединёнными звеньями генератора и катушки:

$$W_{\text{м}(p)} = \frac{k_\omega}{T_\text{м} p + 1} \tag{6}$$

$$W_{\text{в}(p)} = W_{\text{м}(p)} \left[\eta_{(\text{в}1)} W_{1(p)} + \eta_{(\text{в}2)} W_{2(p)} \right] \tag{7}$$

где $T_м$ = J/Вэ – электромеханическая постоянная времени ветрового модуля, $k_ω$ – коэффициент передачи механического звена. Для расчётного примера в режиме v_0 = 6 м/с получены значения $T_м$ = 5,46 с и $W_v(0)$ = 179 Вт/(м/с). Все полюсы передаточной функции вещественные и отрицательные, что подтверждает асимптотическую устойчивость ветрового канала, а постоянная времени цепи катушки составляет доли миллисекунды. При этом условие энергетической целесообразности индукционной катушки имеет вид:

$$\eta_\text{г} \eta_{\text{в}2} > \eta_\text{ген} \eta_{\text{в}1} \tag{8}$$

то есть катушка увеличивает выработку в режимах ниже номинальной скорости ветра только при условии, что произведение КПД её цепи и выпрямителя превышает аналогичное произведение для генератора. Выше номинальной скорости генератор ограничен номинальной мощностью, и катушка осваивает избыточную мощность ветроколеса.

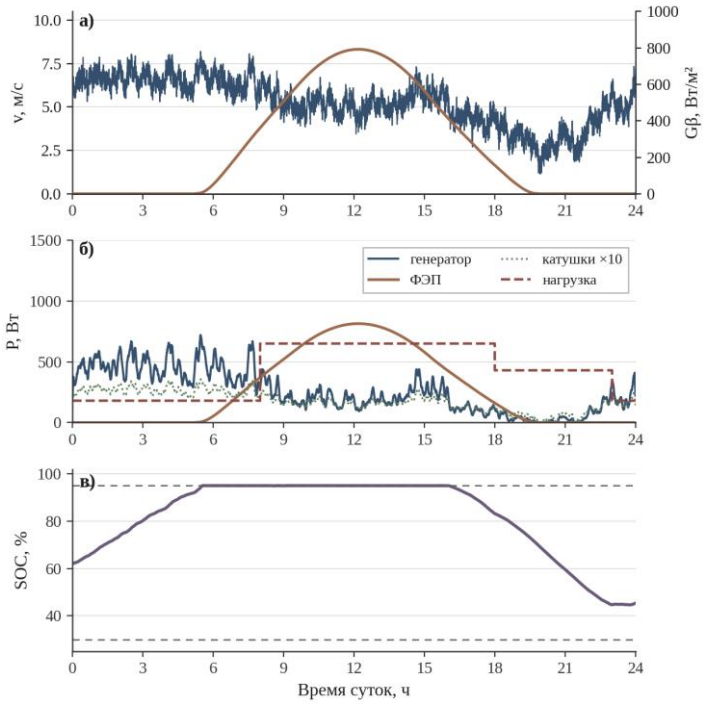


Рис. 7. Результаты суточного моделирования: а) скорость ветра и облучение панелей, б) мощности генератора, фотоэлектрических панелей, катушек (в масштабе ×10) и нагрузки, в) степень заряда аккумуляторной батареи

Результаты суточного имитационного моделирования для условий г. Туркестан приведены на Рис. 7. Моделирование показывает взаимодополнение ветрового и солнечного каналов, которая в ночные и утренние часы нагрузку покрывает ветровой канал, и аккумуляторная батарея заряжается, днём основную долю обеспечивают фотоэлектрические панели, а вечером нагрузка покрывается разрядом батареи.

Поскольку мощность ветрового потока пропорциональна кубу скорости, а средний куб скорости больше куба средней скорости, вводится поправка на турбулентность:

$$(v^3)_{\text{ср}} = \bar{v}^3 \cdot (1 + 3 \cdot I_{\text{т}}^2) \qquad (9)$$

где $I_т$ – интенсивность турбулентности. С поправкой методика отличается от имитatsionной модели не более чем на 0,2 %, без поправки занижает выработку на 2–3 %.

Для расчёта годовых энергетических характеристик разработана восьмишаговая методика, использующая часовые климатические данные (Рис. 8).

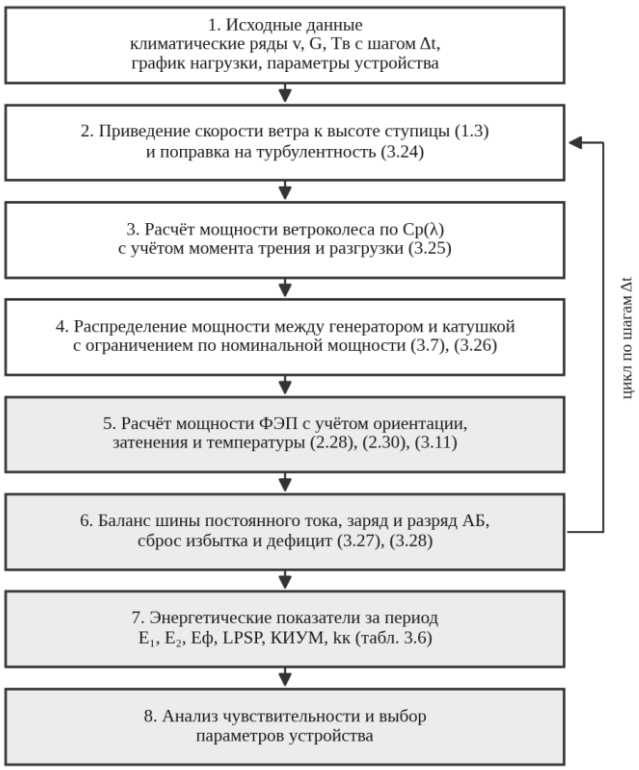


Рис. 8. Алгоритм методики расчёта энергетических характеристик гибридного ветро-солнечного устройства

Четвёртая глава диссертации «Экспериментальные исследования, верификация модели и оценка энергетических характеристик гибридного ветро-солнечного устройства» посвящена описанию лабораторного образца, измерительной системы, программы и методики исследований, оценке

неопределённости измерений, верификации модели и расчёту энергетических и энергоэкономических показателей устройства мощностью 10 кВт.

Лабораторный образец испытывался в двух конфигурациях: в конфигурации ВЭУ магнитные элементы с лопастей сняты, в конфигурации ВСЭУ они установлены и одновременно измеряются токи генератора и индукционной катушки. Скорость воздушного потока изменялась от 4 до 16 м/с. Результаты приведены на Рис. 9.

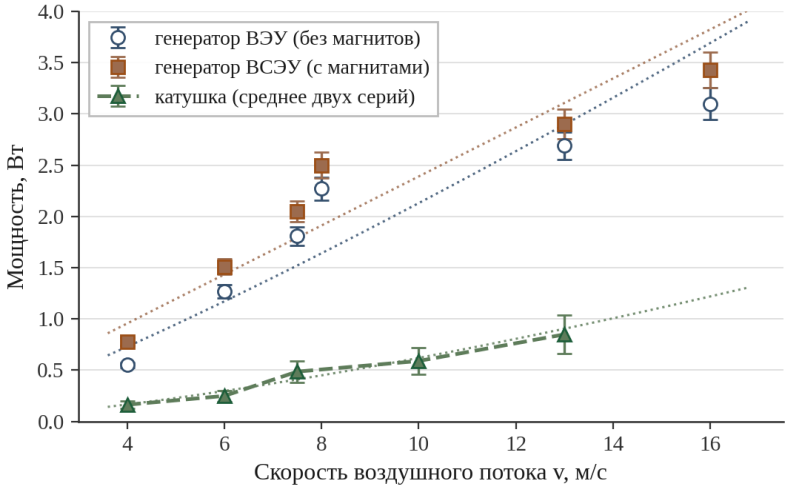


Рис. 9. Экспериментальные зависимости мощности генератора в конфигурациях ВЭУ и ВСЭУ и мощности индукционной катушки от скорости воздушного потока (точечные линии – степенные аппроксимации, вертикальные отрезки – расширенная неопределённость)

Экспериментально установлено, что в конфигурации ВСЭУ мощность генератора на 8–41 % выше, чем в конфигурации ВЭУ, при практически постоянном абсолютном приросте мощности, составляющем в среднем 0,235 Вт, что в свою очередь подтверждает вывод модели о том, что магнитная разгрузка уменьшает момент сопротивления и не изменяет аэродинамическую мощность ветроколеса (Рис. 10).

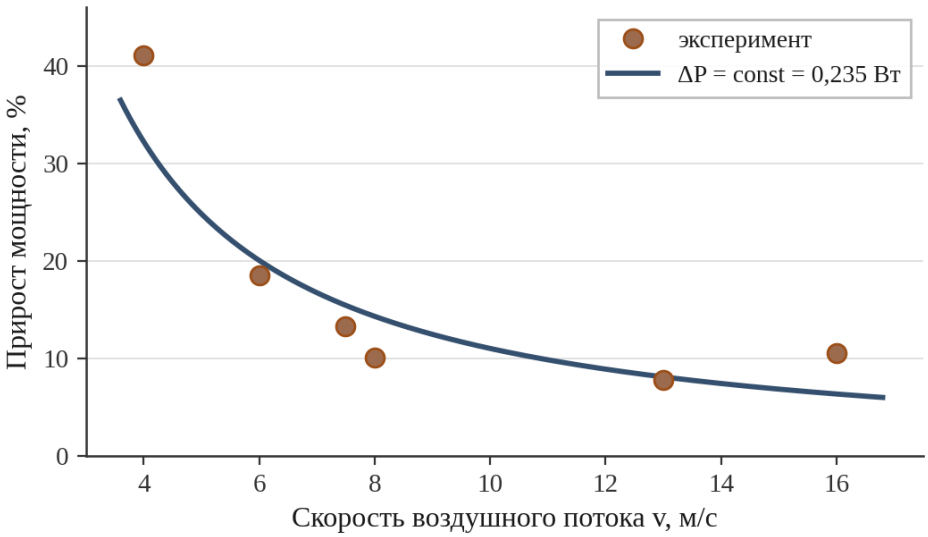


Рис. 10. Относительный прирост мощности генератора за счёт магнитных элементов. Точки – эксперимент, линия – расчёт при постоянном снижении потерь 0,235 Вт

Как видно из Рис. 10, вклад индукционной катушки составляет 14–23 % суммарной мощности ветрового канала и возрастает со скоростью потока. КПД цепи катушки составил 0,87–0,91, что близко к условию (8).

Далее на основе теории подобия характеристики лабораторного образца пересчитаны на устройство мощностью 10 кВт для объекта АО «Кентауский трансформаторный завод». Годовая выработка для г. Кентау рассчитана по двум сценариям ветрового режима — по реанализу MERRA-2 и по наблюдениям метеостанций (Рис. 11, табл. 2).

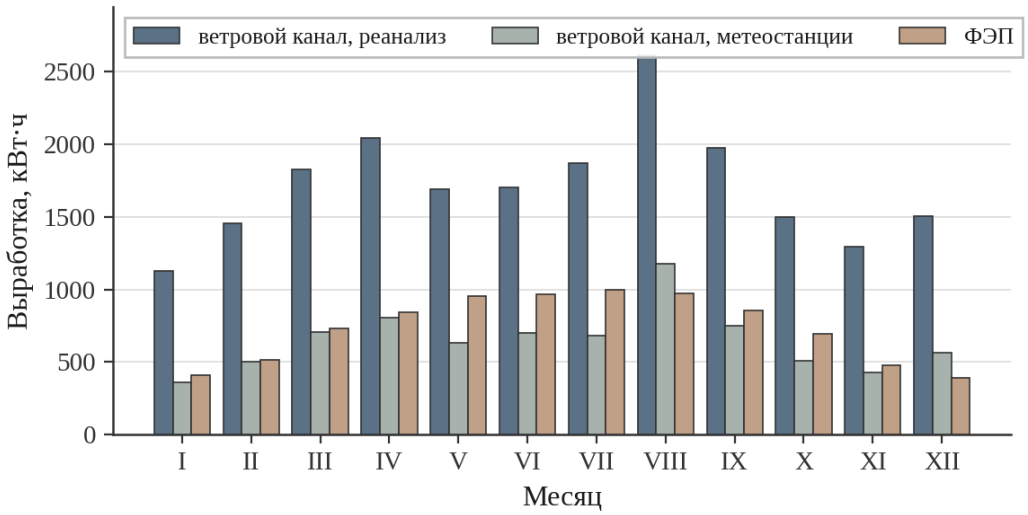


Рис. 11. Помесячная выработка ветрового канала и фотоэлектрических панелей устройства мощностью 10 кВт в условиях г. Кентау

Таблица 2

Годовые энергетические показатели гибридного ветро-солнечного устройства мощностью 10 кВт (годовое потребление объекта 30 МВт·ч)

Показатель	Реанализ MERRA-2	Сценарий по метеостанциям
Выработка генератора E_1, МВт·ч	19,62	7,35
Выработка индукционных катушек E_2, МВт·ч	0,98	0,46
Выработка фотоэлектрических панелей Еф, МВт·ч	8,80	8,80
Суммарная выработка, МВт·ч	29,40	16,61
Доля покрытия нагрузки, %	66,0	46,7
Коэффициент использования установленной мощности, %	21,8	12,3
Снижение выбросов CO_2, т/год	11,9	8,5

Энергоэкономическая эффективность оценивалась по нормированной стоимости электроэнергии по (10):

$$LCOE = \frac{K \cdot CRF + C_э}{E},\ CRF = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \qquad (10)$$

где K – капитальные затраты, $C_э$ – годовые эксплуатационные затраты, E – годовая выработка, i – ставка дисконтирования, T = 20 лет – срок службы. Расчёты показали, что устройство по LCOE конкурентоспособно с топливной составляющей стоимости электроэнергии дизельных электростанций (0,19–

0,25 долл./кВт·ч), поэтому областью наиболее эффективного применения являются автономные и удалённые потребители, а также районы с высоким ветровым потенциалом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научная задача разработки гибридного ветро-солнечного устройства с магнитными элементами лопастей, индукционной катушкой и фотоэлектрическими панелями на мачте, а также методики расчёта его энергетических характеристик для автономного электроснабжения потребителей. Основные научные и практические результаты состоят в следующем.

1. Выполнен системный анализ современного состояния ветровой и солнечной энергетики малой мощности, конструкций гибридных ветро-солнечных энергоустановок и схем их электрического сопряжения, а также патентно-информационный анализ охранных документов за 2002–2026 годы, по итогам которого установлено, что размещение фотоэлектрических панелей на конструкции ветроустановки, магнитные элементы ротора и общая шина постоянного тока известны по отдельности, тогда как их совокупность со спиральным размещением панелей на мачте в известных решениях не реализована. В результате определён научный пробел и сформулирована научная задача исследования, решение которой обеспечивает повышение выработки электроэнергии компактной автономной установкой при умеренных скоростях ветра, характерных для юга Казахстана.

2. Разработана конструкция гибридного ветро-солнечного устройства с тремя каналами выработки электроэнергии, объединёнными общей шиной постоянного тока с накопителем, раскрыт принцип его работы, получены уравнения энергетического баланса и определены пять режимов работы с алгоритмом управления. В результате получено техническое решение, в котором магнитные элементы лопастей одновременно разгружают опоры ротора и наводят электродвижущую силу в неподвижной катушке, а число ступеней преобразования энергии между источниками и нагрузкой сокращено до одной ступени инвертирования.

3. Дано физическое обоснование магнитной разгрузки ротора, согласно которому при индукции в рабочем зазоре 0,2–0,5 Тл магнитное давление составляет 16–100 кПа, а эффект разгрузки определяется долей трения опор в моменте сопротивления. Экспериментально на лабораторном образце получен прирост мощности генератора 8–41% при практически постоянном абсолютном приросте 0,235 Вт. В результате показано, что магнитная разгрузка снижает скорость трогания ротора с 3,0 до 2,4 м/с и увеличивает число часов работы ветрового канала на 33% при средней скорости ветра 3 м/с, что расширяет область применения устройства на районы со слабым ветром.

4. Раскрыт механизм генерации индукционного тока в неподвижной катушке, получены зависимости для её электродвижущей силы, тока и

мощности и условие энергетической целесообразности катушки, согласно которому катушка увеличивает выработку при превышении произведения коэффициентов полезного действия её цепи и выпрямителя над аналогичным произведением для генератора. Экспериментально вклад катушки составил 14–23% мощности ветрового канала образца и возрастает со скоростью потока. В результате определена область целесообразного применения катушек, в которой при средних скоростях ветра 7–8 м/с годовая выработка ветрового канала возрастает на 9,4–13,1%, тогда как при 4–5 м/с прирост не превышает 1,6%.

5. Обосновано секторное спиральное размещение фотоэлектрических панелей на мачте с угловым шагом по золотому углу 137,5° и получены условия отсутствия затенения панелей ротором и друг другом, согласно которым при вылете ротора 0,5 м вертикальный зазор должен быть не менее 1,4 м, а шаг панелей по высоте не менее 0,46 м. В результате достигнуто сохранение 86,6% годового облучения южной ориентации против 67,9% при полной спирали, что при двенадцати панелях общей мощностью 1,32 кВт даёт годовую выработку солнечного канала около 1936 кВт·ч.

6. Разработаны нелинейная математическая модель устройства, передаточные функции механического звена, генератора, катушки и фотоэлектрической подсистемы, выраженные через физические параметры, имитационная модель в составе автономной системы с накопителем и восьмишаговая методика расчёта энергетических характеристик по климатическим данным с часовым шагом. Верификация по результатам испытаний лабораторного образца показала отклонение расчёта от эксперимента 3,4 процентного пункта по эффекту магнитной разгрузки и 8,4% по суточному ходу мощности панелей. В результате получен расчётный аппарат, позволяющий по параметрам конструкции и климатическим данным местности определять выработку каждого канала, долю покрытия нагрузки, коэффициент использования установленной мощности и вероятность дефицита мощности с отклонением от имитatsionной модели не более 0,2%.

7. На основе теории подобия разработан порядок пересчёта характеристик лабораторного образца на устройство заданной мощности и выполнен расчёт устройства мощностью 10 кВт с фотоэлектрическими панелями 5,4 кВт и накопителем 20 кВт·ч для объекта АО «Кентауский трансформаторный завод», годовая выработка которого составляет 16,6–29,4 МВт·ч, а доля покрытия нагрузки при потреблении 30 МВт·ч составляет 47–66%. В результате подтверждена заявленная в акте внедрения экономия до 50% электроэнергии, определено снижение выбросов диоксида углерода на 8,5–11,9 т в год и установлено, что при приведённой стоимости электроэнергии 0,155–0,376 долл./кВт·ч наиболее эффективной областью применения устройства являются автономные потребители и районы с высоким ветровым потенциалом, где оно конкурентоспособно с дизельными электростанциями.

SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/2025.27.12.T.19.01 ON AWARD OF THE SCIENTIFIC DEGREES AT FERGANA STATE TECHNICAL UNIVERSITY

FERGANA STATE TECHNICAL UNIVERSITY
KHOJA AKHMET YASSAWI INTERNATIONAL KAZAKH-TURKISH UNIVERSITY

BABAKHAN SHOKHRUKH ABDILKASIMULI

ENERGY CHARACTERISTICS OF A HYBRID WIND-SOLAR DEVICE

05.05.06 – Power Plants Based on Renewable Energy Sources

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

Fergana – 2026

Theme of the dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under No. B2023.4.PhD/T4240.

The dissertation was prepared at Fergana State Technical University and the Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University.

The abstract of the dissertation is available in three languages (Uzbek, Russian, and English (resume)) on the website (www.fstu.uz) and on the Information and Educational Portal "ZiyoNet" (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor:	**Avezova Nilufar Rabbanakulovna** Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow
Official opponents:	**Matchanov Nuraddin Azadovich** Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow
	Vokhidov Akmal Ulashevich Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences
Lead organization:	Osh Technological University (Kyrgyz Republic)

Dissertation defense will take place "28" 11 2026 at 13⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council PhD.03/2025.27.12.T.19.01. at the Fergana State Technical Universitete (Address: 150100, Fergana, Fergana str., 86. Phone: (+99873) 241-12-06, fax (+99873) 241-12-06, e-mail: ilmiy-kengash@ferpi.uz, small meeting room).

The thesis can be found in the library of the Fergana State Technical Universitete. (registered under No. 358) Address: 150100, Fergana, st. Fergana, 86. Tel: (+99873) 241-12-06, e-mail: ilmiy-kengash@ferpi.uz.

Abstract of the dissertation sent out on "10" 11 2026.
(Registry record No. 7 on "10" 11 2026)

U.R. Salomov
Chairman of Scientific Council on award of scientific degrees, DSc, professor

A.A. Quchqarov
Scientific secretary of scientific council on award of doctor philosophy, PhD, docent

L.K. Mamadalieva
Chair of the Scientific Seminar under scientific council on award of doctor philosophy, DSc, professor.

INTRODUCTION (Abstract of PhD dissertation)

The aim of the research is the development of a hybrid wind-solar device with magnetic blade elements, an induction coil and photovoltaic panels mounted on the mast, as well as of a methodology for calculating its energy characteristics for the autonomous power supply of consumers.

The objectives of the research are:

an analysis of the current state of hybrid wind-solar power installations and a patent-information analysis substantiating the scientific gap and the principle of combined power generation;

the development of the design and the operating principle of a hybrid wind-solar device with substantiation of the magnetic unloading of the rotor, of induction current generation and of the spiral arrangement of photovoltaic panels on the mast;

the development of a mathematical model and of a methodology for calculating the energy characteristics of the device using the apparatus of transfer functions;

experimental studies of a laboratory prototype of the device with verification of the developed model and a computational assessment of the energy characteristics of a device of the specified capacity under the natural and climatic conditions of southern Kazakhstan.

The object of the research is a hybrid wind-solar device with a horizontal axis of rotation based on a wind generator, an induction coil and photovoltaic panels combined by a common direct-current bus.

The subject of the research comprises the processes of conversion of wind-flow and solar-radiation energy into electrical energy in the hybrid device, the formation and summation of the currents of the generator, the induction coil and the photovoltaic panels, as well as the methods of calculating the energy characteristics of the device.

The methods of research. The work employed methods of system analysis, methods of aerodynamics and of the theory of electrical machines, methods of electromagnetic field theory, methods of solar radiation calculation and of simulation modelling in the MATLAB/Simulink environment, the theory of transfer functions, and methods of laboratory experiment with an assessment of measurement uncertainty.

The scientific novelty of the research is as follows:

an improved design of a hybrid wind-solar device has been developed, based on magnetic blade elements, a stationary induction coil and a sectoral spiral arrangement of photovoltaic panels on the mast with a step equal to the golden angle of 137.5°, which eliminates mutual shading of the panels and retains 86.6 % of the annual irradiation of the southern orientation;

a dynamic mathematical model of the device has been developed on the basis of the transfer functions of the wind module, the induction coil and the photovoltaic subsystem expressed through physical parameters, which makes it possible to calculate transient processes under two input actions and provides an estimate of the stability of the wind channel with a time constant of about 5.5 s;

the methodology for calculating the energy characteristics of the device has been improved on the basis of hourly climatic data with allowance for the magnetic unloading of the rotor bearings and for the condition of energy expediency of the induction coil, which makes it possible to select the device parameters in a substantiated manner, at which the rotor cut-in wind speed decreases from 3.0 to 2.4 m/s and the annual output of the wind channel increases by 9.4–13.1 %;

an energy-efficient hybrid wind-solar device with a common direct-current bus and three channels of electricity generation has been developed, which, owing to the partial magnetic unloading of the rotor bearings and the induction of an EMF in the stationary coil, makes it possible to increase the generator power by 8–41 % with a contribution of the induction coil of 14–23 % and to raise the share of coverage of the electrical load of the facility up to 66 %.

The practical results of the research are as follows:

a cost-effective laboratory prototype of a hybrid wind-solar device[30], sustainable for the autonomous power supply of remote consumers, has been developed and built, which provides the joint generation of electricity by an asynchronous generator, an induction coil and a photovoltaic panel onto a common direct-current bus at air-flow velocities from 4 to 16 m/s;

it has been substantiated by computation and experiment that the use of magnetic blade elements, induction coils and photovoltaic panels on the mast in a device with a capacity of 10 kW makes it possible to bring the annual output up to 16.6–29.4 MWh and the share of load coverage up to 47–66 %, as well as to provide a reduction of CO_2 emissions by 8.5–11.9 t per year.

The reliability of the research results is explained by the interrelation of the aerodynamic, electromagnetic and energy indicators of the hybrid wind-solar device, by the agreement of the computational results with the data of experimental tests, in which the mean deviation of the calculated power increment due to magnetic unloading from the experimental one amounts to 3.4 percentage points, by the agreement of the daily variation of the photovoltaic panel power with the computational model with a normalised deviation of 8.4 % at an expanded uncertainty of the instrumental component of 1.8 % and a coverage factor k = 2, and

[30] Rustamov N.T., Meirbekov A.T., Babakhan Sh.A. Hybrid wind-solar power plant. Patent of the Republic of Kazakhstan for a utility model No. 7391 of 19.05.2023.

by the fact that the results obtained do not contradict the fundamental laws of electromechanics.

Scientific and practical significance of the research results. The scientific significance of the research results lies in the development of the theory of calculating hybrid wind-solar power installations, as well as in the development of a mathematical model that makes it possible to assess the influence of the magnetic unloading of the rotor, of the parameters of the induction coil, of the law of arrangement of the photovoltaic panels on the mast, of the load regime and of the climatic conditions on the efficiency of the system.

The practical significance of the research results is determined by the development of a hybrid wind-solar device comprising a wind wheel with magnetic blade elements, an induction coil, photovoltaic panels on the mast and a common direct-current bus with a storage battery. The application of this installation makes it possible to provide an annual output of up to 29.4 MWh at a capacity of 10 kW, to reduce the rotor cut-in speed to 2.4 m/s, to increase the generator power by up to 41 % and to replace up to 50 % of the grid electricity used for the needs of an administrative building during the year.

Implementation of the research results. On the basis of the results obtained on the development of the hybrid wind-solar device and of the methodology for calculating its energy characteristics:

the hybrid energy system based on a wind turbine for autonomous power supply, the conceptual approach to its operation, as well as the algorithm for maintaining a balance between generated and consumed power were used in the implementation of Innovation Project No. IL-4821091630 “Development of a New Automatic Device Supplying Stable Electrical Power at a Constant Frequency to a Local Power System under Varying Wind and Water Flow Parameters” for 2022–2024, carried out within the framework of the State Scientific and Technical Programme at Tashkent State Technical University named after Islam Karimov (Certificate No. 02/01-01-366 dated September 23, 2025, issued by the Center for Research on the Development of Higher Education under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan). As a result, a hybrid energy system based on wind and water energy was developed, together with a functional diagram of an automatic control system regulating the rotational speed of an asynchronous generator under varying wind speeds, and a monitoring and control system ensuring that power quality indicators comply with the established standards;

the design of the hybrid wind-solar energy system (Utility Model Patent No. 6142) and the methodology for calculating its energy performance characteristics were used in the development of the textbook “Wind Energy” in accordance with

Certificate No. 02-2023-0135, approved by Decision No. 5 of the Council of Tashkent State Technical University dated August 12, 2023 (Certificate No. 02/01-01-366 dated September 23, 2025, issued by the Center for Research on the Development of Higher Education under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan). As a result, the research findings were incorporated into the curricula of the courses “Wind Energy” and “Energy Systems and Installations for the Utilization of Solar Energy” within the bachelor’s degree programme in “Alternative Energy Sources” and the corresponding master’s degree programmes;

the hybrid wind-solar power plant equipped with magnetic blade elements, an induction coil, and photovoltaic panels mounted on the mast (Utility Model Patent No. 7391) was implemented at the facilities of JSC “Kentau Transformer Plant” in the Republic of Kazakhstan. As a result, approximately 50% savings in electricity consumed from the centralized grid for the needs of the enterprise’s administrative building over the course of a year were achieved, along with a reduction in carbon dioxide emissions of 8.5–11.9 tonnes per year.

Approbation of the research results. The main results of this research were reported and discussed at 8 international scientific and practical conferences held in the Republic of Kazakhstan and the Republic of Uzbekistan.

Publication of results. On the topic of the dissertation 24 scientific works have been published, including 13 scientific articles in journals recommended by the Higher Attestation Commissions of the Republic of Uzbekistan and the Republic of Kazakhstan for the publication of the main scientific results of doctoral dissertations, among them 2 articles in foreign journals abstracted in the Scopus database, and 2 patents of the Republic of Kazakhstan for a utility model have been obtained.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references used and appendices. The volume of the dissertation is 120 pages.

E’LON QILINGAN ISHLAR RO‘YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I-bo‘lim (I-часть, I part)

1. Н.Т. Рустамов, А.Т. Мейрбеков, Ш.А. Бабахан. Гибридная ветро-солнечная электростанция. Патент на полезную модель Республики Казахстан. № 7391 от 19.05.2023. https://gosreestr.kazpatent.kz/Utilitymodel/DownLoadFilePdf?patentId=357646&lang=ru

2. Б.С. Абдрасилов, А.Т. Мейрбеков, Н.Т. Рустамов, К.С. Мейрамкулова, Ш.А. Бабахан. Гибридный ветрогенератор. Патент на полезную модель Республики Казахстан. № 6142 от 11.06.2021. https://gosreestr.kazpatent.kz/Utilitymodel/DownLoadFilePdf?patentId=338946&lang=ru

3. Н.Р. Авезова, Ш.А. Бабахан. Гибридная ветро-солнечная энергетическая установка с общей шиной постоянного тока: конструкция и функциональная схема // *Проблемы энерго- и ресурсосбережения.* Специальный выпуск № 88, 2025, с. 568–576. (05.00.00. № 21). https://www.researchgate.net/publication/408450007_Gibridnaa_vetro-solnecnaa_energeticeskaa_ustanovka_s_obsej_sinoj_postoannogo_toka_konstrukcia_i_funkcionalnaa_shema

4. Н.Р. Авезова, О.З. Тоиров, Н.Т. Рустамов, Ш.А. Бабахан. Гибридная ветро-солнечная установка для автономного электроснабжения. Часть 1. Конструкция и расчёты основных параметров // *Проблемы информатики и энергетики*. 2024, № 6, с. 36–53. (05.00.00. № 5). https://journals.rcsi.science/0002-3310/article/view/259124

5. Sh.A. Babakhan, G.A. Tulebayeva, N.T. Rustamov, A.K. Kakharman. Management of Power Generation by a Distributed Generation Microgrid // *European Journal of Technical and Natural Sciences*. 2024, No. 2, pp. 10-18. (OAK dissertatsiyalar ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxati 3-bet 12 baza) Index Copernicus Value (ICV) = 83.17 (2024) https://doi.org/10.29013/EJTNS-24-2-10-18 http://ppublishing.org/archive/publication/1018-management-of-power-generation-by-a-distribut

6. Sh. Babakhan, Y. Kokanbay, K. Pernebaev. An Algorithm for Designing a Hybrid Wind Turbine Wind Wheel // *European Journal of Technical and Natural Sciences*. 2024, No. 3-4, pp. 15-20. (OAK dissertatsiyalar ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxati 3-bet 12 baza) Index Copernicus Value (ICV) = 83.17 (2024) https://doi.org/10.29013/EJTNS-24-3.4-15-20 https://ppublishing.org/archive/publication/1114-an-algorithm-for-designing-a-hybrid-wind-turb

7. N. Rustamov, Sh. Babakhan, N. Genc, A. Kibishov, O. Meirbekova. An Improved Hybrid Wind Power Plant for Small Power Generation // *International*

Journal of Renewable Energy Research (IJRER). 2023, Vol. 13, No. 2, pp. 629–635. (Scopus Q2; 05.00.00, № 3) DOI: 10.20508/IJRER.V13I2.14193.G8735 https://www.scopus.com/pages/publications/85168541437

8. Н.Т. Рустамов, Ш.А. Бабахан, К.М. Беркимбаев, А. Адилет. Распределённая генерация энергии на базе гибридной ветро-солнечной энергетической установки // *European Journal of Technical and Natural Sciences*. 2023, No. 3, pp. 48-59. (OAK dissertatsiyalar ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxati 3-bet 12 baza) Index Copernicus Value (ICV) = 83.17 (2024) https://doi.org/10.29013/EJTNS-23-3-48-59 https://ppublishing.org/archive/publication/696-raspredelennaya-generatsiya-energii-na-baze-gi

9. Н.Т. Рустамов, Б.Э. Эгамбердиев, А.Ш. Мавлянов, Ш.А. Бабахан. Механизмы подключения автономных гибридных ветрогенераторов в общую распределительную сеть // *European Journal of Technical and Natural Sciences*. 2022, No. 6, pp. 164-175. (OAK dissertatsiyalar ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxati 3-bet 12 baza) Index Copernicus Value (ICV) = 83.17 (2024) https://doi.org/10.29013/EJTNS-22-6-164-175 https://ppublishing.org/archive/publication/423-mekhanizmi-podklyucheniya-avtonomnikh-gibridni

10. Ш.А. Бабахан, Р.Б. Абдрахманов, С.Д. Мамаджанов. К вопросу выбора расчётной модели гибридной ветроустановки // *Молодой ученый*. 2022, № 49 (444). (OAK dissertatsiyalar ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxati 3-bet 18 baza) https://moluch.ru/archive/444/97195

11. Ш.А. Бабахан, Н.Т. Рустамов. Повышение эффективности ветроустановок // *Проблемы информатики и энергетики*. 2020, № 4, с. 59–64. (05.00.00. № 5). https://www.researchgate.net/publication/408454131_Povysenie_effektivnosti_vetroustanovokk

12. Ш.А. Бабахан, Н.Т. Рустамов, А.Т. Кибишов. Ветроустановки с магнитными лопастями // *Молодой ученый*. 2020, № 21 (311), с. 469-474. (OAK dissertatsiyalar ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxati 3-bet 18 baza) https://moluch.ru/archive/311/70359

II-bo‘lim (II-часть, II part)

1. N. Rustamov, Sh. Babakhan. Small “Smart Energy” Based on Hybrid Distributed Generation // BIO Web of Conferences. 2024, Vol. 84, Art. 05025, pp. 1–5. https://doi.org/10.1051/bioconf/20248405025 https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/pdf/2024/03/bioconf_aquaculture2024_05025.pdf

2. Н.Т. Рустамов, Ш.А. Бабахан, С.А. Орысбаев. Одностадийное электроснабжение на базе ВЭУ // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020, с. 71–75. https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.102.12.012 https://research-journal.org/en/archive/12-102-2020-december/odnostadijnoe-elektrosnabzhenie-na-baze-veu

3. Н.Т. Рустамов, Ш.А. Бабахан, А.Т. Кибишов, С.А. Орысбаев. Гибридизатsiя ветровых энергетических установок // *Научный журнал «Архивариус»*. 2020, № 9 (54), с. 20–24. (OAK dissertatsiyalar ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxati 3-bet 12 baza)
https://cyberleninka.ru/article/n/gibridizatsiya-vetrovyh-energeticheskih-ustanovok/viewer

4. Н.Р. Авезова, Н.Т. Рустамов, Ш.А. Бабахан. Гибридная ветро-солнечная электростанция // Международная научно-практическая конференция «Инновационная энергетика: фундаментальные основы энергетики и инноватsионные инженерные решения». 9–10 апреля 2025 г., Ургенч, Узбекистан, с. 1212–1216.
https://www.researchgate.net/publication/408468200_GIBRIDNAA_VETRO-SOLNECNAA_ELEKTROSTANCIA

5. Н.Т. Рустамов, Ш.А. Бабахан. Малая «умная энергетика» на базе гибридной распределённой генератsии // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и решения эффективного использования альтернативных источников энергии». 7–8 ноября 2023 г., Фергана, с. 117–122.
https://www.researchgate.net/publication/408469058_Malaa_umnaa_energetikana_baze_gibridnoj_RG

6. Н.Т. Рустамов, Ш.А. Бабахан, Ә.Қ. Қахарман. К вопросу подключения системы распределённой генератsии в общую распределительную сеть // Международная научно-техническая конференция «Эффективная энергетика будущего: проблемы и решения». 14–15 декабря 2023 г., Фергана, с. 188–192.
https://www.researchgate.net/publication/408468304_K_VOPROSU_PODKLUCENIA_SISTEMY_RASPREDELENNOJ_GENERACII_V_OBSUU_RASPREDELITELNUU_SET

7. Н.Т. Рустамов, Ш.А. Бабахан, А.Т. Кибишов. Синхронизатsiя работы распределённой генератsии на базе парков ветро-солнечных энергетических установок // Международная научно-техническая конференция «Эффективная энергетика будущего: проблемы и решения». 14–15 декабря 2023 г., Фергана, с. 193–197.
https://www.researchgate.net/publication/408468203_SINHRONIZACIA_RABOTY_RASPREDELENNOJ_GENERCII_RABOTAUSAA_BAZE_PARKOV_VETROSOLNECNYHENERGETICESKIH_USTANOVOK

8. Н.Т. Рустамов, О.Д. Меирбекова, Ш.А. Бабахан. Гибридная энергостанция, работающая на базе возобновляемой энергии // Международная конференция «Новые горизонты низкоуглеродного развития в мире и Узбекистане». 23–24 сентября 2022 г., Ташкент.
https://www.researchgate.net/publication/408477503_Gibridnaa_energostancia_rabotausaa_na_baze_vozobnovlaemoj_energii

9. Н.Т. Рустамов, Ф.М. Исроилов, Ш.А. Бабахан. Повышение эффективности ветроэнергетических установок // Международная научно-техническая конференция. 28–29 октября 2022 г., Джиззах, с. 695–698.
https://www.researchgate.net/publication/408481470_POVYSENIA_EFFEKTIVNOSTI_VETRO_ENERGITICESKOJ_USTANOVKI_USTANOVOK

10. Ш.А. Бабахан. Гибридная ветроэнергетическая установка для малой энергетики // VII Международная научно-практическая конференция «Роль инновационных технологий в новом мире». Том 1. Алматы, 2022, с. 30–36. https://www.researchgate.net/publication/408481761_Gibridnaa_vetroenergeticeskaa_ustanovka_dla_maloj_energetiki

11. Ш.А. Бабахан. Гибридный метод повышения энергоэффективности ветровых энергетических установок // Материалы международной научной конференции студентов и молодых ученых «ФАРАБИ ӘЛЕМІ». 6–8 апреля 2021 г., Алматы, Казахстан. https://www.researchgate.net/publication/408481474_Gibridnyj_metod_povysenia_energoeffektivnosti_vetrovyh_energeticeskih_ustanovok

12. Ш.А. Бабахан, С.А. Орысбаев. К вопросу электроснабжения на ветровых энергетических установках // IV Международная научно-практическая конференция «Роль инновационных технологий в новом мире». Алматы, 2020, с. 41–47. https://www.researchgate.net/publication/408481107_K_voprosu_elektrosnabzenia_na_vetrovyh_energeticeskih_ustanovkah

Avtoreferatning o‘zbek, rus va ingiliz tillaridagi nusxalari
Farg‘ona davlat texnika universitetining «Ilmiy texnika» jurnali tahririyatida
tahrirdan o‘tqazildi.

0485

Bosishga ruxsat etildi: 30.10.2026.
Bichimi 60×84 1/16 “Times New Roman”
garniturada raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog‘i 4,25. Adadi 100 nusxa. Buyurtma № 202.
“Innovatsion rivojlanish nashriyot-matbaa uyi” bosmaxonasida chop etildi.
Manzil: 100174, Toshkent sh., Qora-Qamish 2/1, 22a-uy.
Telefonlar: (+998) 97-705-90-35, (+998) 99-920-90-35