



Qayta tiklanuvchan energiya manbalari asosidagi stansiyalar va energiya saqlash qurilmalariga ega bo'lgan gibridd tizimlarini optimallashtirish usullarining tahlili

Tulkin Sh. Gayibov¹, Alisher E. Shanazarov^{1a}

¹⁾ DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; tulgayibov@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-3619-2844>

^{1a)} PhD, v.v.b. dotsent., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston alisher.shanazarov90@mail.ru <https://orcid.org/0009-0009-4757-0928>

Dolzarbli: qayta tiklanuvchi energiya manbalarining elektr energetika tizimlariga keng miqyosda integratsiyalashuvi elektr energiyasini ishlab chiqarishning o'zgaruvchanligi va noaniqligi, generatsiya hamda iste'mol o'rtasidagi balansni ta'minlash, energiya saqlash qurilmalarining ish rejimlarini muvofiqlashtirish va elektr tarmog'ining barqaror ishlashini ta'minlash bilan bog'liq yangi masalalarni yuzaga keltirmoqda. Ayniqsa, shamol elektr stansiyalari va quyosh fotoelektr stansiyalarining meteorologik sharoitlarga bog'liqligi sababli ularning generatsiyasini an'anaviy dispatcherlanadigan elektr stansiyalaridek boshqarish imkoniyati cheklangan. Mazkur muammoni bartaraf etishda akkumulyator energiya saqlash tizimlari (BESS – battery energy storage system) generatsiya va iste'mol quvvatlari o'rtasidagi qisqa muddatli nomuvofiqliklarni kompensatsiyalash, qayta tiklanuvchi energiya manbalari quvvatidagi keskin o'zgarishlarni silliqlash hamda elektr energetika tizimining operativ moslashuvchanligini oshirish vositasi sifatida muhim ahamiyatga ega. Ushbu maqolada shamol elektr stansiyalari, quyosh fotoelektr stansiyalari va akkumulyator energiya saqlash tizimlaridan tashkil topgan gibridd energetika tizimlarini optimal loyihalash, generatsiya va yuklama rejimlarini rejalashtirish, energiya oqimlarini dispatcherlash hamda operativ boshqarishda samarali modelni tanlash uchun mavjud usul va texnologiyalar tizimli tahlil qilingan. Deterministik, stoxastik va robust optimallashtirish, chiziqli va aralash butun sonli dasturlash, genetik algoritim, zarrachalar to'dasi optimallashtirish algoritmi, modelni bashoratli boshqarish, fuzzy-mantiq, sun'iy neyron tarmoqlar hamda reinforcement learning asosidagi boshqaruv usullarining afzalliklari va cheklovlari ko'rib chiqilgan. Shuningdek, optimal loyihalash, prognozlash, sutkalik rejalashtirish, energiyani dispatcherlash va real vaqt rejimida boshqarishni o'zaro bog'lovchi ko'p darajali boshqaruv arxitekturasini shakllantirilgan. Tadqiqot natijalari keyingi bosqichda akkumulyator va vodorod energiya saqlash tizimlarini birgalikda qo'llovchi energetika tizimlari uchun optimal energiya boshqaruvi va dispatcherlash algoritmlarini ishlab chiqishda metodologik asos bo'lib xizmat qiladi.

Maqsad: shamol va quyosh fotoelektr elektr stansiyalari hamda energiya saqlash vositalariga ega bo'lgan tizimni ularda elektr energiyasi ishlab chiqarishning o'zgaruvchan va beqaror xususiyatlarini hisobga olib loyihalash va ish rejimlarini boshqarish uchun samarali usullarni tanlash, turli sharoitlarda ularni qo'llashning maqsadga muvofiqligini asoslash.

Usullari: tadqiqotda qayta tiklanuvchi energiya manbalari yuqori ulushga ega elektr energetika tizimlarida talabni boshqarish bo'yicha xalqaro tajribani o'rganish, mavjud talabni boshqarish va Demand Response usullarini tizimlashtirish hamda ularning texnik, tashkiliy va operativ xususiyatlarini qiyosiy tahlil qilish usullaridan foydalaniladi.

Natijalar: qayta tiklanuvchi energiya manbalariga o'tish jarayonida hamda O'zbekiston elektr energetika tizimida bozor mexanizmlarining bosqichma-bosqich joriy etilishi sharoitida shamol va quyosh elektr stansiyalari generatsiyasining o'zgaruvchanligini muvozanatlash uchun iste'molchi yuklamlarining moslashuvchanligidan foydalanish muhimligi asoslanadi. Talabni operativ boshqarish usullaridan foydalanish generatsiya va iste'mol o'rtasidagi qisqa muddatli nomuvofiqliklarni kamaytirish, tizimning balanslash imkoniyatlarini oshirish hamda qayta tiklanuvchi energiya manbalarining integratsiyasini yaxshilash imkonini berishi ko'rsatiladi. O'tkazilgan qiyosiy tahlil asosida O'zbekiston elektr energetika tizimi sharoitida talabni boshqarish mexanizmlarini qo'llash va rivojlantirish bo'yicha tegishli takliflar ishlab chiqiladi.

Kalit so'zlar: qayta tiklanuvchi energiya manbalari, fotoelektr stansiyasi, shamol elektr stansiyasi, BESS, gibridd energetika tizimi, optimal loyihalash, energiyani rejalashtirish, dispatcherlash, energiya boshqaruv tizimi, model asosida boshqaruv (Model Predictive Control — MPC), stoxastik optimallashtirish, vodorod energiyasi.

Анализ методов проектирования, планирования и оперативного управления гибридными энергетическими системами с ветровыми, солнечными фотоэлектрическими и аккумуляторными накопителями энергии

Тулкин Ш. Гайибов¹, Алишер Э. Шаназаров^{1a}

^{1a)} DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; tulgayibov@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-3619-2844>

²⁾ PhD, доц., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; alisher.shanazarov90@mail.ru <https://orcid.org/0009-0009-4757-0928>

For citation: Gayibov T.Sh., Shanazarov A.E. Analysis of Design, Scheduling and Operational Control Methods for Hybrid Energy Systems with Wind, Solar Photovoltaic and Battery Energy Storage. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3, pp. 37-46.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23203077>

Received: 05.01.2026

Revised: 17.01.2026

Accepted: 10.02.2026

Published: 25.09.2026

Copyright: © Gayibov T.Sh., Shanazarov A.E., 2026. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Актуальность: широкомасштабная интеграция возобновляемых источников энергии в электроэнергетические системы приводит к возникновению новых задач, связанных с переменным и неопределённым характером выработки электроэнергии, обеспечением баланса между генерацией и потреблением, координацией режимов работы накопителей энергии и обеспечением устойчивой работы электрической сети. Зависимость ветровых и солнечных фотоэлектрических электростанций от метеорологических условий ограничивает возможность управления их генерацией по аналогии с традиционными диспетчеризируемыми электростанциями. В решении данной проблемы важную роль играют аккумуляторные системы накопления энергии, способные компенсировать кратковременные несоответствия между мощностью генерации и потребления, сглаживать резкие изменения мощности возобновляемых источников энергии и повышать оперативную гибкость электроэнергетической системы. В данной статье проведён системный анализ существующих методов и технологий оптимального проектирования гибридных энергетических систем, включающих ветровые электростанции, солнечные фотоэлектрические электростанции и аккумуляторные системы накопления энергии, а также методов планирования режимов генерации и нагрузки, диспетчеризации энергетических потоков и оперативного управления. Рассмотрены преимущества и ограничения детерминированной, стохастической и робастной оптимизации, линейного и смешанного целочисленного программирования, генетических алгоритмов, алгоритмов роя частиц, модельно-прогнозирующего управления, нечёткой логики, искусственных нейронных сетей и методов управления на основе обучения с подкреплением. Кроме того, сформирована многоуровневая архитектура управления, объединяющая оптимальное проектирование, прогнозирование, суточное планирование, диспетчеризацию энергии и управление в реальном времени. Результаты исследования могут служить методологической основой для последующей разработки алгоритмов оптимального управления энергией и диспетчеризации энергетических систем, совместно использующих аккумуляторные и водородные системы накопления энергии.

Цель: выбор эффективных методов проектирования и управления режимами работы систем, включающих ветровые и солнечные фотоэлектрические станции, а также системы накопления энергии, с учётом изменчивого и нестабильного характера выработки ими электроэнергии, и обоснование целесообразности их применения в различных условиях.

Методы: в исследовании используются методы изучения международного опыта управления спросом в электроэнергетических системах с высокой долей возобновляемых источников энергии, систематизации существующих методов управления спросом и Demand Response, а также сравнительного анализа их технических, организационных и эксплуатационных характеристик.

Результаты: обоснована важность использования гибкости потребительской нагрузки для балансирования изменчивости генерации ветровых и солнечных электростанций в условиях перехода к возобновляемым источникам энергии, и поэтапного внедрения рыночных механизмов в электроэнергетической системе Узбекистана. Показано, что применение методов оперативного управления спросом позволяет снижать кратковременные несоответствия между генерацией и потреблением, повышать балансирующие возможности системы и улучшать интеграцию возобновляемых источников энергии. На основе проведённого сравнительного анализа разработаны соответствующие предложения по применению и развитию механизмов управления спросом в условиях электроэнергетической системы Узбекистана.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, фотоэлектрическая станция, ветровая электростанция, BESS, гибридная энергетическая система, оптимальное проектирование, планирование энергопотребления, диспетчеризация, система управления энергией, MPC, стохастическая оптимизация, водородная энергетика.

Analysis of Design, Scheduling and Operational Control Methods for Hybrid Energy Systems with Wind, Solar Photovoltaic and Battery Energy Storage

Tulkin Sh. Gayibov^{1a}, Alisher E. Shanazarov^{1a}

^{1a)} DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; tulgayibov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-3619-2844>

¹ PhD, assoc. prof, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; tstu_energy@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-3909-4888>

Relevance: the large-scale integration of renewable energy sources into electric power systems gives rise to new challenges associated with the variability and uncertainty of electricity generation, maintaining the balance between generation and consumption, coordinating the operating modes of energy storage systems, and ensuring stable operation of the power grid. In particular, the dependence of wind and solar photovoltaic power plants on meteorological conditions limits the possibility of controlling their generation in the same manner as conventional dispatchable power plants. Battery energy storage systems play an important role in addressing this problem by compensating for short-term mismatches between generation and consumption, smoothing rapid fluctuations in renewable power output, and increasing the operational flexibility of the electric power system. This paper provides a systematic analysis of existing methods and technologies for the optimal design of hybrid energy systems consisting of wind power plants, solar photovoltaic power plants, and battery energy storage systems, as well as approaches to generation and load scheduling, energy flow dispatch, and operational control. The advantages and limitations of deterministic, stochastic, and robust optimization, linear and mixed-integer programming, genetic algorithms, particle swarm optimization, model predictive control, fuzzy logic, artificial neural networks, and

reinforcement learning-based control methods are considered. In addition, a multi-level control architecture integrating optimal design, forecasting, day-ahead scheduling, energy dispatch, and real-time control is developed. The results of the study can serve as a methodological basis for the subsequent development of optimal energy management and dispatch algorithms for energy systems combining battery and hydrogen energy storage technologies.

Aim: selection of effective methods for the design and operational management of systems incorporating wind power plants, solar photovoltaic power plants, and energy storage systems, taking into account the variable and unstable nature of electricity generation, as well as justification of their applicability under different operating conditions.

Methods: the study employs an analysis of international experience in demand-side management in power systems with a high share of renewable energy sources, systematization of existing demand-side management and Demand Response methods, and comparative analysis of their technical, organizational, and operational characteristics.

Results: the importance of using consumer load flexibility to balance the variability of wind and solar power generation under the transition toward renewable energy sources and the gradual implementation of market mechanisms in the power system of Uzbekistan is substantiated. It is shown that operational demand-side management can reduce short-term mismatches between generation and consumption, increase the balancing capability of the power system, and improve the integration of renewable energy sources. Based on the comparative analysis, relevant proposals are developed for the implementation and further development of demand-side management mechanisms in the power system of Uzbekistan.

Keywords: renewable energy sources, solar photovoltaic power plant, wind power plant, BESS, hybrid energy system, optimal design, energy scheduling, dispatching, energy management system, MPC, stochastic optimization, hydrogen energy.

1. Kirish (Introduction)

Dunyo elektr energetika tizimlarida qayta tiklanuvchi energiya manbalarining ulushi ortishi generatsiya strukturasi sezilarli darajada o'zgartirmoqda. Quyosh fotoelektr (PV) va shamol elektr stansiyalarining keng joriy etilishi qazilma yoqilg'ilarga bog'liqlikni va atmosferaga chiqariladigan zararli emissiyalarni kamaytirish imkonini bersa-da, ushbu manbalarning meteorologik omillarga bog'liqligi elektr energetika tizimini boshqarishda yangi texnik muammolarni yuzaga keltiradi. Zamonaviy adabiyotlarda shamol va quyosh manbalarini birgalikda qo'llash alohida manbaning o'zgaruvchanligini qisman kompensatsiyalashi, biroq yuqori darajadagi qayta tiklanuvchi generatsiyani ta'minlash uchun energiya saqlash va rivojlangan boshqaruv tizimlari talab etilishi ko'rsatilgan. Quyosh radiatsiyasi, atrof-muhit harorati va shamol tezligining vaqt bo'yicha o'zgarishi sababli qayta tiklanuvchi manbalarda ishlovchi elektr stansiyalarining generatsiya quvvati grafiklarini oldindan qat'iy belgilab qo'yish mumkin emas. Natijada, tizimning ish faoliyati davomida elektr energiyasi ishlab chiqarish va iste'moli orasidagi muvozanatning buzilishi, tarmoqdan olinayotgan yoki tarmoqqa uzatilayotgan quvvatning keskin o'zgarishi, qayta tiklanuvchi energiyani majburiy cheklash va energiya saqlash qurilmalarining samarasiz ishlatilishi kuzatilishi mumkin. Shu sababli gibril energetika tizimlarini faqat alohida energetik qurilmalar majmuasi sifatida emas, balki prognozlash, rejalashtirish, optimallashtirish va real vaqt boshqaruvini birlashtiruvchi murakkab dinamik tizim sifatida ko'rib chiqish zarur [1-4].

PV-shamol gibril tizimlarining optimal quvvatini aniqlash masalasi so'nggi yillarda texnik, iqtisodiy, ekologik va ishonchlilik mezonlarini birgalikda hisobga oluvchi ko'p mezonli masala sifatida shakllangan. Optimal parametrlarini tanlash bilan bir qatorda kelajakdagi yuklama va qayta tiklanuvchi energiya resurslarining noaniqligini ham hisobga olish zarur bo'ladi. BESS – shamol va quyosh generatsiyasining qisqa muddatli nomuvofiqliklarini bartaraf etishda asosiy vositalardan biridir. BESS qayta tiklanuvchi generatsiya ortiqcha bo'lgan davrda energiyani yig'ish va iste'mol yuqori bo'lgan davrda qaytarib berish orqali elektr tarmog'ida yuklama grafisini silliqlashi mumkin. Biroq BESSni boshqarishda faqat energiya balansini ta'minlash yetarli emas. Akkumulyatorning zaryad holati, zaryadlash va razryadlash quvvatlari, samaradorlik, sikllanish va degradatsiya xarajatlari ham hisobga olinishi lozim. Zamonaviy tadqiqotlarida BESS degradatsiyasini maqsad funksiyasiga kiritish tobora muhim yo'nalishga aylanmoqda [5-6].

Gibril energetika tizimlarini boshqarishda qo'llaniladigan usullar shartli ravishda qoidalarga asoslangan boshqaruv, matematik optimallashtirish, modelni bashoratli boshqarish, fuzzy-mantiq, metaevristik optimallashtirish va sun'iy intellektga asoslangan usullarga ajratilishi mumkin. Qoidalarga asoslangan boshqaruv sodda va hisoblash nuqtai nazaridan tezkor bo'lsa-da, tizim holatining kelajakdagi o'zgarishlarini hisobga olmaydi. Optimallashtirishga asoslangan usullar iqtisodiy va texnik cheklavlarni to'liqroq hisobga olish imkonini beradi, biroq real vaqt hisoblash murakkabligi oshadi. MPC yondashuvining asosiy afzalligi esa kelajakdagi generatsiya, yuklama va narx prognozidan foydalangan holda tizimning keyingi holatini bashorat qilishi va har bir vaqt bosqichida boshqaruv qarorini qayta hisoblashidir [7-8].

So'nggi yillarda sun'iy intellektga asoslangan EMS tizimlariga tadqiqot ham sezilarli oshdi. Reinforcement learning algoritmlarining PV, shamol va BESSga ega mikrogridlarda energiya boshqaruvi-

ga tatbiqi adaptiv boshqaruv imkoniyatini yaratmoqda [18]. Hosseini va boshqalar tomonidan 2025-yilda *Journal of Energy Storage* jurnalida chop etilgan tadqiqotda PV, shamol turbinasi va litii-ion akkumulyator energiya saqlash qurilmalaridan tashkil topgan ko'p darajali mikrogrid uchun reinforcement learning asosidagi energiya boshqaruv tizimi taklif etilgan. BESS quvvatini boshqarish uchun Twin-Delayed Deep Deterministic Policy Gradient (TD3) algoritmidan foydalanilgan. Taklif etilgan RL-EMS samaradorligi SOCga asoslangan an'anaviy EMS, fuzzy logic, PSO va fmincon asosidagi boshqaruv usullari bilan qiyosiy baholangan. Tadqiqot natijalari o'zgaruvchan qayta tiklanuvchi generatsiya sharoitida reinforcement learning algoritmlarining energiya saqlash tizimini adaptiv boshqarish imkoniyatlarini keltirgan. Biroq sun'iy intellekt usullarida o'qitish uchun katta hajmdagi ma'lumotlarning talab qilinishi, olingan qarorlarning fizik cheklavlarga muvofiqligini kafolatlash va algoritmni real energetika obyekti xavfsiz tatbiq qilish masalalari saqlanib qolmoqda. Shu sababli zamonaviy tadqiqotlar ML/DRL algoritmlarini fizik modellar, matematik optimallashtirish va MPC bilan gibridlashtirishga yo'nalmoqda [19]. Eyime va boshqalar tomonidan 2026-yilda *Results in Engineering* jurnalida chop etilgan sistematik tahlilda quyosh fotoelektr, shamol va akkumulyator energiya saqlash tizimlariga ega mikrogridlarda qo'llanilayotgan sun'iy intellekt va zamonaviy boshqaruv arxitekturalari tahlil qilingan. Mualliflar 2010–2025-yillarda chop etilgan 142 ta tadqiqotni umumlashtirib, gibrid energetika tizimlarini boshqarish jarayonini "Sense–Predict–Decide–Control–Validate" ketma-ketligi asosida tasniflagan. Ushbu struktura ma'lumotlarni yig'ish, qayta tiklanuvchi generatsiya va yuklamani prognozlash, energiya boshqaruvi bo'yicha qaror qabul qilish, boshqaruv ta'sirlarini amalga oshirish hamda natijalarni texnik va iqtisodiy ko'rsatkichlar asosida baholash bosqichlarini yagona boshqaruv arxitekturasida birlashtiradi. Tadqiqotda, shuningdek, fuzzy va neuro-fuzzy EMS, robust model predictive control, MPPT, metaevristik optimallashtirish va avtomatik manba almashtirish texnologiyalarining imkoniyatlari qiyosiy tahlil qilingan. Qayta tiklanuvchi energiya ulushi yanada ortganda faqat elektrokimyoviy akkumulyatorlardan foydalanish uzoq muddatli energiya balansini ta'minlash uchun iqtisodiy va texnik jihatdan har doim ham maqbul bo'lmashligi mumkin. Shu sababli vodorod energiya saqlash tizimlari mavsumiy va uzoq muddatli saqlash vositasi sifatida faol tadqiq qilinmoqda. 2022–2026-yillardagi tadqiqotlar BESS va vodorod saqlash texnologiyalarini raqobatchi emas, balki turli vaqt masshtablarida ishlaydigan o'zaro to'ldiruvchi vositalar sifatida ko'rib chiqish tendensiyasini ko'rsatmoqda. Shu nuqtai nazardan, qayta tiklanuvchi energiya manbalari va energiya saqlash qurilmalariga ega tizimlarni samarali boshqarish masalasini faqat bitta algoritim bilan cheklash maqsadga muvofiq emas. Optimal loyihalash, prognozlash, day-ahead scheduling, intra-day scheduling, real vaqt dispatcherlash va lokal avtomatik boshqaruv turli vaqt masshtablarida amalga oshiriladigan o'zaro bog'liq vazifalar sifatida qaralishi zarur.

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Ushbu tadqiqot shamol elektr stansiyalari, quyosh fotoelektr stansiyalari va akkumulyator energiya saqlash tizimlariga ega gibrid energetika tizimlarini loyihalash, ish rejimlarini rejalashtirish, energiya oqimlarini dispatcherlash hamda operativ boshqarishga bag'ishlangan zamonaviy ilmiy adabiyotlarni tizimli va qiyosiy tahlil qilish asosida olib borildi. Bunda qayta tiklanuvchi energiya manbalarining o'zgaruvchanligi, talabni boshqarish, akkumulyator energiya saqlash tizimlarini boshqarish, sutkalik va sutka ichidagi rejalashtirish, modelni bashoratli boshqarish, stoxastik va robust optimallashtirish hamda sun'iy intellekt asosidagi energiya boshqaruv tizimlariga bag'ishlangan tadqiqotlarga alohida e'tibor qaratildi. Ilmiy manbalarni tanlashda ularning quyidagi yo'nalishlarga tegishlilik asosiy mezon sifatida qabul qilindi: gibrid qayta tiklanuvchi energetika tizimlarining optimal quvvati va sig'imini aniqlash; shamol va quyosh generatsiyasini hamda elektr yuklamasini prognozlash; day-ahead va intra-day rejalashtirish; talabni boshqarish va Demand Response mexanizmlari; energiya oqimlarini operativ dispatcherlash va real vaqt rejimida boshqarish; akkumulyator va vodorod energiya saqlash tizimlarini integratsiyalash [9-10]. Mavjud usullarni qiyosiy tahlil qilish texnik, operativ va metodologik mezonlar asosida amalga oshirildi. Bunda qayta tiklanuvchi energiya generatsiyasidagi noaniqlikni hisobga olish imkoniyati, hisoblash murakkabligi, real vaqt rejimida qo'llash imkoniyati, BESSning zaryad holati va degradatsiyasini hisobga olish, iste'molchilar yuklamasining moslashuvchanligidan foydalanish hamda vodorod energiya saqlash tizimlari bilan integratsiyalash imkoniyatlari asosiy baholash mezonlari sifatida tanlandi. 1-jadvalda Shamol–quyosh–BESS gibrid energetika tizimlarini loyihalash, rejalashtirish va boshqarishga bag'ishlangan tadqiqotlarning qiyosiy tahlili keltirilgan.

Tahlil doirasida deterministik, stoxastik va robust optimallashtirish, chiziqli va aralash butun sonli dasturlash, genetik algoritim, zarrachalar to'dasi optimallashtirish algoritmi, fuzzy-mantiq, modelni bashoratli boshqarish, sun'iy neyron tarmoqlar va reinforcement learning asosidagi energiya boshqaruv usullari ko'rib chiqildi. Qiyosiy tahlil natijalari asosida mavjud usullar bajariladigan vazifa va vaqt masshtabiga ko'ra tizimlashtirilgan.

1-jadval. Shamol–quyosh–BESS gibrid energetika tizimlarini loyihalash, rejalashtirish va boshqarishga bag‘ishlangan tadqiqotlarning qiyosiy tahlili

Table 1. Comparative Analysis of Studies on the Design, Scheduling, and Control of Wind–Solar–BESS Hybrid Energy Systems

№	Tadqiqot yo‘nalishi	Asosiy usullar	Tahlil davr	Asosiy xulosa
1	Optimal quvvat va sig‘imni aniqlash	GA, PSO, MILP, ko‘p mezonli optimallashtirish	2022–2026	PV, WT va BESS quvvatlarini texnik-iqtisodiy mezonlar asosida tanlash
2	Prognozlash	ANN, ML, statistik modellar	2022–2026	Quyosh, shamol va yuklama prognozi scheduling sifatiga bevosita ta‘sir qiladi
3	Day-ahead va intra-day rejalashtirish	MILP, stoxastik, robust optimallashtirish	2023–2026	Noaniqlikni hisobga olgan rejalashtirish tizim moslashuvchanligini oshiradi
4	Operativ boshqaruv	MPC, fuzzy, rule-based control	2022–2026	Real vaqt boshqaruvida MPC va fuzzy usullari keng qo‘llaniladi
5	Sun‘iy intellekt asosidagi EMS	ANN, reinforcement learning, DRL	2024–2026	Adaptiv boshqaruv imkoniyati yuqori, ammo hisoblash va o‘qitish murakkab
6	BESS degradatsiyasini hisobga olish	MPC, fuzzy-PSO, cost-based EMS	2024–2026	SOC bilan bir qatorda sikllanish va degradatsiyani hisobga olish muhim
7	Talabni boshqarish (Demand Response – DR)	Price-based va incentive-based DR	2022–2026	Iste‘mol yuklamasi moslashuvchanligi balanslash resursi sifatida samarali
8	BESS–vodorod integratsiyasi	Gibrid EMS, MILP, MPC	2023–2026	BESS qisqa, H ₂ esa uzoq muddatli balanslash uchun maqsadga muvofiq

Tizimning asosiy matematik ifodalarida Gibrid energetika tizimida har bir vaqt oralig‘ida generatsiya va yuklama o‘rtasidagi barqaror holat quyidagi tenglama orqali belgilanadi:

$$P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_{BESS}(t) + P_{grid}(t) = P_L(t); \quad (1)$$

bu yerda t — vaqt lahzai yoki hisoblash intervali; $P_{PV}(t)$ — t vaqtda quyosh fotoelektr stansiyasi ishlab chiqarayotgan aktiv quvvat, MW; $P_{WT}(t)$ — t vaqtda shamol elektr stansiyasi ishlab chiqarayotgan aktiv quvvat, MW; $P_{BESS}(t)$ — akkumulyator energiya saqlash tizimining elektr tarmog‘iga berayotgan yoki tarmoqdan olayotgan quvvati, MW; $P_{grid}(t)$ — tashqi elektr tarmog‘i bilan almashinayotgan aktiv quvvat, MW; $P_L(t)$ — t vaqtdagi umumiy elektr yuklamasi, MW.

Ushbu tenglama gibrid energetika tizimining asosiy energetik muvozanatini ifodalaydi. Agar shamol va quyosh generatsiyasining yig‘indisi iste‘moldan kam bo‘lsa, quvvat taqchilligi BESS yoki tashqi elektr tarmog‘i orqali qoplanadi. Aksincha, qayta tiklanuvchi energiya manbalari generatsiyasi iste‘moldan yuqori bo‘lganda ortiqcha energiya BESSni zaryadlash yoki elektr tarmog‘iga uzatish uchun ishlatilishi mumkin.

Akkumulyator energiya saqlash tizimini boshqarishda uning zaryad holati — **State of Charge, SOC** — asosiy parametr hisoblanadi. SOCning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi quyidagi tenglama bilan ifodalanadi:

$$SOC_{t+1} = SOC_t + \frac{\eta_{ch} P_{ch,t} \Delta t}{E_{BESS}} - \frac{P_{dis,t} \Delta t}{\eta_{dis} E_{BESS}}; \quad (2)$$

bu yerda SOC_t — t vaqt intervali oxirida BESSning zaryad holati, nisbiy birlik yoki %; SOC_{t+1} — keyingi vaqt intervali oxiridagi zaryad holati; $P_{ch,t}$ — t vaqt intervalida BESSning zaryadlanish quvvati, MW; $P_{dis,t}$ — t vaqtda B intervali BESSning razryadlanish quvvati, MW; η_{ch} — zaryadlash jarayonining foydali ish koeffitsiyenti; η_{dis} — razryadlash jarayonining foydali ish koeffitsiyenti; E_{BESS} — BESSning nominal energiya sig‘imi, MWh; Δt — vaqt intervalining davomiyligi, soat.

BESSni texnik xavfsiz va samarali ishlatish uchun SOC quyidagi chegaralarda saqlanishi lozim:

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max}; \quad (3)$$

bu yerda SOC_{min} — BESSning ruxsat etilgan minimal zaryad holati; SOC_{max} — BESSning ruxsat etilgan maksimal zaryad holati.

Mazkur cheklov akkumulyatorning haddan tashqari chuqur razryadlanishi yoki ortiqcha zaryadlanishining oldini olish, uning xizmat muddatini uzaytirish va degradatsiyasini kamaytirish uchun qo‘llaniladi.

Shamol va quyosh fotoelektr stansiyalarining generatsiyasi o‘zgaruvchan bo‘lgan sharoitda quvvat balansini ta‘minlash faqat ishlab chiqarish yoki energiya saqlash vositalari hisobiga emas, balki



iste'molchilar yuklamasini boshqarish (Demand Response) orqali ham amalga oshirilishi mumkin.

Talabni boshqarish mexanizmi qo'llanilganda boshqaruvdan keyingi iste'mol yuklamasi quyidagicha ifodalanadi:

$$P_L^{new}(t) = P_L(t) - P_{DR}(t); \quad (4)$$

bu yerda $P_L^{new}(t)$ — talabni boshqarish amalga oshirilgandan keyingi yangi yuklama, MW; $P_L(t)$ — talabni boshqarishdan oldingi dastlabki iste'mol yuklamasi, MW; $P_{DR}(t)$ — talabni boshqarish mexanizmi orqali kamaytirilgan yoki boshqa vaqt oralig'iga ko'chirilgan yuklama quvvati, MW.

Agar $P_{DR}(t) > 0$ bo'lsa, shu vaqt intervalida iste'mol kamaytiriladi – yuklamaning bir qismi maksimum soatdan kam yuklangan vaqtga ko'chiriladi, ya'ni bir vaqt intervalidan olib tashlangan energiya boshqa vaqt intervaliga ko'chiriladi:

$$\sum_{t=1}^T P_L^{shift} - (t)\Delta t = \sum_{t=1}^T P_L^{shift} + (t)\Delta; \quad (5)$$

Talabni boshqarish hisobga olinganda har bir vaqt intervalida umumiy quvvat balansini ifodalaydi:

$$P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_{BESS}(t) + P_{grid}(t) = P_L(t) - P_{DR}(t); \quad (6)$$

Mazkur ifoda qayta tiklanuvchi generatsiyaning pasayishi natijasida yuzaga keladigan qisqa muddatli quvvat taqchilligini BESS bilan bir qatorda iste'mol yuklamasining moslashuvchanligi hisobiga ham kompensatsiyalash mumkinligini ko'rsatadi.

Gibrid energetika tizimining optimal ishlash rejimini aniqlashda bir nechta texnik va iqtisodiy mezonlar bir vaqtning o'zida hisobga olinishi mumkin. Ushbu mezonlarni umumlashtirilgan holda quyidagi maqsad funksiyasi orqali ifodalash mumkin:

$$\min J = w_1 C_{grid} + w_2 C_{BESS} + w_3 E_{curt} + w_4 E_{imb}; \quad (7)$$

bu yerda J — optimallashtirishning umumiy maqsad funksiyasi; C_{grid} — elektr tarmog'i bilan energiya almashinuviga bog'liq xarajat; C_{BESS} — BESSning ishlashi, sikllanishi va degradatsiyasi bilan bog'liq xarajat; E_{curt} — foydalanilmay qolgan yoki majburiy cheklangan qayta tiklanuvchi energiya miqdori, MWh; E_{imb} — generatsiya va iste'mol orasidagi nomuvofiqlik energiyasi, MWh; w_1, w_2, w_3, w_4 — alohida mezonlarning ahamiyatini ifodalovchi vazn koeffitsiyentlari.

Odatda vazn koeffitsiyentlari uchun:

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1;$$

sharti qabul qilinishi mumkin.

Tadqiqotning metodologik asosi sifatida optimal loyihalash, prognozlash, sutkalik rejalashtirish, sutka ichidagi qayta rejalashtirish, real vaqt rejimida dispetchirlash va lokal boshqaruv bosqichlaridan tashkil topgan ierarxik boshqaruv tuzilmasi qabul qilindi. Mazkur yondashuv shamol va quyosh generatsiyasining yuqori ulushiga ega bo'lgan elektr energetika tizimlarida mavjud boshqaruv usullarining afzalliklari, cheklovlari va qo'llash imkoniyatlarini aniqlash uchun foydalaniladi.

3. Natijalar va munozara (Results and discussion)

O'tkazilgan tahlil natijalari shamol elektr stansiyalari, quyosh fotoelektr stansiyalari va akkumulyator energiya saqlash tizimlariga ega bo'lgan gibrid energetika tizimlarini samarali boshqarishda yagona universal usul mavjud emasligini ko'rsatdi. Boshqaruv usulini tanlash tizimning quvvati, qayta tiklanuvchi energiya manbalarining ulushi, prognoz xatoligi, energiya saqlash qurilmalarining mavjudligi, hisoblash imkoniyatlari hamda boshqaruv vaqt masshtabiga bog'liq.

Deterministik optimallashtirish usullari ma'lum va oldindan berilgan parametrlar asosida samarali yechim olish imkonini beradi. Ularning asosiy afzalligi hisoblashning nisbatan sodda va natijalarning tushunarli bo'lishidir. Biroq shamol tezligi, quyosh radiatsiyasi va yuklama kabi parametrlarning o'zgaruvchanligi yuqori bo'lgan tizimlarda deterministik yondashuv prognoz noaniqligini to'liq hisobga olmaydi. Shu sababli yuqori ulushdagi qayta tiklanuvchi energiya manbalariga ega tizimlar uchun stoxastik va robust optimallashtirish usullaridan foydalanish maqsadga muvofiq ekanligi aniqlandi.

Stoxastik optimallashtirish ehtimollik ssenariylari orqali qayta tiklanuvchi generatsiya va yuklamadagi noaniqlikni hisobga olish imkonini beradi [11-14]. Bu usul day-ahead va intra-day rejalashtirish masalalarida ayniqsa samarali hisoblanadi. Shu bilan birga, ssenariylar sonining ortishi hisoblash murakkabligini oshiradi. Robust optimallashtirish esa ehtimollik taqsimotini aniq bilishni talab qilmasdan, noaniqlik diapazonlarida barqaror yechim olish imkonini beradi. Biroq uning natijalari ayrim holatlarda konservativ bo'lishi mumkin.

Chiziqli va aralash butun sonli dasturlash usullari energiya oqimlarini rejalashtirish, BESSning zaryadlash va razryadlash holatlarini aniqlash, tarmoqdan energiya olish yoki uzatish rejimlarini optimallashtirish uchun keng qo'llaniladi. Ushbu usullar cheklovlarni aniq hisobga olish va global optimal yechimga yaqin natijalarni olish imkonini beradi. Biroq tizimning nochiqlik xususiyatlari ortishi bilan modelni soddalashtirish zarurati paydo bo'ladi.

Genetik algoritmlar va zarrachalar to'dasi optimallashtirish algoritmi kabi metaevristik usullar murakkab va nochiqlik masalalarni yechishda yuqori moslashuvchanlikka ega. Ular PV, shamol va BESSning optimal quvvat va sig'imini aniqlashda samarali qo'llaniladi. Shu bilan birga, bu usullarda

global optimal yechim kafolatlanmaydi va hisoblash vaqti boshlang'ich parametrlar hamda algoritmlar sozlamalariga sezilarli darajada bog'liq bo'ladi.

Operativ boshqaruv nuqtai nazaridan modelni bashoratli boshqarish usuli yuqori samaradorlikka ega ekanligi aniqlandi. MPC kelajakdagi shamol va quyosh generatsiyasi, yuklama va BESS holatini prognoz qilib, har bir vaqt bosqichida boshqaruv ta'sirlarini qayta hisoblash imkonini beradi. Bu esa uni prognoz xatolari mavjud bo'lgan sharoitlarda qayta tiklanuvchi energiya manbalariga ega tizimlar uchun mos qiladi. Biroq MPCning samaradorligi prognoz aniqligi va matematik model sifatiga bog'liq.

Fuzzy-mantiqqa asoslangan boshqaruv usullari noaniqlik mavjud sharoitlarda sodda va tezkor boshqaruv imkonini beradi. Ularning afzalligi aniq matematik model talab qilmasligidadir. Shu bilan birga, fuzzy qoidalarini shakllantirish ekspert bilimiga bog'liq bo'lib, tizim murakkablashgan sari qoidalar soni keskin ortishi mumkin.

Sun'iy neyron tarmoqlar va reinforcement learning asosidagi boshqaruv usullari gibrid energetika tizimlarining murakkab va o'zgaruvchan ish rejimlariga moslashish imkoniyatiga ega. Reinforcement learning asosidagi EMS real vaqt ma'lumotlari asosida boshqaruv strategiyasini adaptiv ravishda shakllantirishi mumkin. Shu bilan birga, ushbu usullarning asosiy cheklavlari sifatida katta hajmdagi o'quv ma'lumotlariga ehtiyoj, o'qitish jarayonining murakkabligi hamda qabul qilingan qarorlarning fizik va ekspluatatsion cheklavlarga muvofiqligini kafolatlash zarurati qayd etildi [15-17].

2-jadvalda Gibrid energetika tizimlarini boshqarish va optimallashtirish usullarining qiyosiy tahlili natijalari keltirilgan

2-jadval. Gibrid energetika tizimlarini boshqarish va optimallashtirish usullarining qiyosiy tahlili
Table 2. Comparative Analysis of Control and Optimization Methods for Hybrid Energy Systems

Usul	Noaniqlikni hisobga olish	Real vaqtga mosligi	Hisoblash murakkabligi	BESS bilan ishlash	Demand Response bilan integratsiya
Deterministik optimallashtirish	Past	O'rtacha	Past-o'rtacha	Yuqori	O'rtacha
Stoxastik optimallashtirish	Yuqori	O'rtacha	Yuqori	Yuqori	Yuqori
Robust optimallashtirish	Yuqori	O'rtacha	Yuqori	Yuqori	Yuqori
MILP	O'rtacha	O'rtacha	O'rtacha-yuqori	Yuqori	Yuqori
GA	O'rtacha	Past-o'rtacha	Yuqori	Yuqori	O'rtacha
PSO	O'rtacha	O'rtacha	O'rtacha-yuqori	Yuqori	O'rtacha
Fuzzy Logic	O'rtacha	Yuqori	Past	Yuqori	Yuqori
MPC	Yuqori	Yuqori	Yuqori	Juda yuqori	Juda yuqori
ANN	Yuqori	Yuqori	O'rtacha	Yuqori	Yuqori
Reinforcement Learning	Yuqori	Yuqori	Juda yuqori	Juda yuqori	Juda yuqori

Tahlil natijalariga ko'ra, boshqaruv vazifalarini bir vaqt masshtabida emas, balki ierarxik tarzda tashkil etish eng maqbul yondashuv hisoblanadi. Uzoq muddatli bosqichda PV, shamol va BESSning optimal quvvat va sig'imi aniqlanadi. Sutkalik bosqichda day-ahead scheduling orqali generatsiya, iste'mol va energiya saqlash rejimlari shakllantiriladi. Sutka ichidagi bosqichda yangilangan prognozlar asosida rejalashtirish natijalari tuzatiladi. Real vaqt bosqichida esa prognoz va haqiqiy holat orasidagi og'ishlar BESS, talabni boshqarish va boshqa moslashuvchan resurslar yordamida kompensatsiyalanadi. Talabni boshqarish usullarining tahlili shuni ko'rsatdiki, shamol va quyosh generatsiyasidagi qisqa muddatli nomuvofiqliklarni faqat energiya saqlash qurilmalari yordamida bartaraf etish har doim ham iqtisodiy jihatdan maqbul emas. Talabni boshqarish mexanizmlarini BESS bilan birgalikda qo'llash generatsiya va iste'mol o'rtasidagi balansni yaxshilash, cho'qqi yuklamalarni kamaytirish va energiya saqlash qurilmalarining ortiqcha sikllanishini cheklash imkonini beradi [20].

O'zbekiston elektr energetika tizimi uchun talabni boshqarish mexanizmlarini qayta tiklanuvchi energiya manbalari bilan birgalikda rivojlantirish istiqbolli yo'nalish sifatida baholandi. Bunda yirik sanoat iste'molchilari, elektr isitish va sovitish qurilmalari, nasos stansiyalari, elektr transport zaryadlash stansiyalari va boshqariladigan maishiy yuklamalardan moslashuvchan resurs sifatida foydalanish imkoniyatlari mavjud.

Qiyosiy tahlil asosida O'zbekiston EET uchun quyidagi boshqaruv konsepsiyasini qo'llash maqsadga muvofiq deb hisoblanadi: qayta tiklanuvchi generatsiyani prognozlash, day-ahead rejimlarni shakllantirish, intra-day rejalarni yangilash, talabni boshqarish va BESS quvvatini real vaqt rejimida muvofiqlashtirish. Mazkur yondashuv keyingi bosqichda vodorod energiya saqlash



tizimlarini integratsiyalash orqali yanada kengaytirilishi mumkin.

4. Xulosa (Conclusion)

O'tkazilgan tizimli va qiyosiy tahlil natijalari shamol elektr stansiyalari, quyosh fotoelektr stansiyalari va akkumulyator energiya saqlash tizimlariga ega bo'lgan gibril energetika tizimlarini samarali boshqarish uchun yagona universal usul mavjud emasligini ko'rsatdi. Boshqaruv usulini tanlashda qayta tiklanuvchi energiya manbalarining ulushi, generatsiya va yuklama noaniqligi, energiya saqlash qurilmalarining texnik xususiyatlari, hisoblash imkoniyatlari hamda boshqaruv vaqt masshtabi hisobga olinishi zarur.

Tahlil qilingan tadqiqotlar asosida deterministik usullar soddaligi bilan, stoxastik va robust optimallashtirish usullari esa noaniqlikni hisobga olish imkoniyati bilan ajralib turishi aniqlandi. MILP va boshqa matematik dasturlash usullari day-ahead va intra-day rejalashtirish masalalarida samarali bo'lsa, MPC real vaqtga yaqin boshqaruvda prognoz va texnik cheklavlarni birgalikda hisobga olish imkonini beradi. Fuzzy-mantiq, sun'iy neyron tarmoqlar va reinforcement learning asosidagi usullar esa adaptiv boshqaruv imkoniyatlarini kengaytiradi, biroq ularning hisoblash murakkabligi va ma'lumotlarga bo'lgan talabini hisobga olish lozim.

Shuningdek, BESSdan foydalanish qayta tiklanuvchi generatsiyaning qisqa muddatli o'zgarishlarini kompensatsiyalashda muhim ahamiyatga ega ekani, talabni boshqarish mexanizmlarini BESS bilan birgalikda qo'llash esa generatsiya va iste'mol o'rtasidagi nomuvofiqliklarni kamaytirish, tizimning balanslash imkoniyatlarini oshirish hamda energiya saqlash qurilmalarining ortiqcha sikllanishini cheklash imkonini beradi.

Tadqiqot natijalari asosida gibril energetika tizimlarini boshqarishda optimal loyihalash, prognozlash, sutkalik rejalashtirish, sutka ichidagi qayta rejalashtirish, real vaqtda dispatcherlash, lokal boshqaruv ketma-ketligiga asoslangan ierarxik yondashuvni qo'llash maqsadga muvofiq ekani aniqlandi.

O'zbekiston elektr energetika tizimida shamol va quyosh generatsiyasi ulushi oshib borishi sharoitida BESS, Demand Response va zamonaviy energiya boshqaruv tizimlarini kompleks qo'llash tizimning operativ moslashuvchanligini oshirish uchun istiqbolli yo'nalish hisoblanadi. Keyingi tadqiqotlarda ushbu yondashuvni vodorod energiya saqlash texnologiyalari bilan integratsiyalash, BESS va H₂ tizimlari o'rtasida quvvat taqsimotini optimallashtirish hamda yagona energiya dispatcherlash algoritmini ishlab chiqish maqsadga muvofiqdir.

ADABIYOT

1. Roy P., He J., Zhao T., Singh Y.V. Elektr energiyasi ishlab chiqarish uchun shamol–quyosh gibril qayta tiklanuvchi energiya tizimlarining so'nggi yutuqlari: A Review // *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*. – 2022. – Vol. 3. – P. 81–104. DOI: 10.1109/OJIES.2022.3144093.
2. Arsad A.Z., Hannan M.A., Al-Shetwi A.Q., Mansur M., Muttaqi K.M., Dong Z.Y., Blaabjerg F. Vodorod energiya saqlash tizimi integratsiyalashgan gibril qayta tiklanuvchi energiya tizimlari: A review analysis for future research directions // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2022. – Vol. 47, No. 39. – P. 17285–17312. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.208.
3. Modu B., Abdullah M.P., Bukar A.L., Hamza M.F. A Vodorod saqlash tizimiga ega gibril qayta tiklanuvchi energiya tizimlarining tizimli sharhi: quvvat va sig'imni aniqlash, optimallashtirish va energiyani boshqarish // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48, No. 97. – P. 38354–38373. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.126.
4. Saeed M.H., Rana M.S., Kausaraahmed M., El-Bayeh C.Z., Wang F. Talabga javob berish mexanizmlariga asoslangan mikrogridning iqtisodiy dispatcherlanishi // *International Journal of Renewable Energy Development*. – 2023. – Vol. 12, No. 4. – P. 749–759. DOI: 10.14710/ijred.2023.49165.
5. Elazab R., Abdelnaby A.T., Ali A.A. Talab tomonini boshqarishning turli usullarining mikrogridlarni rejalashtirishga ta'siri // *Clean Energy*. – 2024. – Vol. 8, No. 1. – P. 36–54. DOI: 10.1093/ce/zkad057.
6. Mohammed N., Ali M.M. Ikki bosqichli stoxastik dasturlash yordamida gibril qayta tiklanuvchi energetika tizimining optimal quvvat va sig'imini aniqlash // *International Journal of Energy Research*. – 2024. – Vol. 2024. – Article 2361858. DOI: 10.1155/2024/2361858.
7. M. Montaz Ali., Nouralden. Mohammed. Kvazi-optimal boshqaruv yordamida gibril qayta tiklanuvchi energetika tizimlarining optimal quvvat va sig'imini aniqlash // *Renewable Energy*. – 2024. – Vol. 226. – Article 120351. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120351.
8. M. A. Hossain. Akkumulyator degradatsiyasi cheklavlari hamda generatsiya manbalari va yuklamalar noaniqligini hisobga olgan holda gibril qayta tiklanuvchi energetika tizimini optimal o'lchamlashda Firefly algoritmidan foydalanish // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10, No. 7. – Article e26961. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26961.
9. Wei L., Li Y., Xie B., Xu K., Meng G. Talabga javob berish mexanizmi mavjud shamol–

quyosh–energiya saqlash tizimini meteorologik prognoz asosida ikki bosqichli optimal rejalashtirish // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, No. 6. – Article 1286. DOI: 10.3390/en17061286.

10. Jamal S., Pasupuleti J., Ekanayake J. A. Genetik algoritim yordamida optimallashtirilgan akkumulyator bankiga ega gibrid qayta tiklanuvchi energiya manbalari uchun qoidalarga asoslangan energiya boshqaruv tizimi // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14. – Article 4865. DOI: 10.1038/s41598-024-54333-0.

11 Nguyen Q.M., Nguyen D.L., Nguyen T.K. BESS degradatsiyasi va qayta tiklanuvchi energiya manbalari noaniqligini hisobga olgan holda mikrogridni optimal rejalashtirish uchun aralash butun sonli chiziqli dasturlash modeli // *Journal of Energy Storage*. – 2024. – Vol. 104, Part B. – Article 114663. DOI: 10.1016/j.est.2024.114663.

12. Ibrahim O., Abdul Aziz M.J., Ayop R., Dahiru A.T., Low W.Y., Sulaiman M.H., Amosa T.I. Akkumulyator energiya saqlash tizimi degradatsiyasini hisobga oluvchi integratsiyalashgan energiya boshqaruv tizimi uchun fuzzy-mantiqqa asoslangan zarrachalar to‘dasi optimallashtirish usuli // *Results in Engineering*. – 2024. – Vol. 24. – Article 102816. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102816.

13. Seng U.K., Malik H., García Márquez F.P., Alotaibi M.A. et al. PV–shamol–akkumulyator gibrid tizimi uchun fuzzy-mantiqqa asoslangan intellektual energiya boshqaruv tizimi: Malayziyadagi tijorat binosi misolida // *Journal of Energy Storage*. – 2024. – Vol. 102, Part A. – Article 114109. DOI: 10.1016/j.est.2024.114109.

14. El Mezdi K., El Magri A., Watil A., El Myasse I., Bahatti L. Fuzzy-mantiq boshqaruvchilari yordamida tarmoqqa ulangan PV–shamol–akkumulyator gibrid tizimlarida integratsiyalashgan boshqaruv va energiya oqimlarini boshqarish // *IFAC-PapersOnLine*. – 2024. – Vol. 58, No. 13. – P. 442–447. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.07.522.

15. Fresia M., Bordo L., Delfino F., Bracco S. Qayta tiklanuvchi energiya manbalari yuqori ulushga ega mikrogridlarda aktiv va reaktiv quvvatni bir kun oldindan optimal boshqarish // *Energy Conversion and Management: X*. – 2024. – Vol. 23. – Article 100598. DOI: 10.1016/j.ecmx.2024.100598.

16. Hosseini E., Horrillo-Quintero P., Carrasco-González D., García-Triviño P., Sarrias-Mena R., García-Vázquez C.A., Fernández-Ramírez L.M. Ko‘p darajali mikrogridda litiy-ion akkumulyator energiya saqlash qurilmasi uchun mustahkamlovchi o‘qitishga asoslangan energiya boshqaruv tizimi // *Journal of Energy Storage*. – 2025. – Vol. 109. – Article 115114. DOI: 10.1016/j.est.2024.115114.

17. Eyime E.E., Nwokolo S.C. et al. Quyosh–shamol–akkumulyator tizimlari uchun gibrid sun‘iy intellekt arxitekturalari: mashinaviy o‘qitish asosidagi boshqaruv, fuzzy energiya boshqaruvi, robust MPC va avtomatik manba almashtirish qurilmalari // *Results in Engineering*. – 2026. – Vol. 32. – Article 112150. DOI: 10.1016/j.rineng.2026.112150.

18. E. Hosseini, P. Horrillo-Quintero, D. Carrasco-González, P. García-Triviño va boshqalar, “Reinforcement learning-based energy management system for lithium-ion battery storage in multilevel microgrid,” *Journal of Energy Storage*, Vol. 109, 15 February 2025, Article 115114. DOI: 10.1016/j.est.2024.115114.

19. E. E. Eyime, S. C. Nwokolo, F. K. Al Housni, C. C. Ahia, “Hybrid AI architectures for solar–wind–battery systems: machine-learning control, fuzzy energy management, robust MPC, and automated source-switching hardware,” *Results in Engineering*, Vol. 32, 2026, Article 112150. DOI: 10.1016/j.rineng.2026.112150.

20. Gayibov T.Sh., Shanazarov A.E. Algorithm for Complex Optimization of Short-term Modes of Electric Power Systems // *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. Volume 11, Issue 3, 2024. -pp.21524-21530.

REFERENCES

1. Roy P., He J., Zhao T., Singh Y.V. Recent Advances of Wind-Solar Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review // *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*. – 2022. – Vol. 3. – P. 81–104. DOI: 10.1109/OJIES.2022.3144093.

2. Arsad A.Z., Hannan M.A., Al-Shetwi A.Q., Mansur M., Muttaqi K.M., Dong Z.Y., Blaabjerg F. Hydrogen energy storage integrated hybrid renewable energy systems: A review analysis for future research directions // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2022. – Vol. 47, No. 39. – P. 17285–17312. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.208.

3. Modu B., Abdullah M.P., Bukar A.L., Hamza M.F. A systematic review of hybrid renewable energy systems with hydrogen storage: Sizing, optimization, and energy management strategy // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48, No. 97. – P. 38354–38373. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.126.

4. Saeed M.H., Rana M.S., Kausaraahmed M., El-Bayeh C.Z., Wang F. Demand response based microgrid's economic dispatch // *International Journal of Renewable Energy Development*. – 2023. – Vol. 12, No. 4. – P. 749–759. DOI: 10.14710/ijred.2023.49165.

5. Elazab R., Abdelnaby A.T., Ali A.A. Impacts of multiple demand-side management strategies on microgrids planning: a literature survey // *Clean Energy*. – 2024. – Vol. 8, No. 1. – P. 36–54. DOI: 10.1093/ce/zkad057.
6. Mohammed N., Ali M.M. Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy System Using Two-Stage Stochastic Programming // *International Journal of Energy Research*. – 2024. – Vol. 2024. – Article 2361858. DOI: 10.1155/2024/2361858.
7. M. Montaz Ali., Nouralden. Optimal sizing of hybrid renewable energy systems using quasi-optimal control // *Renewable Energy*. – 2024. – Vol. 226. – Article 120351. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120351.
8. M. A. Hossain. Using firefly algorithm to optimally size a hybrid renewable energy system constrained by battery degradation and considering uncertainties of power sources and loads // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10, No. 7. – Article e26961. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26961.
9. Wei L., Li Y., Xie B., Xu K., Meng G. Two-Stage Optimal Scheduling Based on the Meteorological Prediction of a Wind–Solar–Energy Storage System with Demand Response // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, No. 6. – Article 1286. DOI: 10.3390/en17061286.
10. Jamal S., Pasupuleti J., Ekanayake J. A rule-based energy management system for hybrid renewable energy sources with battery bank optimized by genetic algorithm optimization // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14. – Article 4865. DOI: 10.1038/s41598-024-54333-0.
11. Nguyen Q.M., Nguyen D.L., Nguyen T.K. A mixed-integer linear programming model for microgrid optimal scheduling considering BESS degradation and RES uncertainty // *Journal of Energy Storage*. – 2024. – Vol. 104, Part B. – Article 114663. DOI: 10.1016/j.est.2024.114663.
12. Ibrahim O., Abdul Aziz M.J., Ayop R., Dahiru A.T., Low W.Y., Sulaiman M.H., Amosa T.I. Fuzzy logic-based particle swarm optimization for integrated energy management system considering battery storage degradation // *Results in Engineering*. – 2024. – Vol. 24. – Article 102816. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102816.
13. Seng U.K., Malik H., García Márquez F.P., Alotaibi M.A. et al. Fuzzy logic-based intelligent energy management framework for hybrid PV-wind-battery system: A case study of commercial building in Malaysia // *Journal of Energy Storage*. – 2024. – Vol. 102, Part A. – Article 114109. DOI: 10.1016/j.est.2024.114109.
14. El Mezdi K., El Magri A., Watil A., El Myasse I., Bahatti L. Integrated Control and Energy Flow Management for Hybrid Grid-Connected Photovoltaic/Wind Systems with Battery Storage Using Fuzzy Logic Controllers // *IFAC-PapersOnLine*. – 2024. – Vol. 58, No. 13. – P. 442–447. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.07.522.
15. Fresia M., Bordo L., Delfino F., Bracco S. Optimal day-ahead active and reactive power management for microgrids with high penetration of renewables // *Energy Conversion and Management: X*. – 2024. – Vol. 23. – Article 100598. DOI: 10.1016/j.ecmx.2024.100598.
16. Hosseini E., Horrillo-Quintero P., Carrasco-González D., García-Triviño P., Sarrias-Mena R., García-Vázquez C.A., Fernández-Ramírez L.M. Reinforcement learning-based energy management system for lithium-ion battery storage in multilevel microgrid // *Journal of Energy Storage*. – 2025. – Vol. 109. – Article 115114. DOI: 10.1016/j.est.2024.115114.
17. Eyime E.E., Nwokolo S.C. et al. Hybrid AI architectures for solar–wind–battery systems: Machine-learning control, fuzzy energy management, robust MPC, and automated source-switching hardware // *Results in Engineering*. – 2026. – Vol. 32. – Article 112150. DOI: 10.1016/j.rineng.2026.112150.
18. E. Hosseini, P. Horrillo-Quintero, D. Carrasco-González, P. García-Triviño va boshqalar, “Reinforcement learning-based energy management system for lithium-ion battery storage in multilevel microgrid,” *Journal of Energy Storage*, Vol. 109, 15 February 2025, Article 115114. DOI: 10.1016/j.est.2024.115114.
19. E. E. Eyime, S. C. Nwokolo, F. K. Al Housni, C. C. Ahia, “Hybrid AI architectures for solar–wind–battery systems: machine-learning control, fuzzy energy management, robust MPC, and automated source-switching hardware,” *Results in Engineering*, Vol. 32, 2026, Article 112150. DOI: 10.1016/j.rineng.2026.112150.
20. Gayibov T.Sh., Shanazarov A.E. Algorithm for Complex Optimization of Short-term Modes of Electric Power Systems // *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. Volume 11, Issue 3, 2024. -pp.21524-21530.