



# Genetik algoritm qoʻllanilgan energosamarador quyosh isitish tizimi

Umarov Sh. Khabibovich<sup>2</sup>, Murat F. Shamiyev<sup>1</sup>, Abror O. Pulatov<sup>1a)</sup>

<sup>1a)</sup> PhD, dots, Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, Oʻzbekiston; [abrorbidovich@mail.ru](mailto:abrorbidovich@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0069-9726>

<sup>1</sup> PhD, Toshkent davlat texnika universiteti, 100095, Oʻzbekiston; [hellomurat2013@gmail.com](mailto:hellomurat2013@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3915-8289>

<sup>2</sup>Deputy director for innovation, "Jizzax akkumulyator zavodi" AJ 130112; Oʻzbekiston, Jizzax, A sanoat zonasi; [info@jaz.uz](mailto:info@jaz.uz), <https://orcid.org/0009-0005-1325-5576>

**Dolzarbli:** dunyo boʻyicha energiya isteʼmolining oʻsishi, elektr energiyasi tariflarining oshib borishi hamda ekologik talablarning kuchayishi binolarni isitish sohasida barqaror va energosamarador yechimlarni izlashni ragʻbatlantirmoqda. Aholi sektori umumiy energiya isteʼmolida katta ulushni egallaydi, ayniqsa qishlari sovuq boʻlgan hududlarda, asosiy yuk aynan isitish tizimiga toʻgʻri keladi. Oddiy konstruksiyaga ega boʻlgan anʼanaviy elektr qozonlari elektr tarmogʻiga yuqori darajada bogʻliqligi va kechki yuklamani sezilarli oshirishi bilan ajralib turadi. Shu munosabat bilan isitish tizimlarining energosamaradorligi va avtonomligini oshirish muhim ilmiy va muhandislik vazifasiga aylanmoqda.

**Maqsad:** turar-joy binosi uchun gibrad isitish tizimini (PV–TES–BESS) ishlab chiqish, matematik tavsiflash va imitatsion modellashtirish boʻlib, genetik algoritim (GA) asosidagi operatsion rejalashtiruvchi yordamida Toshkentning qishki iqlim sharoitlarida tarmoqdan elektr energiyasi isteʼmolini minimallashtirishga qaratilgan.

**Usullari:** xalqaro tajriba va ushbu boshqaruv usullarining amaliy joriy etilishiga oid taqqoslovchi tahlil qoʻllaniladi.

**Natijalar:** Toshkentning qishki sharoitlari boʻyicha oʻtkazilgan modellashtirish natijalari taklif etilgan tizimning tarmoqqa bogʻliqligini sezilarli darajada kamaytirishini va isitishning avtonomligini oshirishini koʻrsatadi. Ishlab chiqilgan yondashuv sovuq iqlim sharoitlarida samarali ishlaydigan intellektual quyosh isitish tizimlarini yaratish uchun asos boʻlib xizmat qilishi mumkin.

**Kalit soʻzlar:** energetik samarador isitish tizimi; Quyosh panellari (PV); Issiqlik akkumulyatori; Akkumulyator batareyasi; Genetik algoritim; Sunʼiy intellekt; Turar-joy binolari; Optimallashtirish; Energiyani boshqarish; Gibrad energiya tizimi.

## Энергоэффективное солнечное отопление с применением генетического алгоритма

Umarov Sh. Khabibovich<sup>2</sup>, Мурат Ф. Шамиев<sup>1</sup>, Аброр О. Пулатов<sup>1, a)</sup>

<sup>1a)</sup> PhD, доцент, Ташкентский государственный технический университет, 100095, Узбекистан; [abrorbidovich@mail.ru](mailto:abrorbidovich@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0069-9726>

<sup>1</sup> PhD, Ташкентский государственный технический университет, 100095, Узбекистан; [hello\\_murat@mail.ru](mailto:hello_murat@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3915-8289>

<sup>2</sup> зам.директора по инновациям, АО "Джизакский аккумуляторный завод" (Джизак) 130112; Узбекистан; [info@jaz.uz](mailto:info@jaz.uz), <https://orcid.org/0009-0005-1325-5576>

**Актуальность:** рост мирового энергопотребления, повышение тарифов на электроэнергию и усиливающиеся экологические требования стимулируют поиск устойчивых и энергоэффективных решений в области отопления зданий. Жилой сектор занимает значительную долю общего энергопотребления, особенно в регионах с холодными зимами, где основная нагрузка приходится на отопление. Традиционные электрические котлы, несмотря на свою простоту, характеризуются высокой зависимостью от электросети и формируют значительную ночную нагрузку. В этой связи повышение энергоэффективности и автономности систем отопления становится актуальной научной и инженерной задачей.

**Цель:** разработка, математическое описание и имитационное моделирование гибридной системы отопления жилого здания (PV–TES–BESS), оснащённой оптимизатором режимов на основе генетического алгоритма (GA), применительно к зимним климатическим условиям Ташкента, с целью минимизации суточного потребления электроэнергии из сети при соблюдении нормативного температурного комфорта в помещениях.

**Методы:** используется международный опыт и сравнительный анализ практической реализации таких методов управления.

**Результаты:** результаты моделирования для зимних условий Ташкента показывают, что предложенная система значительно снижает зависимость от сети и повышает автономность отопления. Разработанный подход может служить основой для создания интеллектуальных солнечных систем отопления, эффективных в условиях холодного климата.

**Ключевые слова:** энергоэффективная система отопления; солнечные панели (PV); тепловой накопитель; аккумуляторная батарея; генетический алгоритм; искусственный интеллект; жилые здания; оптимизация; управление энергией; гибридная энергетическая система.

**For citation:** Umarov Sh.Kh., Shamiyev M.F., Pulatov A.O. Energy-efficient solar heating using a genetic algorithm. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 1, pp. 158-164.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20032880>

Received: 18.11.2025  
Revised: 14.12.2025  
Accepted: 17.02.2026  
Published: 26.03.2026

**Copyright:** © Umarov Sh. Khabibovich, Murat F. Shamiyev, Abror O. Pulatov, 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/>).



# Energy-efficient solar heating using a genetic algorithm

Umarov Sh. Khabibovich<sup>2</sup>, Murat F. Shamiev<sup>1</sup>, Abror O. Pulatov<sup>1a)</sup>

<sup>1a)</sup>DSc, prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; [abrorbidovich@mail.ru](mailto:abrorbidovich@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0069-9726>

<sup>1</sup>PhD, Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; [hellomurat2013@gmail.com](mailto:hellomurat2013@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0003-3915-8289>.

<sup>2</sup>Deputy director for innovation, JSC "Jizzakh battery plant", 130112; Uzbekistan, Jizzakh, Industrial Zone A; [info@jaz.uz](mailto:info@jaz.uz), <https://orcid.org/0009-0005-1325-5576>

**Relevance:** the growth of global energy consumption, rising electricity tariffs, and increasingly stringent environmental requirements stimulate the search for sustainable and energy-efficient solutions for building heating. The residential sector accounts for a significant share of total energy consumption, especially in regions with cold winters where the main load falls on heating. Traditional electric boilers, despite their simplicity, exhibit high dependence on the power grid and contribute substantially to nighttime peak loads. In this regard, improving the energy efficiency and autonomy of heating systems becomes an urgent scientific and engineering challenge.

**Aim:** to develop, mathematically describe, and simulate a hybrid residential building heating system (PV–TES–BESS) equipped with a GA-based operational scheduler, targeting Tashkent winter conditions, with the aim of minimizing daily grid energy consumption while maintaining  $T_{in} \geq 20^{\circ}\text{C}$

**Methods:** international experience and comparative analysis of practical implementations of these control methods are utilized.

**Results:** modeling results for winter conditions in Tashkent show that the proposed system significantly reduces grid dependence and increases the autonomy of heating. The developed approach can serve as a basis for creating intelligent solar heating systems effective in cold climate regions.

**Keywords:** energy-efficient heating system; Solar panels (PV); thermal storage; battery storage; genetic algorithm; artificial intelligence; residential buildings; optimization; energy management; hybrid energy system.

## 1. Введение (Introduction)

Современное развитие энергетического сектора характеризуется повышенными требованиями к надёжности, энергоэффективности и интеграции возобновляемых источников энергии. В фундаментальных исследованиях отечественных учёных подчёркивается, что энергетика Узбекистана находится в фазе технологической трансформации, предполагающей активное внедрение интеллектуальных систем управления, распределённой генерации и комплексных решений для повышения эффективности потребления энергии [1].

Одной из наиболее энергоёмких сфер остаётся отопление жилых зданий, особенно в регионах с холодным зимним периодом. По данным современных исследований, удельная тепловая нагрузка зданий в зимний сезон является ключевым фактором общего энергопотребления, а её снижение возможно за счёт оптимизации тепловых процессов, применения энергоэффективных технологий и интеграции солнечной энергетики [2–5]. Однако значительное рассогласование между графиком солнечной генерации (дневные часы) и тепловой нагрузкой зданий (вечер и ночь) ограничивает прямое использование фотоэлектрических систем (PV) для отопления.

Решение данной проблемы связано с развитием гибридных систем, в состав которых входят фотоэлектрические панели (PV), аккумуляторные батареи (BESS) и тепловые накопители (TES). Такие архитектуры позволяют аккумулировать энергию в периоды избыточной генерации и использовать её в моменты максимальной потребности, обеспечивая тем самым повышение автономности здания и снижение нагрузки на электрическую сеть [4,6–10]. Дополнительные исследования демонстрируют эффективность использования оптимизационных методов, включая эволюционные алгоритмы и методы управления, для распределения энергопотоков в гибридных системах [10–12].

Узбекистан обладает одним из самых высоких показателей солнечной радиации в регионе: среднегодовая глобальная горизонтальная радиация превышает  $5.4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{сут}$  [3], что делает солнечную генерацию особенно перспективной для жилого сектора. Согласно отчётам, установленная мощность солнечных электростанций в стране уже превысила до  $875 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  к 2025 году [16], и темпы роста продолжают увеличиваться. Дополнительные исследования подтверждают высокую востребованность энергоэффективных решений и оптимизационных подходов в инженерных системах Узбекистана, включая водоснабжение, электроприводы и инфраструктуру распределённой генерации [13,14,15,17].

Глобальной тенденцией последних лет стало применение технологий demand response, позволяющих адаптировать профиль энергопотребления к изменяющимся условиям генерации, погодным факторам и тарифам [18]. Такие подходы являются ключевыми при интеграции солнечных источников, поскольку позволяют сглаживать пиковые нагрузки и оптимизировать работу

энергоёмких систем — включая отопительные комплексы жилых зданий.

Учитывая изложенное, целью данной работы является разработка, математическое описание и имитационное моделирование гибридной системы отопления жилого здания (PV–TES–BESS), оснащённой оптимизатором режимов на основе генетического алгоритма (GA), применительно к зимним климатическим условиям Ташкента. Предлагаемый подход направлен на минимизацию суммарного суточного потребления электроэнергии из сети при соблюдении нормативного температурного комфорта ( $T_{in} \geq 20$  °C).

Научная новизна работы состоит в следующем. В отличие от известных исследований [5, 10, 12], в которых ГА применяется преимущественно для задачи оптимального выбора размеров (sizing) оборудования гибридных систем, в настоящей работе ГА используется для решения задачи оптимального оперативного управления (operational scheduling) трёхкомпонентной системой PV–TES–BESS. Оптимизация выполняется на суточном горизонте с учётом специфического климатического профиля Ташкента: значительного рассогласования между дневным пиком солнечной генерации и вечерне-ночным максимумом тепловой нагрузки в зимний период. Предложенное сочетание теплового (TES) и электрического (BESS) накопления под единым ГА-управлением применительно к условиям Узбекистана в доступной литературе ранее не рассматривалось.

## 2. Методы и материалы (Methods and materials)

На рис.1 представлена разрабатываемая система отопления, которая представляет собой интегрированный энергокомплекс PV–BESS–TES, включающий фотоэлектрическую установку, аккумуляторную батарею, тепловой накопитель и электрический котёл. Подобные конфигурации используются в современных исследованиях энергоэффективных зданий и систем распределённой генерации [4,9,10,19,20].

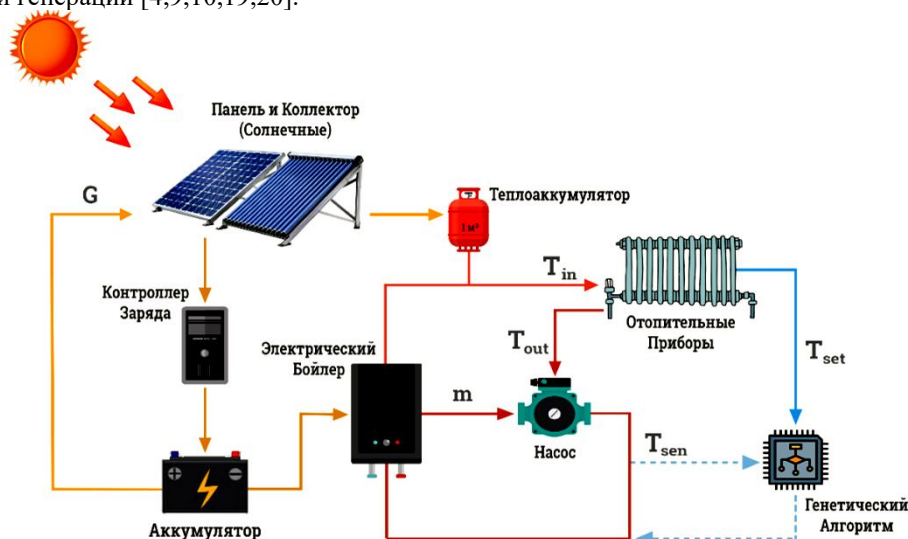


Рис. 1. Энергоэффективная система отопления

Fig. 1. Energy-efficient heating system

Применяемая архитектура опирается на тенденции развития энергетики Узбекистана, где наблюдается ускорение внедрения ВИЭ и интеллектуальных систем управления [1]. Концепция управления нагрузками соответствует принципам demand response, описанным в современных работах [18].

Для моделирования тепловой динамики здания используется одномассовая RC-модель, широко применяемая в расчётах тепловых потерь и динамики температуры в помещениях [4].

$$C_{th} \frac{dT_{in}}{dt} = -U_t(T_{in} - T_{out}) + Q_{heat}; \quad (1)$$

где  $C_{th}$ - тепловая емкость здания, кВт·ч/°C;  $U_t$ - тепловые потери здания, кВт/°C;  $T_{in}$  и  $T_{out}$  - внутренняя и уличная температуры, °C;  $Q_{heat}$ - тепловой поток от котла или теплового бака, кВт.

Выработка электроэнергии солнечными панелями выражается, согласно [3,7] следующим выражением:

$$P_{pv}(t) = P_{nom} \cdot f_{irr}(t) \cdot \eta_{inv}; \quad (2)$$

где  $P_{nom}$ - номинальная мощность ФЭС, кВт;  $f_{irr}(t)$ - относительная солнечная радиация по данным Global Solar Atlas;  $\eta_{inv}$  - коэффициент полезного действия инвертора.

Заряд и разряд аккумуляторных батарей можно учитывать согласно стандартной SOC-модель формуле [5,18]:



$$SOC[k+1] = SOC[k] + \eta_{ch} \cdot P_{ch}[k]\Delta t - \frac{1}{\eta_{dis}} \cdot P_{dis}[k]\Delta t; \quad (3)$$

где  $SOC[k]$ - уровень заряда батарей на шаге  $k$ , кВт·ч;  $P_{ch}[k]$ - мощность зарядки, кВт;  $P_{dis}[k]$ - мощность разрядки, кВт;  $\eta_{ch}, \eta_{dis}$ - КПД зарядки и разрядки,  $\Delta t$ - шаг моделирования.

Модель теплового накопителя описывается классической одно массовой моделью (well-mixed) [19] по формуле:

$$E_{TES}[k+1] = E_{TES}[k] + \eta_{ch}^{TES} \cdot Q_{in}[k] - \frac{1}{\eta_{dis}^{TES}} \cdot Q_{out}[k]; \quad (4)$$

где  $E_{TES}$ - текущая энергия в баке, кВт·ч;  $Q_{in}$  и  $Q_{out}$ - тепло идущее от котла в бак и тепло из бака на отопление;  $\eta_{ch}^{TES}$  и  $\eta_{dis}^{TES}$ - КПД теплообмена.

Производимая электрическим котлом тепловая энергия определяется следующим образом:

$$Q_{boiler}(t) = \eta_{ch} \cdot P_{boiler}(t); \quad (5)$$

Основной энергетический баланс в дневное время характеризуется в гибридных системах [18,19]:

$$E_{pv} = E_{load} + E_{TES}^{ch} + E_{BESS}^{ch} + E_{export}; \quad (6)$$

$E_{pv}$ - общая энергия, выработанная ФЭС за интервалом  $\Delta t$ ;  $E_{load}$ -электроэнергия для питания котла и других вспомогательных оборудований;  $E_{TES}^{ch}$  - энергия для нагрева вод в баке;  $E_{BESS}^{ch}$ - энергия для заряда аккумуляторных батарей;  $E_{export}$ - отдача энергии в сеть.

В ночное время:

$$E_{load} = E_{TES}^{dis} + E_{BESS}^{dis} + E_{grid}; \quad (7)$$

где,  $E_{TES}^{dis}$ - энергия, идущая от бака в отопление;  $E_{BESS}^{dis}$ - энергия от аккумуляторов;  $E_{grid}$ - энергия от сети.

При этом целевой функцией работы генетического алгоритма является:

$$\min F = \sum_{k=1}^{96} E_{grid}[k]; \quad (8)$$

Конкретная роль ГА в данной работе — оперативное управление суточным расписанием энергопотоков, а не подбор размеров оборудования. Хромосома особи кодирует дискретный вектор управляющих переменных для каждого из 96 временных шагов ( $\Delta t = 15$  мин): мощность котла  $P_{boiler}[k]$ , мощность заряда/разряда BESS —  $P_{ch}[k]/P_{dis}[k]$  - и тепловой поток в/из TES -  $Q_{in}[k]/Q_{out}[k]$ . Ограничения оптимизации:  $SOC_{min} \leq SOC[k] \leq SOC_{max}$ ;  $E_{TES}^{min} \leq E_{TES}[k] \leq E_{TES}^{max}$ ;  $T_{in}[k] \geq 20$  °C; балансовые уравнения (6)–(7). Параметры ГА: размер популяции — 100 особей, число поколений — 200, вероятность скрещивания — 0,85, вероятность мутации — 0,02, отбор - турнирный. Такая постановка принципиально отличается от rule-based управления, при котором решения принимаются локально по пороговым значениям без учёта прогноза на весь горизонт суток: ГА решает задачу как единую многошаговую оптимизацию, заблаговременно накапливая энергию в TES в периоды максимальной солнечной генерации и рационально распределяя разряд BESS на ночные часы. Методы эволюционной оптимизации для гибридных энергосистем подробно описаны в работах [5, 10, 12, 20].

### 3. Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Результаты моделирования демонстрируют, что предложенная гибридная система отопления, основанная на интеграции фотоэлектрической установки, теплового накопителя и аккумуляторной батареи, способна существенно снизить потребление электроэнергии из сети в зимний период. Фотоэлектрическая система мощностью 10 кВт обеспечивает в среднем 18–22 кВт·ч выработки в течение типичного зимнего дня, что соответствует климатическим характеристикам Узбекистана и подтверждается данными Global Solar Atlas [3] и IEA [2]. При этом пик генерации приходится на середину дня, что создаёт существенный временной разрыв между максимальной выработкой энергии и временем максимальной тепловой нагрузки. Данное рассогласование делает невозможным прямое использование солнечной генерации для отопления без применения накопителей, что также отмечается в ряде исследований по солнечному теплоснабжению [4,6].

В течение дневного периода накопление тепловой энергии в TES является ключевым механизмом обеспечения автономности системы. Тепловой накопитель объёмом 1 м<sup>3</sup> способен аккумулировать до 46.5 кВт·ч тепловой энергии, и расчёты показали, что он полностью заряжается к 13:00–16:00 за счёт избыточной солнечной генерации. Такой уровень аккумуляции достаточен для покрытия 70–80% тепловой нагрузки в ночные часы. Основной вклад TES в суточный баланс тепловой энергии подтверждает выводы международных исследований, показывающих высокую эффективность теплоаккумуляторов в системах солнечного теплоснабжения зданий. Динамика разряда TES соответствует теплофизической модели и позволяет стабильно поддерживать температуру внутреннего воздуха на уровне выше 20°C до утра, что согласуется с результатами



RC-модели теплового поведения здания [4].

Аккумуляторная батарея (BESS) в исследуемой системе выполняет вспомогательную функцию — она компенсирует кратковременные пики тепловой нагрузки в вечерний и поздний ночной периоды, когда разряд TES достигает нижнего уровня. В таких условиях BESS обеспечивает до 2–4 часов дополнительного покрытия нагрузки, снижая потребление энергии из сети и сглаживая пики. Полученные результаты SOC полностью согласуются с типичным поведением литий-ионных накопителей в гибридных системах и микрогридах [11]. Однако по абсолютному вкладу TES значительно превосходит BESS, что подтверждает выводы предыдущих работ о том, что для отопления предпочтительнее использовать теплоаккумуляторы, нежели электрические батареи [4,6].

Важным аспектом исследования является влияние генетического алгоритма на общую эффективность системы. Целевая функция GA минимизирует суммарное потребление энергии из сети, и результаты моделирования показывают, что оптимизационный алгоритм обеспечивает дополнительное снижение потребления на 10–15% по сравнению с традиционным rule-based управлением. Это подтверждает эффективность эволюционных алгоритмов в задачах распределения потоков энергии и управления гибридными системами [5,10,12]. Применение GA позволяет корректно выбирать моменты зарядки TES и BESS, перераспределять солнечную генерацию в течение дня и оптимизировать график работы электрического котла. Аналогичные результаты о повышении эффективности при использовании оптимизационных методов приводятся в исследованиях отечественных авторов по управлению электроприводами и энергетическими объектами [13-15].

#### 4. Заключение (Conclusion)

Совокупный анализ энергопотоков показывает, что предложенная архитектура обеспечивает снижение сетевого потребления до 4–5 кВт·ч в сутки, что соответствует 75–90% экономии по сравнению с базовым сценарием электрического отопления. Достигнутые показатели находятся в диапазоне, характерном для современных высокоэффективных гибридных систем PV–TES–BESS, представленных в международных исследованиях [4-11]. При этом тепловой режим здания остаётся стабильным: температура внутренних помещений удерживается выше санитарных требований на протяжении всего ночного периода, что подтверждает корректность используемых тепловых моделей и адекватность интегрированной стратегии управления.

Таким образом, результаты моделирования демонстрируют, что интеграция фотоэлектрической генерации с тепловыми и электрическими накопителями, дополненная оптимизацией на основе генетического алгоритма, является эффективным техническим решением для энергосберегающих отопительных систем в климатических условиях Узбекистана. Полученные данные согласуются с мировыми трендами исследований в области интеллектуальных энергетических систем и подтверждают высокую перспективность внедрения подобных гибридных комплексов как на уровне частных домовладений, так и в составе локальных распределённых энергетических сетей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аллаев К.Р. Современная энергетика и перспективы её развития /под ред. Салимова А.У. – Т.: Fan va texnologiyalar nashriyot-manbaa uyi, 2021. – 952 с.
2. International Energy Agency (IEA). Renewables 2023. Paris: IEA; 2023. Available from: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023> .
3. World Bank Group. Global Solar Atlas 2.0; 2024. Available from: <https://globalsolaratlas.info>.
4. Lei Lei, Shaodan Huang, A mathematical model of the room temperature dynamic response in multi-zone buildings, E3S Web of Conferences 356, 03034 (2022) ROOMVENT 2022, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235603034>.
5. Magnor Dirk, Dirk Uwe Sauer. SOptimization of PV Battery Systems Using Genetic Algorithms Energy Procedia. 2016;99:332–340. doi:10.1016/j.egypro.2016.10.123.
6. Sarbu I, Sebarchievici C. A comprehensive review of thermal energy storage. Sustainability. 2018;10:191. doi:10.3390/su10010191.
7. Yang H, Zhou W, Lu L. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind systems. Energy. 2008;82:354–367. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.08.005>.
8. Jiangyang Liu, Zhongbing Liu, Yaling Wu. Impact of climate on photovoltaic battery energy storage systems: a modelling study. //Renewable Energy. 2022;191:625–638. doi:10.1016/j.renene.2022.04.082.
9. Zanetti E, Aprile M, Kum D, Scoccia R, Motta M. Energy saving potentials of a PV-assisted heat pump via optimal control. //Journal of Building Engineering. 2020;27:100854. doi:10.1016/j.jobee.2019.100854.



10. Maleki A, Pourfayaz F. Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms. //Solar Energy. 2015;115:471–483. doi:10.1016/j.solener.2015.03.004.
11. Zeng Y, et al. State-of-charge estimation for lithium-ion batteries: a hybrid model-driven/data-driven approach. Batteries. 2023;9(7):358. doi:10.3390/batteries9070358.
12. Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Wiley; 2001.
13. Umarov S, Tulyaganov M, Abdullabekov I, Adilova Sh. Optimization of asynchronous drive modes considering thermal transient processes. AIP Conf. Proc. 2025;3331. doi:10.1063/5.0305786.
14. Umarov S, Tulyaganov M, Oripov S, Boqijonov U. Simulation of valve converters with periodic topology using a modified Laplace transform. /AIP Conf. Proc. 2025;3331. doi:10.1063/5.0305792.
15. Petrushin AD, Tulyaganov M. Optimal control of switched reluctance motor for high-speed rail transport. ICIEAM 2024. doi:10.1109/ICIEAM60818.2024.10553741.
16. Kursiv Media. Solar PV generation in Uzbekistan reached 875 million kWh. 2025. Available from: <https://www.kursiv.media/>.
17. Kun.uz. Green energy production in Uzbekistan exceeded 20%. 2025. Available from: <https://kun.uz/>
18. Radionova O.V, Sitdikov R.A. Demand response in modern power systems. //Problems of energy and sources saving. 2025;1:17–23. doi:10.5281/zenodo.15094558.
19. David Parra, Stuart A. Norman, Gavin S. Walker, Optimum community energy storage for renewable energy and demand load management, Applied Energy Volume 200, 15 August 2017, Pages 358-369, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.048>.
20. A.M.S.M.H.S. Attanayaka, J.P. Karunadasa, K.T.M.U. Hemapala, Estimation of state of charge for lithium-ion batteries. //A Review, AIMS Energy 2019, Volume 7, Issue 2: 186-210. doi: 10.3934/energy.2019.2.186.

## REFERENCES

1. Allaev K.R. Modern energy and prospects for its development / edited by Salimov A.U. – T.: Fan va texnologiyalar nashriyot-manbaa uyi, 2021. – 952 p.
2. International Energy Agency (IEA). Renewables 2023. Paris: IEA; 2023. Available from: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>.
3. World Bank Group. Global Solar Atlas 2.0; 2024. Available from: <https://globalsolaratlas.info>.
4. Lei Lei, Shaodan Huang, A mathematical model of the room temperature dynamic response in multi-zone buildings, /E3S Web of Conferences 356, 03034 (2022) ROOMVENT 2022, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235603034>.
5. Magnor Dirk, Dirk Uwe Sauer. SOptimization of PV Battery Systems Using Genetic Algorithms Energy Procedia. 2016;99:332–340. doi:10.1016/j.egypro.2016.10.123.
6. Sarbu I, Sebarchievici C. A comprehensive review of thermal energy storage. Sustainability. 2018;10:191. doi:10.3390/su10010191.
7. Yang H, Zhou W, Lu L. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind systems. Energy. 2008;82:354–367. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.08.005>.
8. Jiangyang Liu, Zhongbing Liu, Yaling Wu. Impact of climate on photovoltaic battery energy storage systems: a modelling study. //Renewable Energy. 2022;191:625–638. doi:10.1016/j.renene.2022.04.082.
9. Zanetti E, Aprile M, Kum D, Scoccia R, Motta M. Energy saving potentials of a PV-assisted heat pump via optimal control. //Journal of Building Engineering. 2020;27:100854. doi:10.1016/j.jobe.2019.100854.
10. Maleki A, Pourfayaz F. Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms. //Solar Energy. 2015;115:471–483. doi:10.1016/j.solener.2015.03.004.
11. Zeng Y, et al. State-of-charge estimation for lithium-ion batteries: a hybrid model-driven/data-driven approach. Batteries. 2023;9(7):358. doi:10.3390/batteries9070358.
12. Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Wiley; 2001.
13. Umarov S, Tulyaganov M, Abdullabekov I, Adilova Sh. Optimization of asynchronous drive modes considering thermal transient processes. /AIP Conf. Proc. 2025;3331. doi:10.1063/5.0305786.
14. Umarov S, Tulyaganov M, Oripov S, Boqijonov U. Simulation of valve converters with periodic topology using a modified Laplace transform. /AIP Conf. Proc. 2025;3331. doi:10.1063/5.0305792.
15. Petrushin AD, Tulyaganov M. Optimal control of switched reluctance motor for high-speed rail transport. ICIEAM 2024. doi:10.1109/ICIEAM60818.2024.10553741.
16. Kursiv Media. Solar PV generation in Uzbekistan reached 875 million kWh. 2025. Available from: <https://www.kursiv.media/>.



17. Kun.uz. Green energy production in Uzbekistan exceeded 20%. 2025. Available from: <https://kun.uz/>.
18. Radionova O.V., Sitdikov R.A. Demand response in modern power systems. //Problems of energy and sources saving. 2025;1:17–23. doi:10.5281/zenodo.15094558.
19. David Parra, Stuart A. Norman, Gavin S. Walker, Optimum community energy storage for renewable energy and demand load management, Applied Energy Volume 200, 15 August 2017, Pages 358-369, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.048>.
20. A.M.S.M.H.S. Attanayaka, J.P. Karunadasa, K.T.M.U. Hemapala, Estimation of state of charge for lithium-ion batteries - A Review, AIMS Energy 2019, Volume 7, Issue 2: 186-210. doi: 10.3934/energy.2019.2.186.