



**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ  
САМОПОТРЕБЛЕНИЯ БЫТОВОЙ СЕТЕВОЙ  
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ  
УПРАВЛЕНИЕМ И ЭЛЕКТРОМОБИЛЕМ**

*Йўлдошов Озодбек Нодирович*

*Алмалыкский государственный технический институт, студент группы 15-  
23 ЕЕ*

*Алмалык, Узбекистан*

**Аннотация**

В работе анализируются данные годового мониторинга (2024 г.) сетевой крышной фотоэлектрической системы (ФЭС) номинальной мощностью 10,56 кВт, установленной на жилом доме. За 2024 год система выработала 10 106 кВт·ч электроэнергии при выраженной сезонной неравномерности: от 148 кВт·ч в декабре до 1556 кВт·ч в июле. Установлено, что в дни высокой выработки доля прямого самопотребления низка (около 30 %), а значительная часть энергии экспортируется в сеть при тарифе продажи ниже тарифа покупки. Для повышения самопотребления предложен и реализован подход интеллектуального управления энергией на базе системы Home Assistant, поминутного учёта и использования аккумулятора электромобиля в качестве гибкого накопителя, с учётом «углеродоёмкости» сетевой энергии (данные сервиса Electricity Maps через API). Результаты показывают существенный рост доли самопотребления и «чистой» энергии в потреблении в солнечные дни (до ~90 %). Сделаны выводы о применимости подхода в условиях высокого солнечного потенциала Узбекистана.



**Ключевые слова:** фотоэлектрическая система, сетевая ФЭС, самопотребление, интеллектуальное управление энергией, электромобиль, гибкое хранение, углеродоёмкость сети, микроинвертор.

### Abstract

This study analyses one year (2024) of monitoring data from a 10.56 kW grid-connected rooftop photovoltaic (PV) system installed on a residential house. In 2024 the system generated 10,106 kWh with strong seasonal variation, from 148 kWh in December to 1,556 kWh in July. On high-generation days the direct self-consumption share is low (about 30 %), while a large part of the energy is exported to the grid at a sell price lower than the buy price. To increase self-consumption, an intelligent energy-management approach is proposed and implemented, based on the Home Assistant platform, minute-level metering and the use of an electric-vehicle battery as flexible storage, taking into account grid carbon intensity (Electricity Maps data via API). The results show a substantial increase in the self-consumed and the “clean” share of consumed energy on sunny days (up to ~90 %). Conclusions are drawn on the applicability of the approach under Uzbekistan’s high solar potential.

**Keywords:** photovoltaic system, grid-connected PV, self-consumption, intelligent energy management, electric vehicle, flexible storage, grid carbon intensity, microinverter.

### 1. Введение

Стремительное удешевление фотоэлектрических модулей и распространение распределённой генерации сделали бытовые крышные ФЭС одним из ключевых элементов перехода к низкоуглеродной энергетике. Для сетевых систем без накопителя характерна проблема несовпадения профилей выработки и потребления: пик генерации приходится на середину дня, тогда



как бытовое потребление максимально утром и вечером. В результате значительная часть выработанной энергии экспортируется в сеть, а при типичной для многих рынков разнице между ценой покупки и продажи это снижает экономическую эффективность системы.

Доля энергии, потребляемой непосредственно владельцем системы, называется самопотреблением; повышение этого показателя увеличивает выгоду от ФЭС и снижает нагрузку на распределительную сеть [1]. Основными способами повышения самопотребления являются аккумуляторное хранение и управление спросом (demand-side management) [1, 2]. В последние годы как гибкий накопитель всё чаще рассматривается аккумулятор электромобиля (ЭМ): смещение времени его зарядки на период максимальной солнечной генерации существенно повышает самопотребление [3, 4].

Узбекистан обладает высоким солнечным потенциалом (в среднем около 300 солнечных дней в году), и крышная фотоэнергетика активно развивается. При этом большинство устанавливаемых систем являются сетевыми и не имеют накопителей, что делает задачу повышения самопотребления особенно актуальной. Современные системы управления энергией «умного дома» позволяют автоматизировать управление спросом при низких затратах [5]. Анализ реального опыта эксплуатации подобных систем позволяет выявить практические закономерности и подходы, применимые в условиях Узбекистана.

Целью настоящей работы является анализ годовых данных мониторинга реальной бытовой сетевой ФЭС и оценка возможности повышения её самопотребления средствами интеллектуального управления. Задачи: (1) оценить выработку и сезонную неравномерность системы; (2) проанализировать суточные энергобалансы и структуру потребления; (3)



предложить и описать алгоритм автоматического повышения самопотребления с использованием аккумулятора электромобиля и данных об углеродоёмкости сети.

## 2. Материалы и методы

Объектом исследования является сетевая крышная ФЭС, установленная на жилом доме. Система состоит из 22 фотоэлектрических модулей Hanwha Q.Peak Duo XL суммарной номинальной мощностью 10,56 кВт, размещённых на двух скатах крыши с восточной и западной ориентацией (10 и 12 модулей соответственно). Преобразование осуществляется микроинверторами APsystems DS3-L; учёт ведётся двунаправленным счётчиком электросетевой компании. Система не имеет стационарного аккумулятора и не работает при отключении сети; в качестве гибкого накопителя используется аккумулятор электромобиля. Обобщённая схема энергопотоков приведена на рисунке 1.



*Рис. 1. Схема энергопотоков бытовой сетевой ФЭС с интеллектуальным управлением*



Данные о выработке, потреблении, экспорте в сеть и импорте из сети получены из системы поминутного мониторинга энергопотребления, установленной в электрощите дома, и охватывают 2024 год. Для оценки «углеродоёмкости» потребляемой сетевой энергии использовались данные сервиса Electricity Maps, получаемые через программный интерфейс (API) и характеризующие структуру генерации в энергосистеме (газ, уголь, ветер, гидро- и солнечная энергия). Алгоритм управления реализован на платформе автоматизации «умного дома» Home Assistant.

Основные характеристики системы и показатели за 2024 год приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Характеристики ФЭС и основные показатели за 2024 год**

Параметр	Значение
Номинальная мощность	10,56 кВт (22 модуля)
Фотоэлектрические модули	Hanwha Q.Peak Duo XL
Ориентация массивов	Восток (10) и запад (12)
Инверторы	Микроинверторы APsystems DS3-L
Учёт	Двунаправленный счётчик
Накопитель	Стационарный отсутствует; аккумулятор ЭМ как гибкое хранение
Годовая выработка (2024)	10 106 кВт·ч ( $\approx$ 10 МВт·ч)
Удельная выработка	$\approx$ 957 кВт·ч/кВт·год



Параметр	Значение
Диапазон месячной выработки	148 (дек.) – 1556 (июль) кВт·ч
Годовое энергопотребление дома*	83 ГДж (среднее по аналогичным домам $\approx$ 133 ГДж)
Доля энергии на отопление*	63 %
Выбросы CO <sub>2</sub> *	$\approx$ 4,8 т/год

\* по результатам энергоаудита дома (газ и электроэнергия).

### 3. Результаты

#### 3.1. Выработка и сезонная неравномерность

За 2024 год система выработала 10 106 кВт·ч, что соответствует удельной выработке около 957 кВт·ч на 1 кВт установленной мощности. Выработка характеризуется значительной сезонной неравномерностью, обусловленной сезонными изменениями солнечной радиации, продолжительности светового дня и облачности: в декабре, который выдался облачным, выработано лишь 148 кВт·ч, в холодном, но более солнечном январе — 220 кВт·ч, тогда как в июле — 1556 кВт·ч (рисунок 2). Таким образом, летняя месячная выработка превышает зимнюю более чем в десять раз.

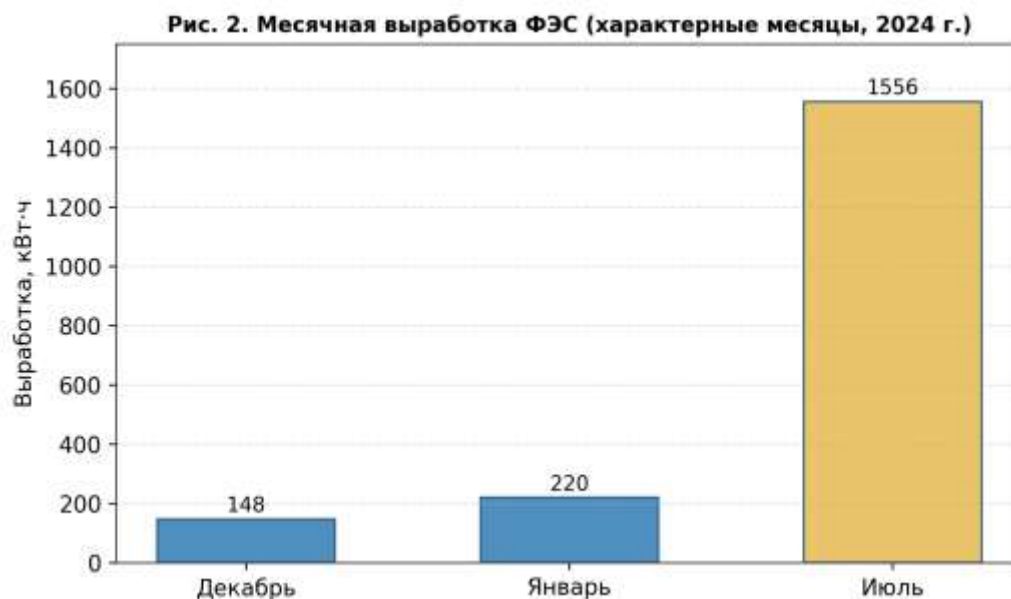


Рис. 2. Месячная выработка ФЭС в характерные месяцы 2024 года

При этом потребление дома в зимние месяцы, наоборот, максимально: 1147 кВт·ч в декабре и 1091 кВт·ч в январе, поскольку около 63 % всей потребляемой энергии расходуется на отопление. Это приводит к выраженному сезонному несовпадению генерации и спроса: зимой система покрывает лишь малую долю потребности, а летом образуется значительный избыток.

### 3.2. Суточный энергобаланс

Анализ суточных балансов показывает, что даже в облачные дни выработка может заметно превышать потребление. В рассмотренный облачный день система выработала 40,3 кВт·ч, при этом потребление дома составило 18,3 кВт·ч; в сеть экспортировано 28,4 кВт·ч и импортировано 6,5 кВт·ч (рисунок 3). Доля прямого самопотребления (отношение использованной на месте солнечной энергии к выработке) составила лишь около 30 %, а чистый экспорт в сеть — около 22 кВт·ч.

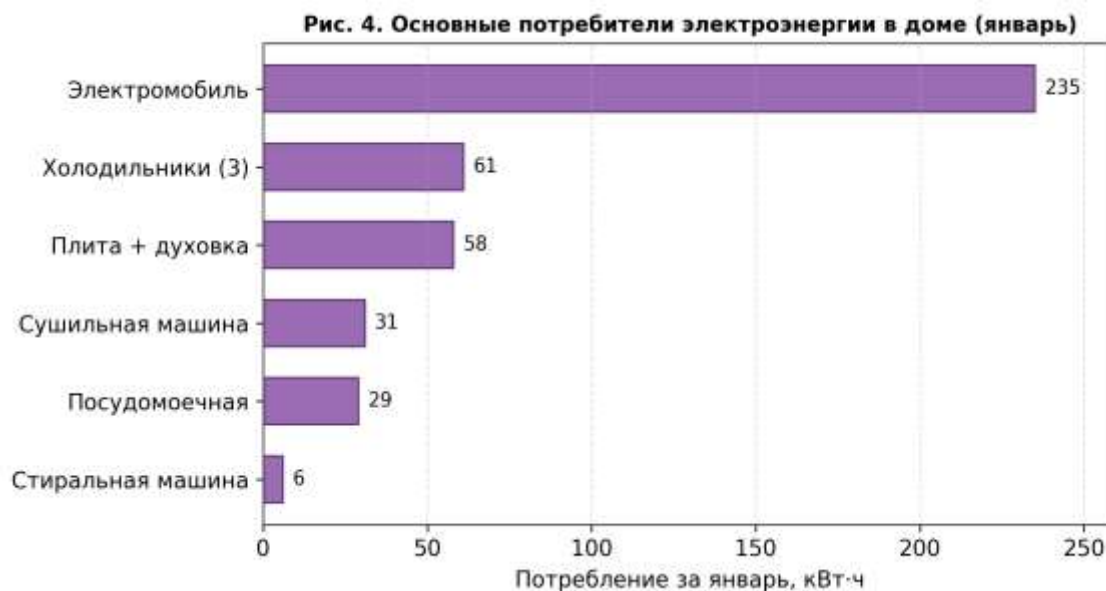


*Рис. 3. Суточный энергобаланс системы в облачный день*

В жаркий летний день (температура воздуха 35,1 °С) система выработала 58 кВт·ч, из которых 53 кВт·ч использованы в доме, в том числе на кондиционирование (кондиционер мощностью 36 000 ВТУ проработал 16 часов, потребив 24 кВт·ч) и зарядку электромобиля. Это показывает, что при совпадении пиков выработки и потребления самопотребление существенно возрастает.

### 3.3. Структура потребления

Структура потребления подтверждает определяющую роль крупных электроприёмников. В январе крупнейшим потребителем стал электромобиль (235 кВт·ч), далее следуют три холодильника (61 кВт·ч), электроплита с духовкой (58 кВт·ч), сушильная машина (31 кВт·ч), посудомоечная (29 кВт·ч) и стиральная (6 кВт·ч) машины (рисунок 4). Наличие крупного управляемого потребителя — электромобиля — является ключевой предпосылкой для повышения самопотребления.



*Рис. 4. Основные потребители электроэнергии в доме (январь)*

### 3.4. Алгоритм оптимизации самопотребления

Поскольку цена покупки энергии из сети выше цены её продажи, экономически целесообразно максимально использовать избыток выработки на месте, а не экспортировать его. В качестве накопителя предложено использовать аккумулятор электромобиля. На платформе Home Assistant реализован алгоритм, который ежеминутно проверяет условия и при наличии избытка направляет его на зарядку электромобиля (рисунок 5). Зарядка инициируется, если: (1) энергобаланс дома без учёта электромобиля отрицателен (имеется избыток, экспортируемый в сеть); (2) электромобиль подключён к зарядному устройству; (3) уровень заряда его батареи ниже заданного. Управляющий сигнал обновляется каждую минуту в интервале от одного часа после восхода до одного часа до захода солнца.



Рис. 5. Логика автоматизации самопотребления (ЭМ как гибкое хранение)

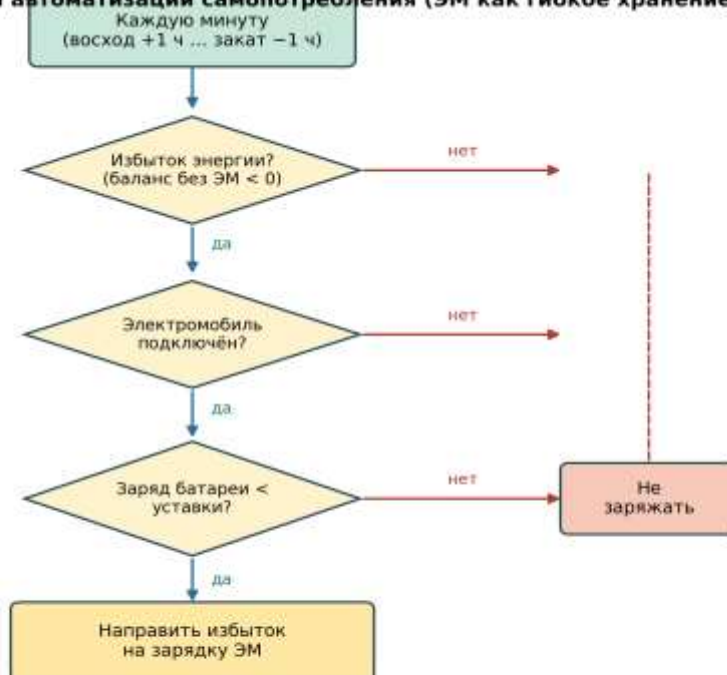


Рис. 5. Логика автоматизации самопотребления (электромобиль как гибкое хранение)

Дополнительно, по данным Electricity Maps, оценивалась «чистота» потребляемой сетевой энергии. В переменнo-облачный день около половины потреблённой энергии приходилось на возобновляемые источники, тогда как после солнечного дня этот показатель достигал примерно 90 %; зарядку электромобиля удавалось обеспечить практически полностью за счёт солнечной энергии.

#### 4. Обсуждение

Полученные результаты согласуются с известными выводами литературы о том, что для сетевых бытовых ФЭС без накопителя доля прямого самопотребления, как правило, невелика, и её повышение является ключевой задачей [1]. Среди способов её решения управление спросом обеспечивает



умеренный прирост, тогда как хранение энергии — более значительный [1, 2]. В рассмотренном случае роль накопителя выполняет аккумулятор электромобиля, что согласуется с результатами исследований по «умной» зарядке ЭМ для повышения самопотребления [3, 4], а недорогие платформы управления энергией «умного дома» делают такую автоматизацию практически осуществимой [5].

Существенным фактором является сезонное несовпадение: зимой выработка минимальна, а потребление (прежде всего на отопление) максимально. Это ограничивает годовую долю самопотребления и указывает на целесообразность сочетания ФЭС с другими мерами — повышением энергоэффективности здания, электрификацией отопления тепловыми насосами и управлением спросом. Структура генерации сети также важна: в энергосистемах с высокой долей газовой генерации повышение самопотребления солнечной энергии напрямую снижает углеродный след домохозяйства.

Для условий Узбекистана выводы исследования особенно актуальны. Высокий уровень солнечной радиации обеспечивает большую выработку и менее выраженную зимнюю «просадку» выработки, а распространение сетевых систем без накопителей делает алгоритмы управления спросом и использования электромобилей как гибких накопителей экономически привлекательными. Учёт разницы тарифов покупки и продажи, а также применение недорогих средств автоматизации (например, Home Assistant) позволяют повысить эффективность уже установленных систем без значительных капитальных затрат.

Ограничения работы связаны с тем, что исследование основано на данных одного объекта и отдельных характерных суток; для обобщения результатов необходимы измерения на репрезентативной выборке домохозяйств и полный



годовой ряд помесечных данных. Тем не менее рассмотренный случай наглядно иллюстрирует основные закономерности эксплуатации бытовых сетевых ФЭС.

## 5. Заключение

На основе годовых данных мониторинга бытовой сетевой ФЭС мощностью 10,56 кВт показано, что система обеспечивает существенную выработку (10 106 кВт·ч за 2024 год) при сильной сезонной неравномерности и низкой доле прямого самопотребления в дни высокой выработки (около 30 %). Предложен и реализован алгоритм интеллектуального управления на базе Home Assistant, использующий аккумулятор электромобиля как гибкий накопитель и данные об углеродоёмкости сети, что позволяет повысить долю самопотребления и «чистой» энергии в потреблении (до ~90 % в солнечные дни).

Подход не требует значительных дополнительных вложений и применим к уже эксплуатируемым системам. Для условий Узбекистана с его высоким солнечным потенциалом сочетание сетевых ФЭС, управления спросом и использования электромобилей в качестве гибких накопителей представляется перспективным направлением повышения эффективности бытовой солнечной энергетики. Дальнейшие исследования целесообразно направить на накопление полных годовых рядов данных по выборке домохозяйств и технико-экономическую оценку предложенных алгоритмов в местных условиях.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Luthander R., Widén J., Nilsson D., Palm J. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review // Applied Energy. – 2015. – Vol. 142. – P. 80–94. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.12.028.



2. Castillo-Cagigal M., Caamaño-Martín E., Matallanas E. et al. PV self-consumption optimization with storage and Active DSM for the residential sector // *Solar Energy*. – 2011. – Vol. 85, No. 9. – P. 2338–2348.

3. Widén J. Improved photovoltaic self-consumption with appliance scheduling in 200 single-family buildings // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 126. – P. 199–212.

4. Systemic Evaluation of PV Self-Consumption Optimization Using Electric Vehicles // *World Electric Vehicle Journal*. – 2024. – Vol. 15, No. 3. – Art. 98. DOI: 10.3390/wevj15030098.

5. Beaudin M., Zareipour H. Home energy management systems: A review of modelling and complexity // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 45. – P. 318–335.

6. Electricity Maps. Real-time and historical electricity carbon intensity data [Электронный ресурс]. URL: <https://app.electricitymaps.com> (дата обращения: 14.06.2026).

7. Toirov, Olimjon, et al. "Simulation model of an asynchronous generator integrated with a power supply system at different wind speeds." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 3331. No. 1. AIP Publishing LLC, 2025.

8. Pirmatov, Nurali, et al. "Device for breathless excitation of the exciter of an autonomous synchronous generator by a hybrid circuit of renewable sources." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 3331. No. 1. AIP Publishing LLC, 2025.

9. Raykhonov, Shuhrat, et al. "Results of experimental research of the device for useful utilization of heat of internal combustion engine of diesel power plant of drilling equipment." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 3331. No. 1. AIP Publishing LLC, 2025.

10. Yuldashevich, S. A. "KONSENTRLANGAN QUYOSH ELEKTR STANSIYALARI: ZAMONAVIY ENERGIYA YECHIMI, UNING ISTIQBOL VA KAMCHILIKLARI." *Образование наука и инновационные идеи в мире 70.8* (2025): 455-461.

11. Муминов, Махмуджон Умурзакович, and Абдурахмон Юлдашевич Сотиболдиев. "Разработка бесщёточного мини гидро-солнечного синхронного генератора." *Universum: технические науки* 1-3 (94) (2022): 43-45.