

УДК 621.316

УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГИЕЙ И ХРАНЕНИЕ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ: ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК

Комилов Аслиддин Гуломович¹-доктор технических наук, старший научный сотрудник,
ORCID: 0000-0002-5406-0477, E-mail: asliddin@rambler.ru

Асанова Сайёра Калбай кизи²- докторант (PhD),
ORCID: 0009-0003-9615-728X, E-mail: asanovasayyora@mail.ru

¹Национальный институт научных исследований по возобновляемым источникам энергии
при Министерстве энергетики, г. Ташкент, Узбекистан

²Институт Физики и техники при Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент

***Аннотация.** В статье рассматриваются современные исследования и разработки в области управления энергией и её хранения в контексте фотоэлектрических систем (PV). Основное внимание уделяется методам хранения энергии, таким как электрические и тепловые системы, и способам управления реактивной мощностью, напряжениями и частотой в сетях с высокой долей солнечной генерации. Обзор подчеркивает необходимость эффективных и экономически выгодных систем накопления энергии и интеллектуального управления спросом для полной интеграции PV систем в сеть и обеспечения её стабильности.*

Методы включают анализ систем накопления энергии, исследование управления реактивной мощностью и частотой, использование машинного обучения для прогнозирования мощности и оптимизации управления энергосистемами, а также моделирование в MATLAB/Simulink. Материалы состоят из данных о погодных условиях, результатов экспериментов на солнечных PV электростанциях и технической литературы по управлению энергией и её хранением.

Результаты включают анализ подходов к хранению энергии, разработку стратегий активного управления мощностью (APC) для стабилизации частоты в сетях с PV генерацией, методы прогнозирования мощности на основе машинного обучения, оценку систем хранения и управления для улучшения интеграции PV систем, а также демонстрацию улучшения прогнозирования и оптимизации работы энергосистем благодаря интеллектуальным методам управления.

Управление энергией и её хранение являются ключевыми для успешной интеграции фотоэлектрических систем в энергосети. Развитие эффективных систем накопления энергии и интеллектуальных методов управления позволяет сглаживать переменчивость солнечной генерации и обеспечивать стабильность сети.

***Ключевые слова:** фотоэлектрические системы (PV), машинное обучение, стабильность сети, реактивная мощность, хранение энергии, прогнозирование мощности.*

UDC 621.316

ENERGY MANAGEMENT AND STORAGE IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: A REVIEW OF CURRENT RESEARCH AND DEVELOPMENTS

Komilov, Asliddin Gulomovich¹ - Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher
Asanova, Sayyora Kalbay kizi² - doctoral student (PhD)

¹National Research Institute of Renewable Energy Sources under the Ministry of Energy,
Tashkent city, Uzbekistan

²Institute of Physics and Technology, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
Tashkent city, Uzbekistan

Abstract. *The article reviews current research and developments in the field of energy management and storage in the context of photovoltaic (PV) systems. The focus is on energy storage methods, such as electrical and thermal systems, and methods for managing reactive power, voltage, and frequency in networks with a high share of solar generation. The review emphasizes the need for efficient and cost-effective energy storage systems and intelligent demand management for the full integration of PV systems into the grid and ensuring its stability.*

The methods include the analysis of energy storage systems, investigation of reactive power and frequency management, use of machine learning for power prediction and optimization of energy system management, as well as modeling in MATLAB/Simulink. The materials consist of weather condition data, experimental results from solar PV power plants, and technical literature on energy management and storage.

The results include an analysis of approaches to energy storage, the development of active power control (APC) strategies for frequency stabilization in networks with PV generation, machine learning-based power prediction methods, an assessment of storage and management systems for improving PV system integration, and a demonstration of improved power system prediction and optimization through intelligent management methods.

Energy management and storage are key to the successful integration of photovoltaic systems into power grids. The development of efficient energy storage systems and intelligent management methods helps to smooth the variability of solar generation and ensure grid stability.

Keywords: *photovoltaic systems (PV), machine learning, grid stability, reactive power, energy storage, power prediction.*

UO‘K 621.316

FOTOELEKTRIK TIZIMLARDA ENERGIYANI BOSHQARISH VA SAQLASH: ZAMONAVIY TADQIQOTLAR VA ISHLANMALAR SHARHI

Komilov Asliddin G‘ulomovich¹ – texnika fanlari doktori, katta ilmiy xodim
Asanova Sayyora Kalbay qizi² — doktorant (PhD)

¹Energetika vazirligi huzuridagi Qayta tiklanuvchi energiya manbalari milliy ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent sh., O‘zbekiston

²O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Fizika-texnika instituti, Toshkent sh., O‘zbekiston

Annotatsiya. *Ushbu maqolada fotoelektrik (PV) tizimlar kontekstida energiyani boshqarish va saqlash sohasidagi zamonaviy tadqiqotlar va ishlanmalar ko‘rib chiqiladi. Diqqat markazida elektr va issiqlik tizimlari kabi energiyani saqlash usullari va yuqori ulushdagi quyosh energiyasi ishlab chiqarish bilan tarmoqlarda reaktiv quvvat, kuchlanish va chastotani boshqarish usullari mavjud. Sharhda PV tizimlarini tarmoqqa to‘liq integratsiya qilish va uning barqarorligini ta‘minlash uchun samarali va iqtisodiy jihatdan foydali energiya saqlash tizimlari va aqlli talabni boshqarishning zarurligini ta‘kidlanadi.*

Usullar energiyani saqlash tizimlarini tahlil qilish, reaktiv quvvat va chastotani boshqarishni o‘rganish, quvvatni prognozlash va energiya tizimlarini boshqarishni optimallashtirish uchun mashinani o‘rganishdan foydalanish, shuningdek, MATLAB/Simulinkda modellashtirishni o‘z ichiga oladi. Materiallar ob-havo sharoitlari haqidagi ma‘lumotlar, quyosh PV elektr stansiyalaridagi tajriba natijalari va energiyani boshqarish va saqlash bo‘yicha texnik adabiyotlardan iborat.

Natijalar energiyani saqlash yondashuvlarini tahlil qilish, PV generatsiyali tarmoqlarda chastotani barqarorlashtirish uchun aktiv quvvatni boshqarish (APC) strategiyalarini ishlab chiqish, mashinani o‘rganishga asoslangan quvvatni prognozlash usullari, PV tizimlarini integratsiyalashuvini yaxshilash uchun saqlash va boshqarish tizimlarini baholashni, shuningdek,

aqlli boshqaruv usullari orqali energiya tizimlarini prognozlash va optimallashtirishni yaxshilashni o'z ichiga oladi.

Energiya boshqaruvi va saqlash fotoelektrik tizimlarni energiya tarmoqlariga muvaffaqiyatli integratsiyalash uchun kalit hisoblanadi. Samarali energiya saqlash tizimlari va aqlli boshqaruv usullarini rivojlantirish quyosh generatsiyasi o'zgaruvchanligini yumshatish va tarmoq barqarorligini ta'minlashga yordam beradi.

Kalit so'zlar: *fotoelektrik tizimlar (PV), mashinani o'rganish, tarmoq barqarorligi, reaktiv quvvat, energiyani saqlash, quvvatni prognozlash.*

Введение

В современной энергетике управление энергией и ее хранение играют ключевую роль в эффективном использовании возобновляемых источников энергии, таких как фотоэлектрические системы. С ростом доли солнечной энергии в общем энергобалансе, управление избыточной энергией, производимой в периоды пиковой генерации, становится все более важным. Для решения этой задачи используются различные системы хранения энергии, а также интеллектуальные методы управления спросом и частотой.

В данном обзоре мы рассмотрим передовые исследования и разработки в области управления энергией и хранения в контексте фотоэлектрических систем. Мы обсудим различные подходы к хранению энергии, включая электрические и тепловые системы, а также рассмотрим методы управления реактивной мощностью, напряжениями и частотой в сетях с высокой долей солнечной генерации. Особое внимание будет уделено использованию машинного обучения для прогнозирования мощности и оптимизации управления энергосистемами.

Управление энергией и хранение является неотъемлемой частью использования ВИЭ включающее решения для хранения избыточной энергии, производимой возобновляемыми источниками, и управления распределением этой энергии по сети. Эффективное управление энергией и ее хранение являются ключевыми факторами для максимального использования возобновляемых источников энергии, сглаживания их переменчивости и обеспечения стабильности сети в периоды пикового спроса.

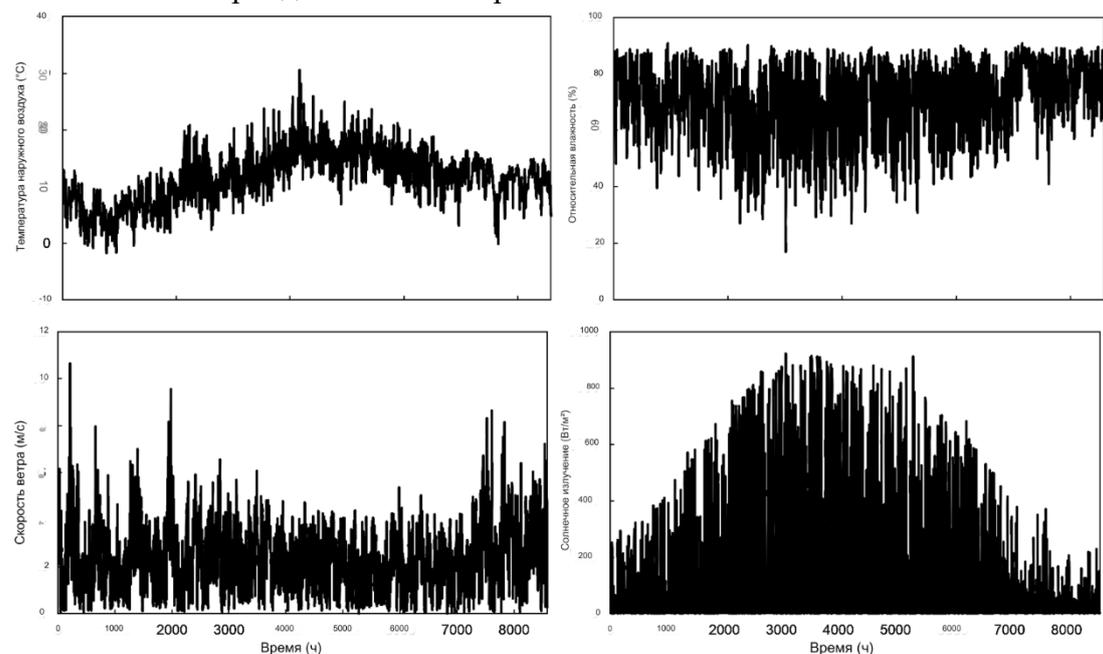


Рис. 1. Погодные данные Кардиффа, Уэльс, Великобритания [1].

Для полной интеграции фотоэлектрических (PV) систем в сети в статье подчеркивается необходимость в эффективных и экономически выгодных системах накопления энергии в сочетании с интеллектуальным управлением спросом [1]. По мере того, как глобальный рост рынка солнечных PV-систем превышает 76 ГВт, увеличение потребления энергии, генерируемой PV-системами на месте, становится критически важным для поддержания стабильности сети. Этот обзор предоставил детальный анализ всех систем накопления энергии, которые могут быть интегрированы с PV-системами, включая системы накопления электрической и тепловой энергии. В статье обсуждается интеграция накопления энергии PV в умных зданиях и определяется роль накопления энергии для PV в контексте будущих разработок. Рис.1 представляет графическое изображение или график погодных данных, зарегистрированных в Кардиффе, Уэльс, Великобритания, за указанный период с 1 января 2015 года по 31 декабря 2015 года. Он включает точки данных или временной ряд, иллюстрирующий изменения погодных условий в течение года.

В статье [2] обсуждаются проблемы и решения для интеграции сетевых фотоэлектрических систем (GCPVS) в энергосеть с акцентом на стабильность частоты. Предлагается стратегия управления GCPVS с активным управлением мощностью (APC) для поддержки стабильности сети и частоты, что позволяет PV электростанциям вести себя аналогично традиционным электростанциям в условиях возмущений. В исследовании смоделирована крупномасштабная PV электростанция (PVPP), подключенная к коммунальной сети на уровне MV в MATLAB/Simulink, и проанализирован её динамический отклик на различные возмущения частоты. Разработанное управление эффективно снижало выходную активную мощность для стабилизации частоты в нормальном диапазоне, демонстрируя потенциал крупномасштабных PVPP, оснащённых возможностями APC, вносить вклад в стабильность сети.

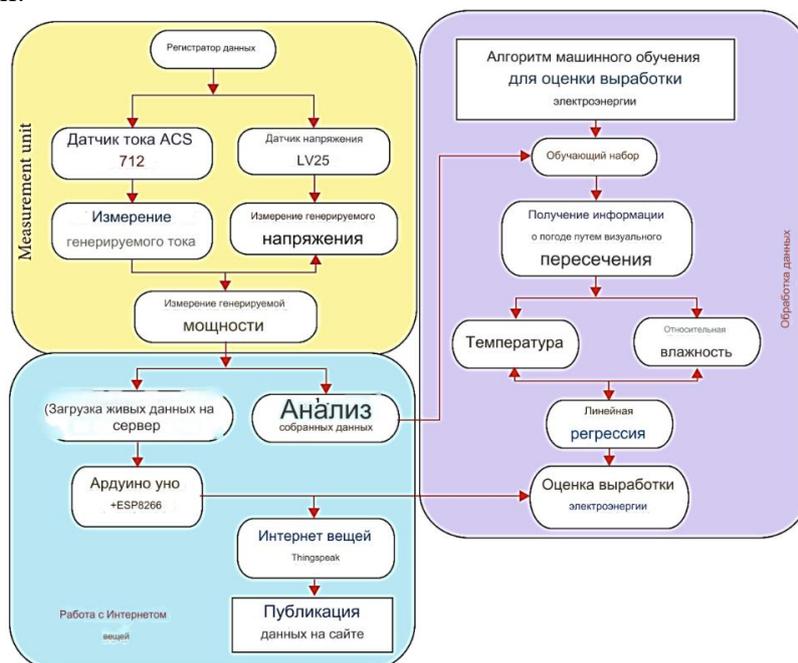


Рис. 2. Методология прогнозирования мощности на основе машинного обучения в SAPV сетях [2]

Рис.2 иллюстрирует предложенную методологию прогнозирования мощности на основе машинного обучения в автономных фотоэлектрических (SAPV) сетях. Она включает блок-схему или схематическое представление, детализирующее этапы процесса прогнозирования мощности, включая сбор данных, обучение модели, валидацию и развертывание. А также, предоставляет обзор подхода, используемого для прогнозирования мощности, специально адаптированного для SAPV сетей, возможно, с использованием методов машинного обучения для повышения точности и эффективности.

В статье [3] представлена распределенная стратегия управления напряжением, разработанная для поддержания качества напряжения в сетях с высокой долей фотоэлектрических (PV) систем. В ней детализирована реализация управления мерцанием (Flicker Control, FC), локального управления напряжением (Local Voltage Control, LVC) и координированного управления напряжением (Co-ordinated Voltage Control, CVC) с использованием инверторов PV. Эта стратегия успешно снизила колебания напряжения, повысила его качество и уменьшила потери в сети, продемонстрировав свою эффективность в смоделированной распределительной сети на 33 узла. Этот подход предложил масштабируемое и надежное решение для поддержания стандартов напряжения в распределительных сетях с высоким проникновением PV, предлагая ценный метод для управления вызовами, связанными с увеличением интеграции возобновляемых источников энергии.

В работе [4] изучались передовые стратегии управления частотой для крупномасштабных сетевых фотоэлектрических (PV) систем, с акцентом на разработку и реализацию активного управления мощностью (APC). APC был нацелен на повышение стабильности частоты сети, позволяя PV электростанциям работать аналогично традиционным электростанциям во время возмущений в сети. Через моделирование исследование продемонстрировало способность APC поддерживать стабильный диапазон частот и улучшать эффективность сетевых PV систем. Метод управления корректировал выходную мощность PV на основе отклонений частоты, что доказало свою эффективность в преодолении частотных возмущений и поддержке восстановления сети. Этот подход предлагает перспективный путь для интеграции крупномасштабных PV систем в существующие энергосети, способствуя общей стабильности сети. Рис.3 передает суть исследования, иллюстрируя сетевую фотоэлектрическую систему, которая является центральной темой изучения передовых стратегий управления частотой.

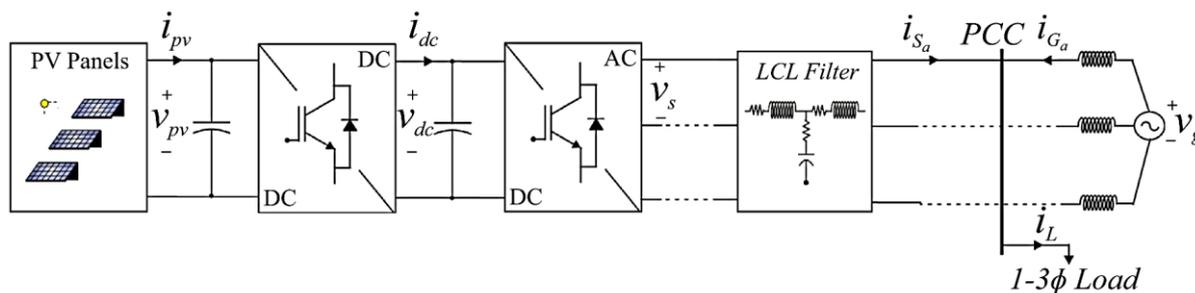


Рис. 3. Сетевая фотоэлектрическая система [4]

В статье [5] авторы представили методологию управления реактивной мощностью с индексом в одной точке (SPRPC) для смягчения подъема напряжения в сетях с высоким проникновением PV. Выбирая наилучшую точку управления через анализ короткого замыкания, SPRPC предложил экономически эффективное, простое и эффективное решение без необходимости модернизации существующих PV инверторов. Эффективность метода была продемонстрирована в модифицированной сети IEEE на 69 узлов, предлагая многообещающий подход для управления проблемами подъема напряжения в жилых сетях с высокой интеграцией возобновляемых источников. Рис.4 иллюстрирует взаимосвязь между используемым методом, годом публикации и средой, на которую он ориентирован, что является центральным аспектом введения методологии управления реактивной мощностью с индексом в одной точке.

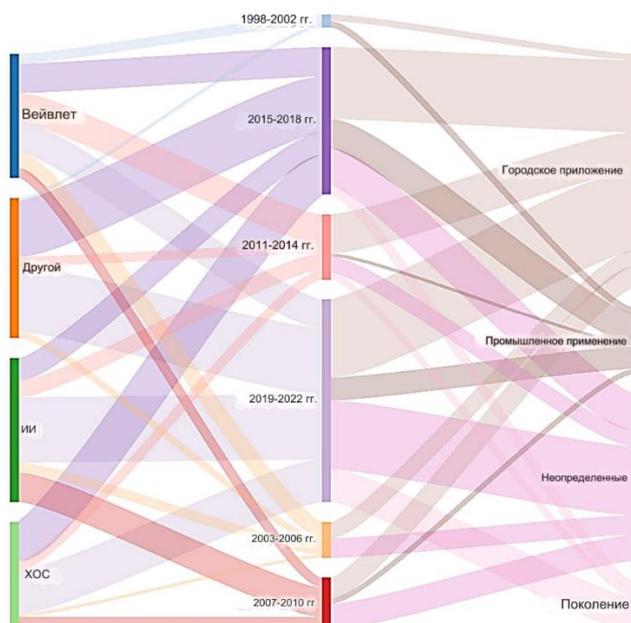


Рис. 4. Параллельный набор, который связывает используемый метод с годом публикации статьи и средой, на которую он ориентирован [5]

В работе [6] предложена децентрализованная схема управления для управления активной и реактивной мощностью в сетевых АС-стековых фотоэлектрических (PV) инверторных системах, использующая фазовую компенсацию одного элемента для управления реактивной мощностью. Этот инновационный подход является важным для следующего поколения умных PV инверторных систем в сетях с высоким проникновением PV. Децентрализованная схема повышает надежность системы и потенциально снижает затраты за счет минимизации требований к коммуникациям. Метод относительного прироста (Relative Gain Array) был использован для оценки осуществимости децентрализованной схемы управления, при этом детальное моделирование и анализ продемонстрировали её эффективность. Децентрализованный контроллер позволяет использовать более высокие частоты переключения, уменьшая размеры пассивных компонентов и обеспечивая управление системой с минимальными коммуникациями. На рис.5 отражена предложенная децентрализованная схема управления для управления активной и реактивной мощностью в сетевых АС-стековых фотоэлектрических инверторных системах, иллюстрируя экспериментальную установку и точку измерения, которые являются ключевыми для оценки эффективности предложенной схемы.

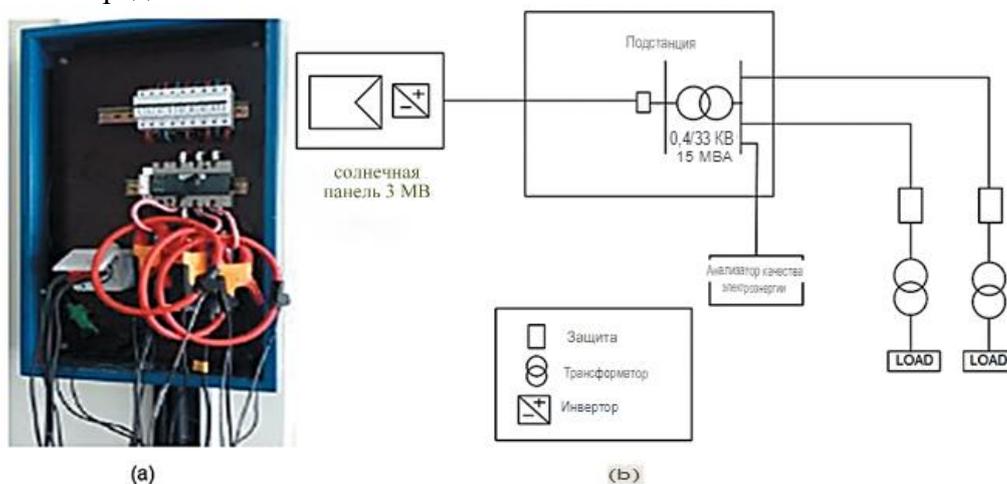


Рис. 5. Экспериментальная установка и точка измерения [6]

В статье [7] авторы предложили систематический обзор анализа качества электроэнергии в PV системах, охватывающий 153 статьи, опубликованные за последние два десятилетия. Обзор подчеркнул недостаток статистики высшего порядка в измерительном оборудовании и продолжение использования традиционных инструментов. Он подтвердил сложность современных электрических сетей из-за подключения распределенных источников энергии и нелинейных нагрузок, что приводит к новым и сложным электрическим возмущениям. Обзор отметил необходимость в передовых методах анализа, таких как искусственный интеллект и статистика высшего порядка, для улучшения изучения гибридных событий и повышения качества электроэнергии. Рис.6 представляет фундаментальную установку сетевой фотоэлектрической системы, которая является центральной темой статьи, обсуждающей анализ качества электроэнергии в PV системах.

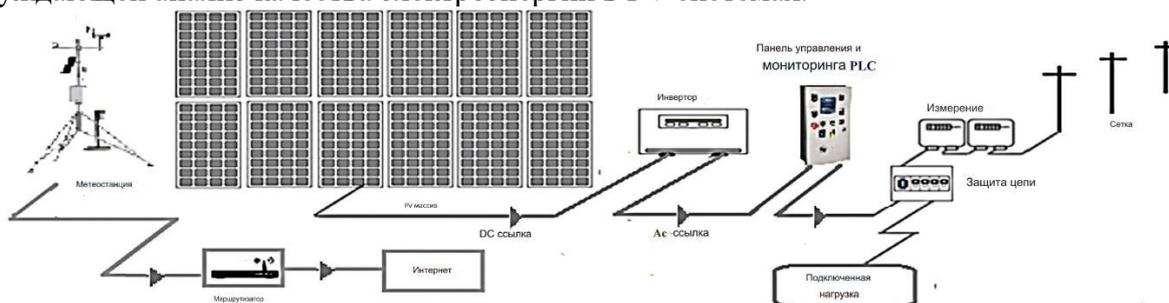


Рис. 6. Схематическая диаграмма сетевой фотоэлектрической системы [7]

В статье [8] рассмотрены проблемы качества электроэнергии, возникающие при интеграции большого числа фотоэлектрических (PV) систем в распределительные сети, в частности, влияние гармонических искажений на стабильность сети. Измерения на наземной солнечной PV электростанции мощностью 3 МВт показали, что хотя искажения напряжения остаются в пределах стандартных лимитов, увеличение гармонических искажений может превышать пороговые значения при определенных условиях. Исследование подчеркнуло важность детального анализа гармоник и стратегий их смягчения для обеспечения безопасной и надежной работы современных распределительных систем с высоким проникновением PV. Рис.7 предоставляет обзор диапазонов вариаций частоты в различных странах, демонстрирующее отношение к вопросам качества электроэнергии, обсуждаемым в статье, касающейся интеграции фотоэлектрических систем в распределительные сети.

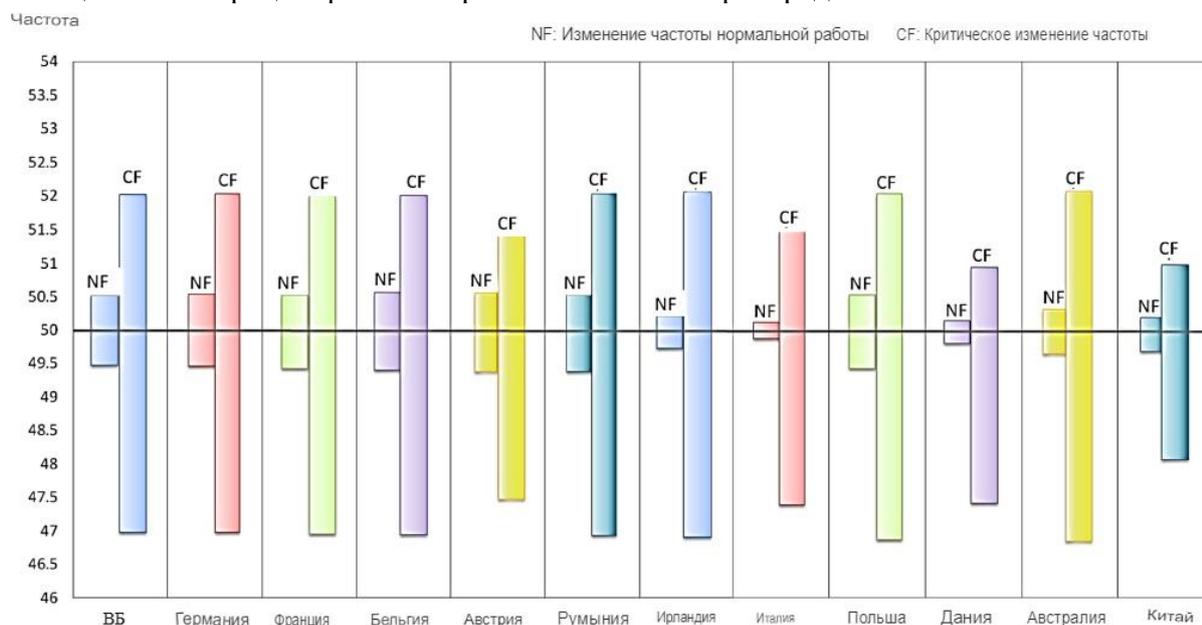


Рис. 7. Сравнение диапазона вариаций частоты нормальной работы и диапазона критических вариаций частоты в разных странах [1,10,11,13,15,17–26]. [8]

В обзоре [9] рассматриваются возмущения качества электроэнергии, вызванные сетевыми фотоэлектрическими (PV) системами, и предложены методы смягчения гармонических искажений для управления текущим общим гармоническим искажением (THD). В рамках исследования была проведена тематическая работа на 5.5 кВт PV системе на крыше в Египте, демонстрирующая эффективность различных методов смягчения, включая LCL фильтры, активные фильтры мощности и гибридные решения. Исследование завершилось рекомендациями для будущих работ по снижению как искажений напряжения, так и тока, подчеркивая важность передового управления качеством электроэнергии при интеграции PV систем в энергосеть. Рис.8 отражает различные методы сглаживания для управления возмущениями качества электроэнергии, вызванными сетевыми фотоэлектрическими системами которые были изучены в статье.

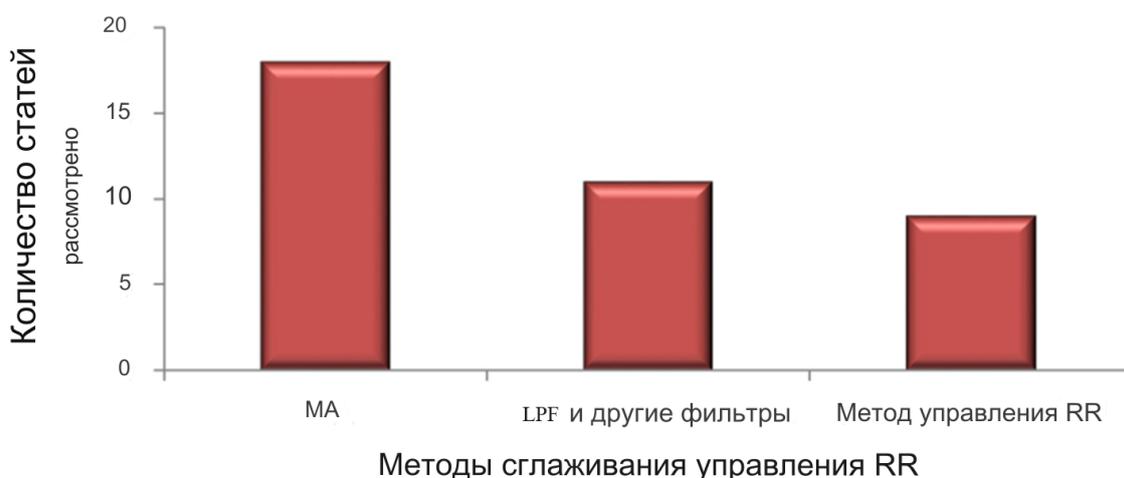


Рис. 8. Обзор статей на основе различных методов сглаживания [9]

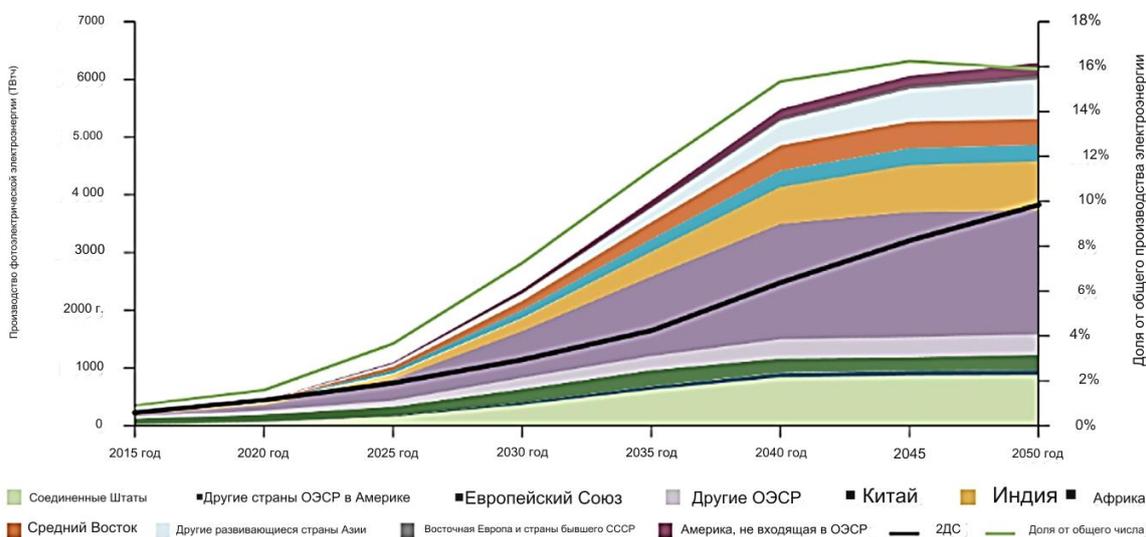


Рис. 9. Тенденции глобальной генерации энергии солнечных фотоэлектрических систем и их доля в общей генерации электроэнергии [10]

В статье [10] проведено всестороннее изучение сетевых кодексов различных стран, с акцентом на технические требования к интеграции систем электрического хранения энергии (EES) в сеть. Была проанализирована роль технологий EES в выполнении сетевых кодексов, особенно в части регулирования напряжения и частоты. Исследование подчеркнуло потенциал EES для поддержки работы сети, как непосредственно, предоставляющей сетевые услуги, так

и в качестве вспомогательных устройств в возобновляемой генерации. Даны рекомендации по развитию технологий EES для повышения соответствия сетевым кодексам и поддержки соответствующих приложений, подчеркивая важность EES в переходе к более устойчивым и устойчивым энергетическим системам. Рис.9 предоставляет важную информацию о глобальных тенденциях в генерации энергии солнечных фотоэлектрических систем и их доле в общей генерации электроэнергии.

В этой статье [11] были рассмотрены различные методы сглаживания скорости нарастания для солнечных фотоэлектрических (PV) систем, разделив их на методы на основе скользящего среднего и экспоненциального сглаживания, методы на основе фильтров и алгоритмы на основе скорости нарастания. В ней подробно описывается применение скользящего среднего и фильтров низких частот, широко выбранных исследователями для управления скоростью нарастания PV. В ходе исследования было обнаружено, что эти методы могут привести к увеличению деградации и размера энергосистемы и уменьшить ее срок службы. Был сделан вывод, что алгоритмы на основе скорости нарастания более предпочтительны, и предложены улучшения этих алгоритмов, применение двойной энергосистемы для крупных PV установок и регулирование управления скоростью нарастания PV для снижения емкости и деградации энергосистемы при увеличении ее срока службы.

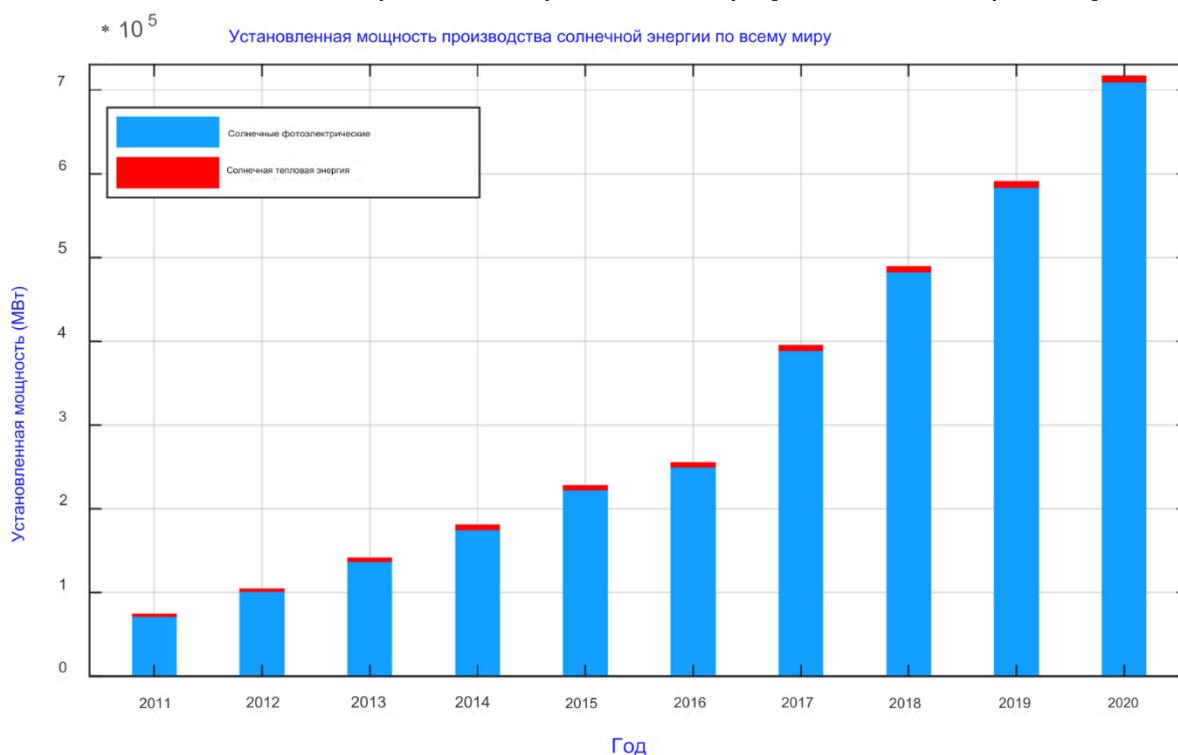


Рис.10. Тенденция роста фотоэлектрической (PV) энергии в период с 2010 по 2020 гг. [11]

Рис.10 представляет важную информацию о тенденции роста фотоэлектрической энергии в течение определенного периода, что имеет непосредственное отношение к теме статьи, обсуждающей методы сглаживания скорости нарастания мощности для солнечных фотоэлектрических систем.

Заключение

Управление энергией и хранение являются неотъемлемыми компонентами успешной интеграции фотоэлектрических систем в современную энергетическую инфраструктуру. Развитие эффективных и экономически выгодных систем хранения энергии, а также интеллектуальных методов управления спросом и частотой, позволяет максимально

использовать потенциал солнечной энергии, сглаживать ее переменчивость и обеспечивать стабильность сети.

Дальнейшие исследования и разработки в этой области будут направлены на повышение эффективности и надежности систем хранения энергии, оптимизацию алгоритмов управления и прогнозирования, а также на создание новых технологий, способствующих более широкому внедрению возобновляемых источников энергии в энергетическую систему.

Литература

- [1] M. W. Ahmad, M. Mourshed, and Y. Rezugui, 'Tree-based ensemble methods for predicting PV power generation and their comparison with support vector regression', *Energy*, vol. 164, pp. 465–474, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.08.207.
- [2] A. Patel *et al.*, 'A Practical Approach for Predicting Power in a Small-Scale Off-Grid Photovoltaic System using Machine Learning Algorithms', *International Journal of Photoenergy*, vol. 2022, pp. 1–21, Feb. 2022, doi: 10.1155/2022/9194537.
- [3] H. Jafarian, R. Cox, J. H. Enslin, S. Bhowmik, and B. Parkhideh, 'Decentralized Active and Reactive Power Control for an AC-Stacked PV Inverter With Single Member Phase Compensation', *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 54, no. 1, pp. 345–355, Jan. 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2761831.
- [4] H. A. Pereira, G. L. E. da Mata, L. S. Xavier, and A. F. Cupertino, 'Flexible harmonic current compensation strategy applied in single and three-phase photovoltaic inverters', *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 104, pp. 358–369, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.07.017.
- [5] P. Remigio-Carmona *et al.*, 'Current Status and Future Trends of Power Quality Analysis', *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 7, p. 2328, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15072328.
- [6] H. A. Khan, M. Zuhaib, and M. Rihan, 'Analysis of varying PV penetration level on harmonic content of active distribution system with a utility scale grid integrated solar farm', *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 283–293, Jul. 2022, doi: 10.1080/1448837X.2022.2025656.
- [7] W. A. A. Salem, W. Gabr Ibrahim, A. M. Abdelsadek, and A. A. Nafeh, 'Grid connected photovoltaic system impression on power quality of low voltage distribution system', *Cogent Eng*, vol. 9, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1080/23311916.2022.2044576.
- [8] X. Luo *et al.*, 'Review of Voltage and Frequency Grid Code Specifications for Electrical Energy Storage Applications', *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 5, p. 1070, Apr. 2018, doi: 10.3390/en11051070.
- [9] S. Sukumar, M. Marsadek, K. R. Agileswari, and H. Mokhlis, 'Ramp-rate control smoothing methods to control output power fluctuations from solar photovoltaic (PV) sources—A review', *J Energy Storage*, vol. 20, pp. 218–229, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.09.013.
- [10] H. Akbari *et al.*, 'Efficient energy storage technologies for photovoltaic systems', *Solar Energy*, vol. 192, pp. 144–168, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2018.03.052.
- [11] A. Q. Al-Shetwi *et al.*, 'Active Power Control to Mitigate Frequency Deviations in Large-Scale Grid-Connected PV System Using Grid-Forming Single-Stage Inverters', *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 6, p. 2035, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15062035.