
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.355:621.311

EDN OFUTYE

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

И.С. Токарев

ORCID: 0009-0003-2172-3830 e-mail: i.s.tokarev@gmail.com

Санкт-Петербургский горный университет

Санкт-Петербург, Россия

В газовой отрасли широкое применение получили автономные электростанции с приводом от газопоршневых и дизельных двигателей. Газопоршневые электростанции, как правило, работают в постоянном режиме основного источника электроснабжения на производственном объекте. Дизельные электростанции применяются в качестве аварийного источника для поддержания основных систем жизнедеятельности объекта и нормального останова производственного процесса при потере питания от основного источника. В некоторых случаях они могут применяться для поддержания работы производства не на полную мощность. Для обеспечения бесперебойной работы автономной энергосистемы необходимо постоянно задействовать большее количество агрегатов электростанции, чем потребляемая мощность нагрузки – вращающийся резерв. Для решения задач оптимизации работы автономных энергосистем предлагается интеллектуальная система оптимального управления автономными энергоузлами, в которых буферные накопители энергии становятся ключевым элементом для динамической поддержки электрических генераторов, а предиктивный контроль на основе прогнозирования нагрузки обеспечивает проактивное управление всем энергоузлом.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, предиктивная аналитика, система накопления энергии, электростанция, энергоузел.

Для цитирования: Токарев И.С. Многофункциональная система накопления электрической энергии в газовой отрасли // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 3. С. 84-97. EDN OFUTYE

MULTIFUNCTIONAL ELECTRIC ENERGY STORAGE SYSTEM IN GAS INDUSTRY

I.S. Tokarev

ORCID: 0009-0003-2172-3830 e-mail: i.s.tokarev@gmail.com

Saint Petersburg Mining University

Saint Petersburg, Russia

Abstract. Autonomous power plants powered by gas-piston and diesel engines are widely used in the gas industry. Gas-piston power plants, as a rule, operate in the constant mode of the main power source at the production facility. Diesel power plants are mainly used as an emergency power source to maintain the main systems of vital activity of the facility and the normal shutdown of the production process in case of loss of power from the main source. In some cases, they can be used to maintain the production process at less than full capacity. To ensure uninterrupted operation of an autonomous power system, it is necessary to constantly use a greater number of power plant units than the consumed load power – a spinning reserve. An intelligent system for optimal control of autonomous power units is proposed to solve the problems of optimizing the operation of autonomous power systems. Buffer energy storage is a key element for dynamic support of electric generators in this system, and predictive control based on load forecasting ensures proactive control of the entire power unit.

Keywords: intelligent control system, predictive analytics, energy storage system, power plant, energy hub.

For citation: I.S. Tokarev, “Multifunctional electric energy storage system in gas industry”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 84-97, 2025. EDN OFUTYE

I. Введение

Особенности функционирования автономных (изолированных) систем энергообеспечения связаны с конечным значением критериев мощности источников и потребителей. В первую очередь, на устойчивой работе такой энергосистемы сказываются статические и динамические характеристики мощности, в том числе, номиналы подключенных энергоустановок, показатели маневренности источников, т.е. их способность обеспечивать снижение и повышение нагрузки, а также параметры энергоприемников определяющие потребность в энергии в каждый момент времени, включая переходные процессы при включении, отключении и изменении полезной нагрузки.

Пример такой энергосистемы – типовой вахтовый поселок. Он представляет собой современный вахтовый комплекс при терминале и служит центром отгрузки углеводородного сырья, добываемого в прилегающей нефтегазоносной зоне. В непосредственной близости расположены несколько нефтяных месторождений. На территории действуют морской порт

и аэропорт, функционирует специализированная перевалочная база для обслуживания морской стационарной платформы. Транспортная инфраструктура включает:

- основной аэропорт;
- вертодром для оперативного обслуживания.

В поселке функционирует производственный комплекс. Терминал представляет собой современную морскую инфраструктуру, включающую:

- стационарный ледостойкий причал;
- подводную систему транспортировки сырья;
- комплекс береговых резервуаров;
- инженерные сооружения для швартовки и погрузки;
- вертолетную площадку;
- жилой модуль для персонала.

Терминал работает в круглосуточном режиме. В зимний период обеспечивается навигация с привлечением специализированных ледокольных судов для поддержания транспортной доступности. Производственный комплекс оснащен современным оборудованием соответствует всем требованиям промышленной безопасности и экологическим стандартам.

Климат поселка характеризуется суровостью с холодной продолжительной зимой и коротким летом. Формирование климата происходит под влиянием арктических и атлантических воздушных масс.

Температурный режим:

- средняя температура в июле (самый теплый месяц): $+9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- абсолютная максимальная температура воздуха: $+32,0\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- средняя температура в январе: $-17,9\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- абсолютная минимальная температура воздуха: $-44,0\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- продолжительность зимнего периода: 220-240 дней.

II. Постановка цели и задач исследования

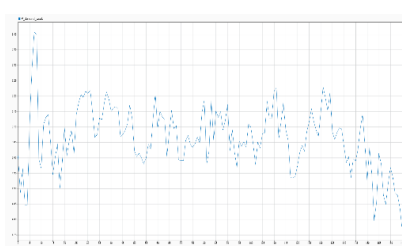
Параметры энергосистемы, включая характеристики источников, приведены в табл. 1.

Данные суточного, недельного и месячного профилей нагрузки подтверждают круглосуточный режим работы объекта без привязки к началу и окончанию трудового дня, а также показывают отсутствие зависимости от светового дня, что указывает на незначительную долю нагрузки на освещение и бытовые нужды (рис. 1). Особенности годового профиля определены географическим положением объекта, в связи с чем значительную долю мощности составляет обеспечение нагрузки на обогрев, в том числе, бытовых помещений и технологических линий. Минимальная мощность составляет 0,7 МВт, а максимальная – 7,5 МВт.

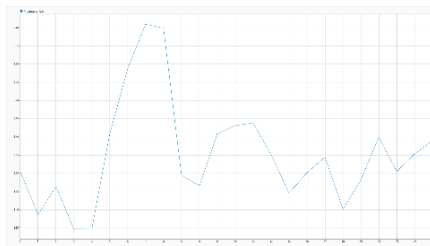
Таблица 1.
Параметры энергосистемы вахтового поселка

Table 1.
Parameters of the energy system of the rotational camp

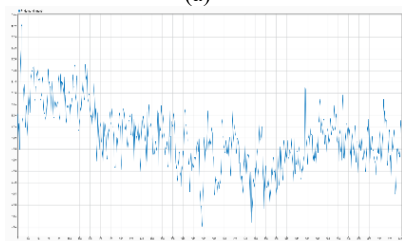
Источник энергии	МиниТЭЦ на базе газопоршневых агрегатов (ГПА)
Установленная мощность, МВт	9
Тип генераторов	DM5467
Электрическая мощность (кВт), $\cos\varphi=1,0$	1175
Электрическая мощность (кВА), $\cos\varphi=0,8$	1456
Количество генераторов, шт.	8



(a)



(б)



(в)



(г)

Рис. 1. Профиль энергопотребления вахтового поселка:
суточный (а); недельный (б); месячный (в); годовой (г)

Fig. 1. Energy consumption profile of the rotational camp:
daily (a); weekly (b); monthly (v); annual (r)

Режим работы электростанции, обеспечивающий данную нагрузку, приведен на рис. 2. На рис. 3 представлен график использования мощности электростанции согласно профилю нагрузки.

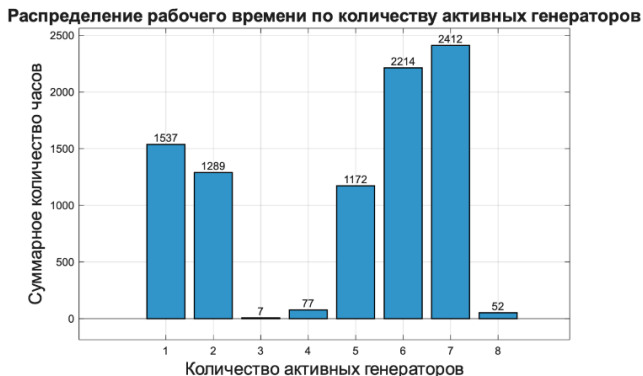


Рис. 2. Режим работы электростанции вахтового поселка.

Fig. 2. Operating mode of the power plant of the rotational camp

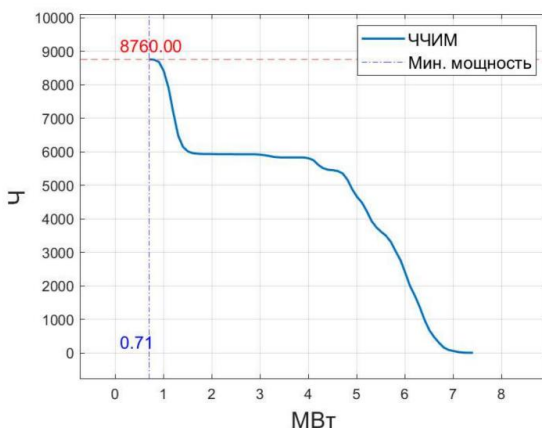


Рис. 3. График использования мощности электростанции

Fig. 3. Power plant capacity utilization schedule

III. Описание и обоснование предлагаемых методов решения поставленных задач

Согласно графикам загрузки генераторов и использования мощности, количество постоянно установленных генераторов превышает количество постоянно задействованных. Так, суммарное время работы электростанции на восьми генераторах составляет 52 часа в год. Также на количестве единовременно задействованного оборудования сказывается сезонность. Особенно это проявляется во времени работы на одном и двух генераторах. Это позволяет сделать вывод о том, что существует возможность

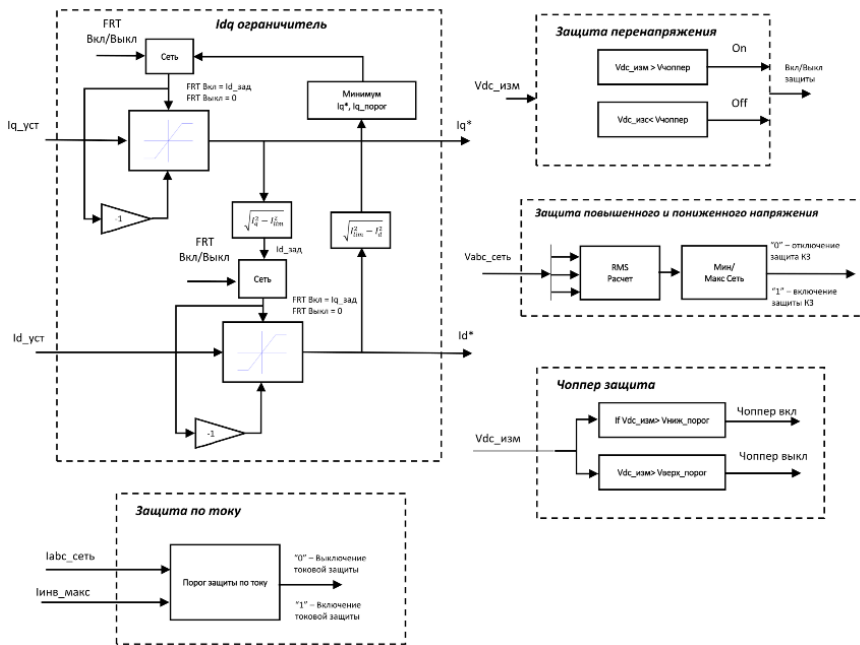


Рис. 5. Стандартные алгоритмы управления системой накопления энергии [5-7]

Fig. 5. Standard control algorithms for energy storage systems [5-7]

Вторым контуром управления, обеспечивающим основной экономический эффект, является модель узла электросети, которая учитывает экономические составляющие эксплуатации энергооборудования. Следует заметить, что условно быстрые процессы, соответствующие перекоммутации оборудования и резким изменениям режима технологического оборудования, оказывают значительное влияние на стоимостные характеристики, поскольку, требуют обеспечения резерва мощности, и их необходимо учитывать при моделировании. Контроль баланса энергопотребления позволяет исключить значительные искажения при верификации модели.

Параметры оптимизации модели включают:

- минимизацию количества запусков;
- минимизацию мощности;
- минимизацию стоимости энергии.

Основная задача моделирования системы электроснабжения – сформировать алгоритмы прогнозирования потребления энергии и мощности. Применение методов спектрального анализа позволяет получить дополнительную информацию о технологическом объекте, что обеспечит более достоверный прогноз.

На рис. 6 изображено представление дискретной функции, заданной на основании фактического профиля энергопотребления в виде гармонического ряда.

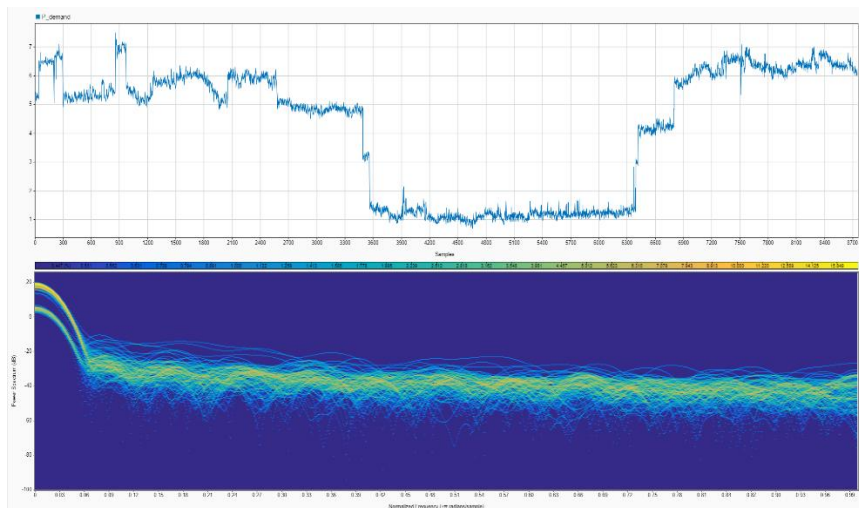


Рис. 6. Отображение функции профиля энергопотребления в виде гармонического ряда [8, 9]

Fig. 6. Displaying the energy consumption profile as a harmonic series [8, 9]

IV. Результаты расчета

В результате применения вышеупомянутых методов формируется модель, которая описывает характер поведения объекта во времени, что позволяет сделать прогноз потребления мощности, а также определить параметры буферного накопителя. Ниже представлены данные о работе буферного накопителя, функционирующего согласно прогнозу (рис. 7).

Диаграмма на рис. 7а показывает, что с внедрением буферного накопителя отпала необходимость включения восьмого генератора. Помимо этого, на рис. 7б представлены данные по количеству запусков генераторов за календарный год. Они существенно снизились.

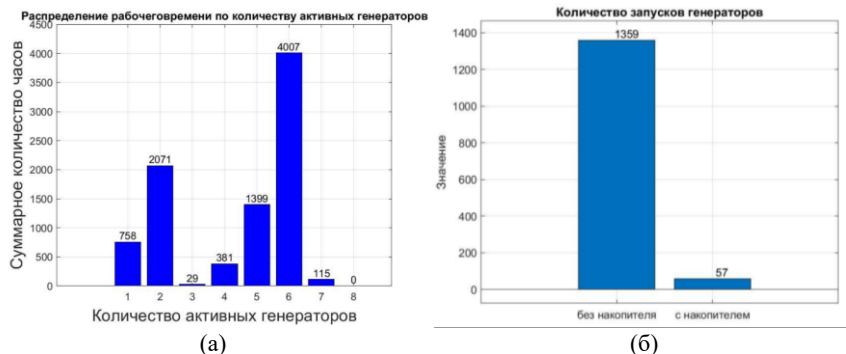


Рис. 7. Режим работы электростанции вахтового поселка с применением систем накопления энергии (а); зависимость количества включений генераторов от применения системы накопления энергии (б)

Fig. 7. Operating mode of the power plant of the rotational camp using energy storage systems (a); dependence of the number of generator starts on the use of the energy storage system (b)

На рис. 8 приведены данные по мощности (а) и энергии (б) буферного накопителя и их использования во времени.

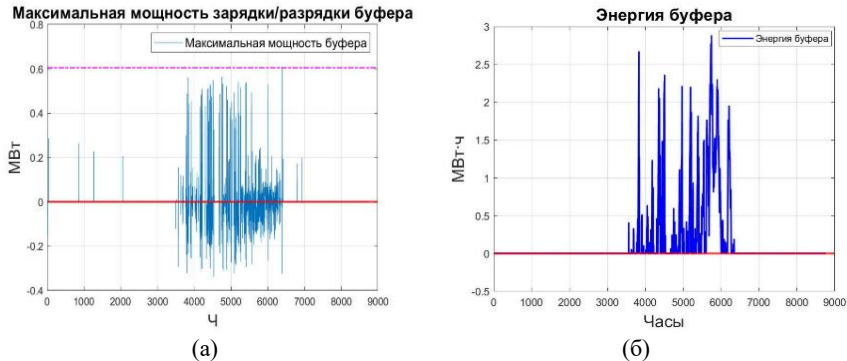


Рис. 8. Профиль мощности (а) и энергии (б) системы накопления энергии

Fig. 8. Power (a) and energy (b) profile of energy storage system

Необходимая мощность системы накопления энергии составляет 0,6055 МВт, необходимая энергоемкость – 2,8853 МВт·ч.

V. Обсуждение

Алгоритм управления силовым блоком на базе предиктивной диагностики обеспечивает глобальную оптимизацию на основе прогноза.

Алгоритм управления ГПА целенаправленно поддерживает стабильную высокую нагрузку (вблизи точки максимального КПД), используя прогноз для заблаговременного планирования. БНЭ берут на себя всю динамическую составляющую нагрузки, освобождая ГПА от необходимости маневрирования.

Предиктивная диагностика радикально изменила роль ДГ. Вместо частых включений для компенсации краткосрочных провалов или пиков (из-за инерции ГПА), ДГ включаются стратегически только для покрытия прогнозируемого длительного базиса или значительных отклонений, которые экономически невыгодно покрывать ГПА+БНЭ. Алгоритм минимизирует количество пусков как дорогостоящую операцию.

Алгоритм управления БНЭ (АКБ + СК) оптимально распределяет функции между компонентами БНЭ. Суперконденсаторы (СК) используются исключительно для мгновенной компенсации кратковременных (секунды) пиков мощности и пусковых токов, защищая генераторы и сеть.

Литий-ионные АКБ используются для сглаживания среднесрочных (минуты-десятки минут) колебаний нагрузки, компенсируя инерционность ГПА и позволяя ДГ включаться реже и работать стабильнее. Алгоритм активно управляет состоянием заряда (*SOC*) АКБ в рамках безопасных пределов (оптимизированный *DoD*) для продления срока службы.

Достижение критериев оптимизации узла сети:

1) сокращение числа запусков ДГ агрегатов (40-60 %) достигнуто благодаря двум ключевым факторам:

- прогнозирование позволяет заранее оценить необходимость включения ДГ и избежать его для краткосрочных нужд;
- буферизация БНЭ (в первую очередь СК и АКБ) берет на себя пики и провалы, которые раньше требовали пуска ДГ;

2) снижение расхода топлива более чем на 20 % получено за счет комбинации эффектов:

- ГПА работают постоянно в оптимальном по КПД режиме (высокая стабильная нагрузка);
- резкое сокращение работы ДГ на неэффективных низких нагрузках;
- минимизация энергозатратных пусков ДГ;
- исключение работы генераторов в режиме «горячего резерва» только для покрытия пиков;

3) снижение пиковой мощности и требуемой установленной мощности генераторов (*CAPEX*). Гибридная система БНЭ (СК+АКБ) позволила эффективно «срезать» пики нагрузки. Это дает возможность проектировать энергоузел с меньшей установленной мощностью генераторов на 15-20 %, так как пиковая мощность теперь определяется мощностью СК, а не генераторов;

4) повышение срока службы оборудования:

- ГПА и ДГ работают в более стабильных режимах, без резких скачков нагрузки и температурных перепадов, снижая механический и термический износ;
- оптимизация циклов работы БНЭ (особенно контроль *DoD* и токов для АКБ) максимизирует их жизненный цикл;
- снижение числа пусков ДГ напрямую уменьшает износ их пусковых систем и двигателя;

5) снижение углеродного следа. Значительное снижение расхода топлива (особенно ДГ) и оптимизация режимов работы напрямую ведут к сокращению выбросов *CO2* и других вредных веществ.

Тестирование на реальных эксплуатационных данных подтвердило высокую эффективность предложенной интегрированной системы управления. Алгоритмы успешно сгладили профиль потребляемой мощности генераторов, снизив его пиковость и волатильность. Наблюдалось устойчивое снижение пиковой мощности, потребляемой от генераторов на 15-30 %.

Достигнута высокая степень оптимизации работы энергоузла в соответствии с заданными критериями: подтверждено прогнозируемое сокращение пусков ДГ и расхода топлива, а также снижение требуемой установленной мощности. Значительно повысилось качество электроэнергии: отклонения частоты и напряжения были снижены до уровней, соответствующих жестким промышленным стандартам 60-70 % и 40-50 % снижения соответственно.

Наблюдалась эффективная и безопасная работа БНЭ: СК надежно обрабатывали пики, АКБ работали в заданных оптимальных пределах *SOC* и *DoD*, подтверждая правильность стратегии управления их ресурсом.

Экономические выводы.

1. Значительное снижение совокупной стоимости владения (TCO).

1.1. Капитальные затраты (*CAPEX*). Возможность уменьшения установленной мощности генераторного парка на 15-20 % за счет компенсации пиков СК приводит к прямой экономии на закупке дорогостоящих генераторов и сопутствующей инфраструктуры. Оптимальный подбор БНЭ (соотношение СК/АКБ) под конкретный профиль нагрузки минимизирует их стоимость при максимальном эффекте.

1.2. Операционные затраты (*OPEX*). Экономия топлива 18-25 % – основная статья снижения *OPEX*. Дополнительно – сокращение затрат на техобслуживание и ремонт генераторов (за счет снижения износа) и БНЭ (за счет щадящих режимов). Устранение штрафов за некачественную электроэнергию. Снижение затрат на резервные мощности («горячий резерв»).

1.3. Срок окупаемости. Интеграция БНЭ и системы предиктивного управления демонстрирует привлекательный срок окупаемости 2-5 года, в основном, за счет значительной экономии топлива и снижения затрат на обслуживание/ремонт.

2. Повышение надежности и снижение рисков.

- 2.1. Стабилизация работы генераторов и сети снижает риск аварийных остановов и связанных с ними простоев производства и убытков.
- 2.2. Продление срока службы основного оборудования (генераторы, БНЭ) отсрочивает крупные капитальные затраты на их замену.
- 2.3. Повышение качества электроэнергии снижает риск повреждения чувствительного нагрузочного оборудования.

3. Стратегическая ценность для автономных объектов.

- 3.1. Повышение рентабельности и конкурентоспособности удаленных объектов (шахты, буровые, острова), для которых энергетическая автономия и стоимость энергии критичны.
- 3.2. Снижение зависимости от дорогостоящих и логистически сложных поставок топлива (особенно дизельного) повышает энергетическую безопасность.
- 3.3. Снижение углеродного следа становится важным фактором соответствия экологическим стандартам и требованиям инвесторов.

VI. Заключение

Разработанная математическая модель энергообъекта, интегрирующая динамические характеристики всех ключевых компонентов (инерционные ГПА, более маневренные ДГ, высокодинамичные БНЭ с отдельными моделями литий-ионных АКБ и СК), доказала свою адекватность. Модель корректно отражает причинно-следственные связи между управляющими воздействиями и откликом системы на возмущения (изменения нагрузки).

Модель учитывает ограничения компонентов (максимальная/минимальная мощность ГПА/ДГ, токи заряда/разряда и глубину разряда (*DoD*) АКБ, энергоемкость и скорость отклика СК), что является критическим для практической реализуемости алгоритмов управления. Включение модели прогнозирования нагрузки как входного воздействия для управления позволило перейти от реактивного к проактивному управлению всей системой.

Адаптивный ПИД-регулятор напряжения продемонстрировал высокую эффективность в стабилизации напряжения в реальном времени. Его адаптивность позволила автоматически подстраивать коэффициенты при изменении режимов работы энергоузла (например, при переключении ведущего генератора или резком броске нагрузки), обеспечивая устойчивое качество электроэнергии даже при действии высокочастотных возмущений, которые не могут быть скомпенсированы медленными генераторами.

© Токарев И.С., 2025

Поступила в редакцию 14.07.2025

Принята к публикации 22.07.2025

Received 14.07.2025

Accepted 22.07.2025

Библиографический список

- [1] Беркович М.А., Крылов В.В. Накопители энергии в электроэнергетических системах М.: Энергоатомиздат, 2019. – 320 с.
- [2] Ильинский Н.Ф., Котеленец Н.Ф. Системы накопления энергии в распределённой энергетике СПб.: Политехника, 2020. – 288 с.
- [3] Prabhu J.A.X., Sharma S., Nataraj M., Tripathi D.P. Design of electrical system based on load flow analysis using ETAP for IEC projects // proc. IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), March 04-06, 2016, New Delhi, India. DOI: 10.1109/ICPES.2016.7584103
- [4] Соколов В.И., Тарасов В.И. Электрохимические накопители энергии М.: Химия, 2020. – 198 с.
- [5] Banerjee B., Jayaweera D., Islam S. Modelling and Simulation of Power Systems // Smart Power Systems and Renewable Energy System Integration Studies in Systems, Decision and Control, vol 57, Jayaweera D. Cham: Springer International, 2016. – P. 15-26. DOI: 10.1007/978-3-319-30427-4_2
- [6] Voznesensky A., Kaplun D. Adaptive signal processing algorithms based on EMD and ITD // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 171313-171321. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2956077.
- [7] Nithya C. and Preetha J. Roselyn, Development of grid-side converter-based FRT control and protection in a grid-connected solar photovoltaic park system under different control modes // Frontiers in Energy Research. 2022. Vol. 10. 1009196. DOI: 10.3389/fenrg.2022.1009196
- [8] Klionskiy D., Kupriyanov M., Kaplun D. Signal denoising based on empirical mode decomposition // Journal of Vibroengineering. 2017. Vol. 19. No. 7. P. 5560–5570. DOI: 10.21595/jve.2017.19239
- [9] Kanatov I., Kaplun D., Butusov D., Gulvanskii V., Sinitca A. One technique to enhance the resolution of discrete fourier transform // Electronics. 2019. Vol. 8. 330. DOI: 10.3390/electronics8030330

References

- [1] M.A. Berkovich and V.V. Krylov, *Nakopiteli energii v elektroenergeticheskikh sistemah* [Energy storage devices in electric power systems]. Moscow: Energoatomizdat, 2019 (in Russian).
- [2] N.F. Ilyinsky and N.F. Kotelenets, *Sistemy nakopleniya energii v raspredelyonnoy energetike* [Energy storage systems in distributed energy]. St. Petersburg: Polytechnic, 2020 (in Russian).
- [3] J.A.X. Prabhu, S. Sharma, M. Nataraj and D.P. Tripathi, “Design of electrical system based on load flow analysis using ETAP for IEC projects”, in proc. 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), March 04-06, 2016, New Delhi, India. DOI: 10.1109/ICPES.2016.7584103
- [4] V.I. Sokolov and V.I. Tarasov, *Elektrohimicheskie nakopiteli energii* [Electrochemical energy storage devices]. Moscow: Chemistry, 2020 (in Russian).
- [5] B. Banerjee, D. Jayaweera and S. Islam, “Modelling and Simulation of Power Systems”, in *Smart Power Systems and Renewable Energy System Integration Studies in Systems, Decision and Control*, vol 57, D. Jayaweera, Cham: Springer International, 2016, pp. 15-26. DOI: 10.1007/978-3-319-30427-4_2

- [6] A. Voznesensky and D. Kaplun, "Adaptive signal processing algorithms based on EMD and ITD", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 171313-171321, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2956077.
- [7] C. Nithya and J.P. Roselyn, "Development of grid-side converter-based FRT control and protection in a grid-connected solar photovoltaic park system under different control modes", *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, 1009196, Sept. 2022. DOI: 10.3389/fenrg.2022.1009196
- [8] D. Klionskiy, M. Kupriyanov and D. Kaplun, "Signal denoising based on empirical mode decomposition", *Journal of Vibroengineering*, vol. 19, no. 7, pp. 5560–5570, Nov. 2017. DOI: 10.21595/jve.2017.19239
- [9] I. Kanatov, D. Kaplun, D. Butusov, V. Gulvanskii and A. Sinitca, "One technique to enhance the resolution of discrete fourier transform", *Electronics*, vol. 8, 330, March 2019. DOI: 10.3390/electronics8030330

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иван Сергеевич Токарев, кандидат технических наук, старший преподаватель Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург, Россия Федерация.

Ivan S. Tokarev, Cand. Sci. (Eng.), senior lecturer of the Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation.