

Влияние формы графиков электрических нагрузок потребителей на эффективность ценозависимого управления на основе систем накопителей электроэнергии

Анатолий П. Дзюба¹ dzyuba-a@yandex.ru  0000-0001-6319-1316

¹ Южно-Уральский государственный университет, пр-т Ленина, 76, г. Челябинск, 454080, Россия

Аннотация. Одним из инновационных направлений перспективного развития электроэнергетических комплексов стран мира являются технологии умных сетей электроснабжения, основным элементом которых – системы промышленных накопителей электроэнергии. Они начали получать широкое распространение для применения в качестве локальных накопителей электроэнергии, используемых в комплексе с возобновляемыми источниками электроэнергии. Цель исследования – выполнение анализа влияния формы графиков электрических нагрузок потребителей на эффект, получаемый в процессе ценозависимого управления электропотреблением на базе систем промышленных накопителей электроэнергии в действующих условиях закупок на оптовом и розничном рынках электроэнергии России. Использованы методы анализа, синтеза, системного подхода. Для выполнения исследования брали данные о характеристиках типовых графиков электрических нагрузок различных типов крупных потребителей, ценовые параметры поставки электроэнергии с розничного рынка электроэнергии, действующие для потребителей ЦФО. На основе трех базовых типов почасового графика электропотребления, имеющих различные показатели коэффициентов заполнения суточных нагрузок, проведены расчеты изменения параметров стоимости закупок электроэнергии и средних цен на закупку электроэнергии, а также выявлены сравнительные характеристики параметров затрат и средних цен. На основе анализа параметров стоимости электроэнергии и средних цен закупки на примере Воронежской области исследовали направление изменения общей стоимости закупок электроэнергии и средних тарифов на закупку по мере изменения показателей коэффициента заполнения суточных графиков нагрузки. Выявлена зависимость эффектов снижения средней цены закупок электроэнергии от показателей коэффициента заполнения. На основе данных о ценовых параметрах всех компонентов электроэнергии для регионов ЦФО рассчитаны параметры стоимости и средних тарифов на закупку электроэнергии, что позволило выявить параметры неравномерности как месячных затрат на закупку электроэнергии и средних цен закупки на примере Воронежской области исследовали направление изменения общей стоимости закупок электроэнергии и средних тарифов на закупку по мере изменения показателей коэффициента заполнения суточных графиков нагрузки. Выявлена зависимость эффектов снижения средней цены закупок электроэнергии от показателей коэффициента заполнения. На основе данных о ценовых параметрах всех компонентов электроэнергии для регионов ЦФО рассчитаны параметры стоимости и средних тарифов на закупку электроэнергии, что позволило выявить параметры снижения средних тарифов на закупку электроэнергии после применения систем накопителей. Проведен анализ эффектов от применения систем накопителей электроэнергии для различных графиков спроса и уровней расчетного напряжения, что позволило выявить тенденцию увеличения эффекта снижения средних цен на закупку электроэнергии по мере снижения уровня расчетного напряжения. Полученные результаты могут быть использованы сотрудниками энергетических компаний России либо энергетических служб промышленных предприятий ЦФО в процессе анализа инвестиционных проектов по использованию систем промышленных накопителей электроэнергии.

Ключевые слова: накопители электроэнергии, управление спросом, ценозависимое электропотребление, энергоэффективность, региональные энерготарифы, промышленная энергетика

The influence of the form of graphs of electrical loads of consumers on the efficiency of price-dependent control based on the systems of electrical energy storage

Anatoly P. Dzyuba¹ dzyuba-a@yandex.ru  0000-0001-6319-1316

¹ South-Ural State University, Lenin Av., 76, Chelyabinsk, 454080, Russia

Abstract. One of the innovative directions of the prospective development of electric power complexes of the countries of the world is the technology of smart power supply networks, the main element of which is the system of industrial energy storage. They began to be widely used for use as local energy storage devices used in combination with renewable energy sources. The purpose of the study is to analyze the influence of the shape of the graphs of consumers' electrical loads on the effect obtained in the process of price-dependent energy management based on industrial energy storage systems in the current conditions of procurement in the wholesale and retail electricity markets of Russia. The methods of analysis, synthesis, and systems approach are used. To carry out the study, we took data on the characteristics of typical graphs of electric loads of various types of large consumers, price parameters of electricity supply from the retail electricity market, valid for consumers of the Central Federal District. Based on the three basic types of hourly electricity consumption schedules, which have different indicators of daily load factors, calculations were made of changes in the parameters of the cost of electricity purchases and average prices for the purchase of electricity, as well as the comparative characteristics of cost parameters and average prices were revealed. Based on the analysis of the parameters of the cost of electricity and average purchase prices, the example of the Voronezh region investigated the direction of change in the total cost of electricity purchases and average purchase tariffs as the fill factor of daily load schedules changes. The dependence of the effects of lowering the average price of electricity purchases on the fill factor was revealed. Based on the data on the price parameters of all electric power components for the regions of the Central Federal District, the cost parameters and average tariffs for the purchase of electricity were calculated, which made it possible to identify the uneven parameters of both the monthly costs of purchasing electricity before and after the use of electric energy storage systems, and the parameters for reducing the average purchase tariffs electricity after applying storage systems. The analysis of the effects of the use of energy storage systems for different demand schedules and levels of rated voltage was carried out, which revealed a tendency to increase the effect of a decrease in average prices for the purchase of electricity as the level of rated voltage decreases. The results can be used by employees of energy companies in Russia or energy services of industrial enterprises of the Central Federal District in the process of analysis of investment projects on the use of industrial energy storage systems.

Keywords: energy storage devices, demand management, price-dependent energy consumption, energy efficiency, regional energy production trips, industrial energy

Для цитирования

Дзюба А.П. Влияние формы графиков электрических нагрузок потребителей на эффективность ценозависимого управления на основе систем накопителей электроэнергии // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 1. С. 291–303. doi:10.20914/2310-1202-2020-1-291-303

For citation

Dzyuba A.P. The influence of the form of graphs of electrical loads of consumers on the efficiency of price-dependent control based on the systems of electrical energy storage. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 1. pp. 291–303. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-1-291-303

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Одним из базовых направлений мировых инновационных исследований последнего десятилетия являются технологии в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Для большинства стран мира энергосбережение и повышение энергетической эффективности являются базовыми направлениями политики долгосрочного стратегического развития, что приводит к повышению интереса к технологиям и методам энергосбережения. Это в последние 15 лет позволило привлечь значительные государственные и частные инвестиции в исследования и разработки в данной области. Развитие технологий учета электроэнергии и передачи данных о параметрах электропотребления на большие расстояния положило основу развития новой технологии «Умных сетей электроснабжения» (англ. Smart Grid) [1]. Умные сети электроснабжения основаны на использовании информационных и коммуникационных технологий для сбора информации о производстве и спросе электроэнергии, выполняют автоматическое регулирование режимов электропотребления, направленное на повышение как надежности энергоснабжения, так и на снижение затрат на энергопотребление. Постепенное внедрение технологий умных сетей электроснабжения формирует новые методологические подходы к управлению бизнес-процессами в электроэнергетике, прежде всего на уровне конечных потребителей электроэнергии [2]. Одним из ключевых направлений использования умных сетей электроснабжения является комбинированная интеграция потребления электроэнергии одновременно от централизованной сети электроснабжения и от локальных систем промышленных накопителей электроэнергии.

Постановка задачи

Системы промышленных накопителей электроэнергии – это системы аккумуляции электроэнергии, позволяющие выполнять накопление электроэнергии в промышленных масштабах с целью последующей выдачи потребителям. Системы промышленных накопителей электроэнергии представляют собой аккумулятор электроэнергии, способный накапливать заряд большой емкости. Это принципиально новый элемент архитектуры сетей электроснабжения, предающий ей новые функциональные свойства. Системы промышленных накопителей могут участвовать в рынках

системных услуг по регулированию параметров устойчивости электроэнергетических систем.

Наиболее распространенными технологиями промышленных накопителей электроэнергии являются гидроаккумулирующие электростанции, механические и пневматические накопители электроэнергии, однако данные виды промышленных накопителей из-за высоких капитальных и эксплуатационных затрат не нашли широкого распространения [3, 4]. Современные технологии промышленных накопителей электроэнергии получили развитие на основе методов электрохимического сохранения электроэнергии, которые основаны на литий-ионных полимерных технологиях, позволяющих изготавливать накопители сравнительно небольшой стоимости, компактные по массогабаритным показателям, с выполнением в любой геометрической форме [5].

Основным технологическим трендом, сопутствующим массовому развитию технологий промышленных накопителей электроэнергии, является развитие возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ). Из рисунка 1 видно, что среднегодовые темпы роста ввода систем солнечной и ветрогенерации существенно опережают показатели прочих альтернативных источников ВИЭ. Именно системы солнечной и ветрогенерации из-за высокой установленной мощности требуют применения систем промышленных накопителей. Учитывая несовпадение периодов выработки электроэнергии ВИЭ и потребления электроэнергии на уровне конечных потребителей, для повышения КПД использования ВИЭ требуется применение систем промышленных накопителей. По данным МЭА, за период 1990–2015 гг. доля ВИЭ в общемировом энергобалансе возросла с 19,4 до 22,8% [6], а рост использования ВИЭ в мировом энергобалансе без учета гидроэнергетики составил с 1,3 до 6,8%, что подчеркивает дальнейшую перспективу развития технологий промышленных накопителей в будущем.

Анализ динамики выработки электроэнергии на основе солнечной генерации и ветрогенерации в некоторых странах мира за 2000–2015 гг. (рисунок 2) подчеркивает как действующую, так и прогнозную динамику ввода мощностей ВИЭ, что еще раз свидетельствует о развитии рынка систем промышленных накопителей.

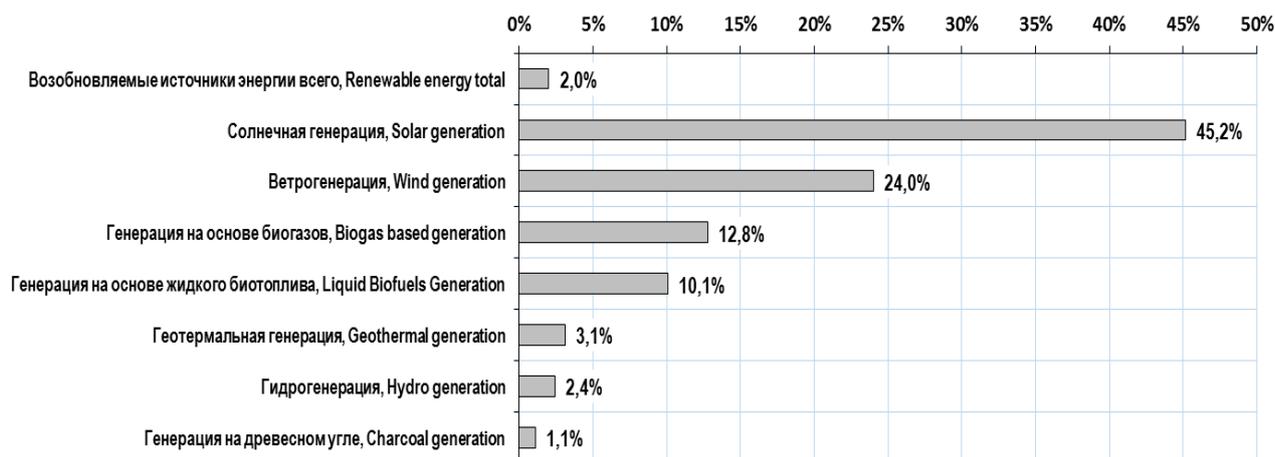


Рисунок 1. Среднемировые темпы роста использования возобновляемых источников электроэнергии за период 1990–2015 гг. [6]

Figure 1. The average global growth rate of renewable energy sources for the period 1990–2015 [6]

По данным аналитического агентства Navigant Research [7], прогноз мирового рынка систем накопителей электроэнергии, участвующих в рамках рынков системных услуг, может 1 ГВт в 2016 г. вырасти до 22 ГВт уже в 2025 г., что сформирует рынок емкостью более 18 млрд долл. в год. По данным экспертно-аналитического доклада, подготовленного «Роснано» на тему «Рынок систем накопления электроэнергии в России: потенциал развития», максимальный объем российского сегмента рынка систем накопителей электроэнергии к 2025 г. может составить 8,6 млрд долл. США в год, что даст экономике страны эффект в размере 11 млрд долл. США в год [8].

Системы промышленных накопителей электроэнергии могут работать в комбинированном

режиме, как с традиционными источниками энергоснабжения, так и с системами распределенной генерации и альтернативных источников электроэнергии (рисунок 3). Применение локальных систем промышленных накопителей еще больше расширяет возможности управления энергоснабжением, что приводит к снижению потерь и более гибкому регулированию режимов работы применительно к управляемой нагрузке. Как было упомянуто выше, применение систем промышленных накопителей электроэнергии способно полностью изменить как архитектуру электроснабжения на уровне энергосистем, так и модель управления электропотреблением на уровне потребителей электроэнергии.

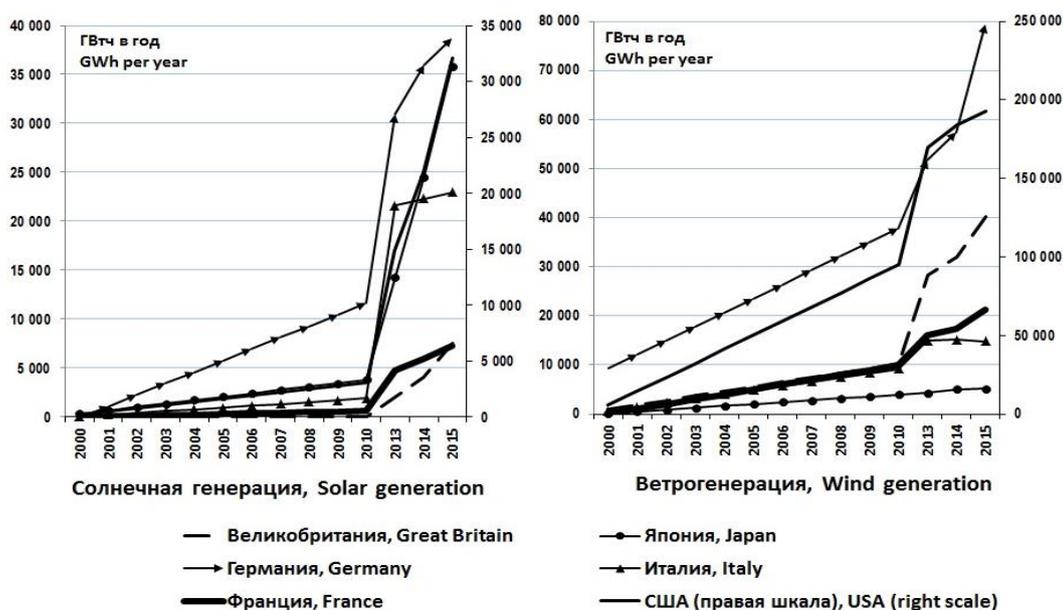


Рисунок 2. Объемы выработки электроэнергии при помощи систем солнечной генерации и ветрогенерации в некоторых странах мира за период 2000–2015 гг. [6]

Figure 2. Volumes of electricity generation with the help of solar generation and wind generation systems in some countries of the world for the period 2000–2015 [6]

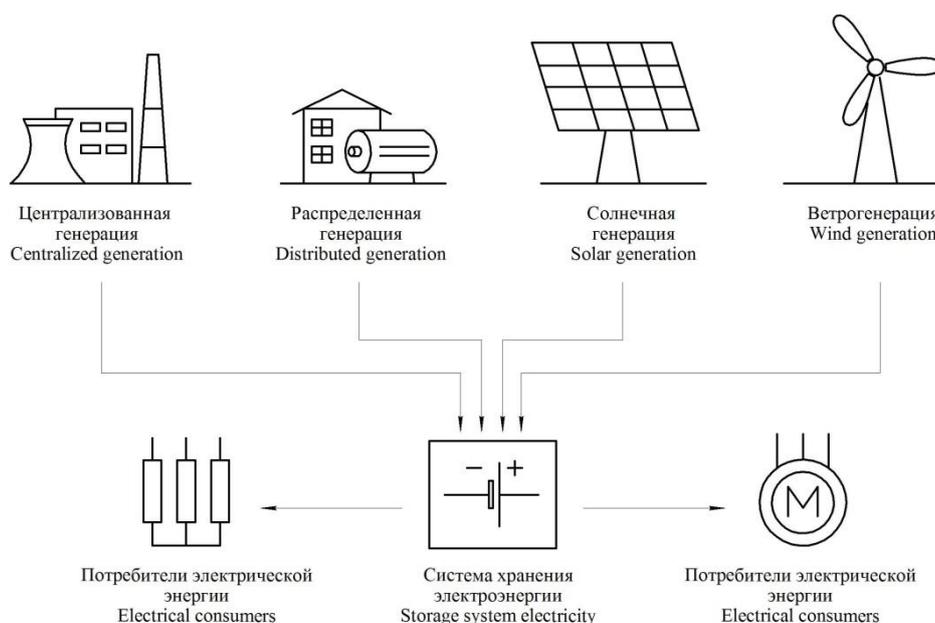


Рисунок 3. Структура работы систем промышленных накопителей электроэнергии с различными источниками выработки электроэнергии

Figure 3. The structure of the work of industrial energy storage systems with various sources of electricity generation

Ценозависимое потребление электроэнергии в России

Действующие условия ценообразования оптового и розничного рынков электроэнергии России позволяют использовать системы промышленных накопителей электроэнергии для целей управления затратами на закупку электроэнергии. Это реализуется на основе ценозависимого электропотребления, которое представляет собой управление собственным почасовым графиком спроса на электропотребление на основе реакции на изменение ценовых сигналов энергорынка [9]. Применение ценозависимого управления электропотреблением на основе систем промышленных накопителей электроэнергии позволяет снижать затраты на закупку электроэнергии. При этом для потребителей, имеющих различные характеристики внутрисуточного почасового спроса на электропотребление эффект не является одинаковым. Эффект от применения систем промышленных накопителей электроэнергии влияет как на экономию, получаемую потребителями электроэнергии, так и на показатели инвестиционного проекта по приобретению и эксплуатации систем накопителей.

Методология исследования

На основе примера различных графиков почасового суточного спроса на электропотребление проведен анализ эффективности применения ценозависимого управления электропотреблением на основе систем промышленных накопителей электроэнергии. На рисунке 4 представлены

типичные графики почасового суточного спроса на электропотребление с различными параметрами коэффициентов заполнения. Коэффициент заполнения графика нагрузок – отношение средней активной мощности к максимальной за исследуемый период времени формула (1). Коэффициент заполнения графика нагрузок ($K_{\text{зап}}$) отражает, насколько величина пикового суточного графика спроса отличается от среднесуточной величины спроса [10]. Чем ближе значение коэффициента заполнения к 1, тем меньше выражен пик суточного почасового графика спроса, и наоборот.

$$K_{\text{зап}} = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{max}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ср}}$ – среднесуточное значение почасового графика нагрузок; P_{max} – максимальное значение почасового графика нагрузок. «График А» соответствует графику нагрузки предприятия, работающего в одну смену. Пример такого предприятия – швейная фабрика. Расчетный $K_{\text{зап}}$ «Графика А» составляет 0,42.

«График Б» соответствует графику нагрузки крупного потребителя электроэнергии, работающего более 10 часов в сутки. Пример такого потребителя – торговый центр, работающий в период с 09:00 до 20:00. Расчетный $K_{\text{зап}}$ «Графика Б» составляет 0,66.

«График В» соответствует графику нагрузки производственного предприятия, работающего в две полные смены. Расчетный $K_{\text{зап}}$ «Графика В» составляет 0,88.

Для графиков А, Б и В пики нагрузки в часы максимума с 09:00 до 15:00 являются эквивалентными как по форме, так и по величине. Сравнимые графики отличаются лишь формами вечерних пиков. При этом именно дневные пики оказывают основное влияние на стоимость параметров электрической мощности и услуг по передаче электроэнергии.

Проведем моделирование графиков электрических нагрузок предприятий после применения системы промышленного накопителя электроэнергии. Система промышленного накопителя имеет установленную мощность 400 кВт. Заряд системы промышленного накопителя производится в ночное время с 23:00 до 05:00. При этом зарядка выполняется в режиме потребления нагрузки, равной 267 кВт в час. Выдача мощности системой накопителя производится в часы максимума нагрузки в течение 4 ч – с 09:00 до 13:00, с выдаваемой мощностью 400 кВт в час. На рисунке 5 представлены

графики почасового суточного спроса на электропотребление после применения систем промышленного накопления электроэнергии, из которых следует, что в часы выдачи мощности системой накопления электроэнергии график спроса снижается, и наоборот, в часы заряда системы накопления электроэнергии график спроса предприятия увеличивается на мощность заряда системы накопителей. В таблице 1 представлены расчетные характеристики посуточных графиков типовых графиков электропотребления до и после применения систем промышленного накопления электроэнергии, из которых следует, что общий объем электропотребления предприятием за счет перераспределения нагрузок не изменяется. При этом снижаются величины закупки мощности после применения системы накопителей и величины на оплату ставки на содержание электрических сетей после применения системы накопителей.

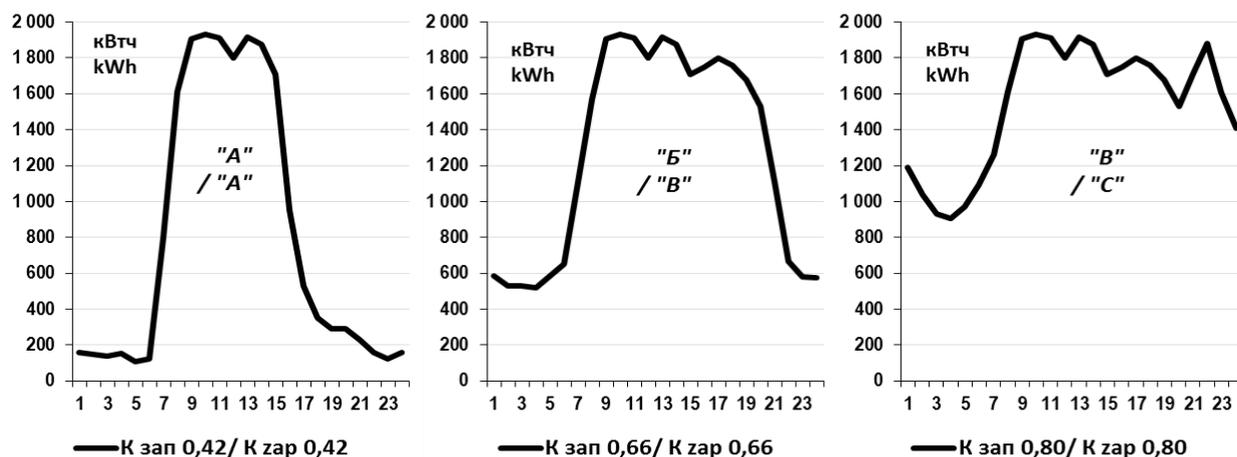


Рисунок 4. Типовые графики почасового суточного спроса на электропотребление с различными параметрами коэффициентов заполнения

Figure 4. Typical schedules of hourly daily demand for power consumption with various parameters of fill factors

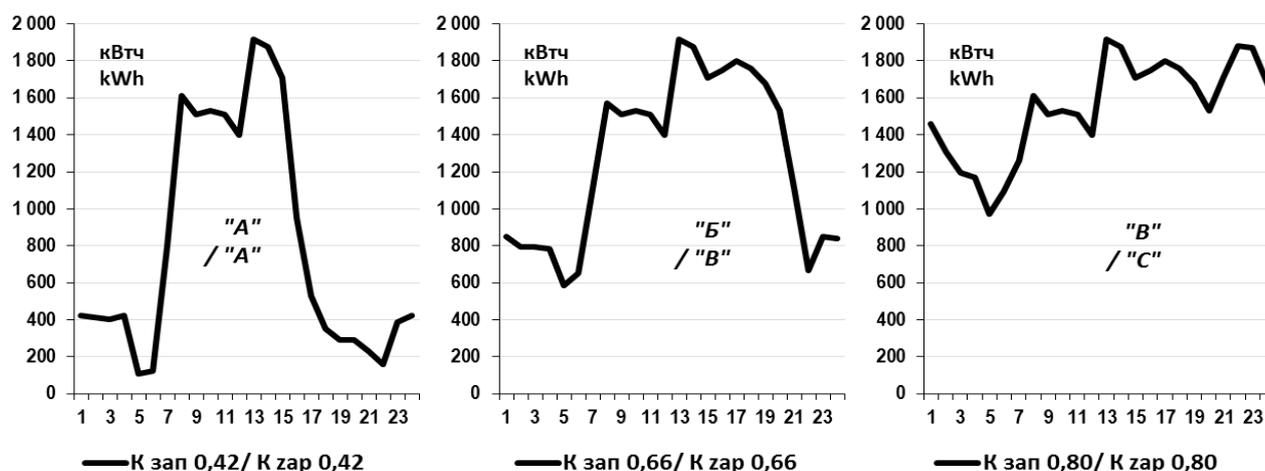


Рисунок 5. Типовые графики почасового суточного спроса на электропотребление после применения систем промышленного накопления электроэнергии

Figure 5. Typical schedules of hourly daily demand for electricity after the application of industrial energy storage systems

Таблица 1.

Параметры характеристик типовых графиков электропотребления до и после применения систем промышленного накопления электроэнергии

Table 1.

Characteristics of typical graphs of power consumption before and after the application of industrial energy storage systems

Параметр Parameter	График А Chart A	График Б Chart B	График В Chart C
Суточный объем электропотребления до применения системы накопителей, кВтч Daily power consumption before using the storage system, kWh	19 358	30 575	37 171
Суточный объем электропотребления после применения системы накопителей, кВтч The daily amount of power consumption after using the storage system, kWh	19 358	30 575	37 171
Величина закупки мощности до применения системы накопителей, кВт/мес Amount of power purchase before using the storage system, kW/month	1 931	1 931	1 931
Величина закупки мощности после применения системы накопителей, кВт/мес The amount of power purchase after using the storage system, kW/month	1 531	1 531	1 531
Величина на оплату ставки на содержание электрических сетей до применения системы накопителей, кВт/мес The amount to pay for the maintenance of electric networks before the application of storage systems, kW/month	1 931	1 931	1 931
Величина на оплату ставки на содержание электрических сетей после применения системы накопителей, кВт/мес The amount to pay for the maintenance of electric networks after the application of the storage system, kW/month	1 531	1 531	1 531

Оценка экономического эффекта для различных характеристик графиков нагрузки

На основании полученных графиков электропотребления до и после применения систем промышленного накопления электроэнергии, имеющих различные параметры $K_{\text{зап}}$, были выполнены расчеты параметров стоимости закупок электроэнергии. Стоимость закупок электроэнергии производилась на основе цен розничного рынка электроэнергии, действующих в Воронежской области за апрель 2019 г. Расчетный уровень напряжения был принят 6 кВ (среднее второе напряжение – СН2), т. к. данное напряжение является наиболее распространенным для потребителей электроэнергии. Крупным промышленным предприятиям для

получения эффекта нужно применение более мощных систем накопителей, которые требуют наибольших капиталовложений.

Расчет стоимости закупок электроэнергии $C_{\text{мес}}$ производился по формуле (2), расчет средних тарифов на закупку электроэнергии производился по формуле (3).

$$C_{\text{мес}} = C_{\text{мес}}^{\text{ээ}} + C_{\text{мес}}^{\text{мощ}} + C_{\text{мес}}^{\text{пер}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{мес}}^{\text{ээ}}$ – стоимости закупок компонента электрической энергии за календарный месяц, р.; $C_{\text{мес}}^{\text{мощ}}$ – стоимости закупок компонента электрической мощности за календарный месяц, р.; $C_{\text{мес}}^{\text{пер}}$ – стоимости оплаты компонента услуги по передаче электроэнергии за календарный месяц, р. [11].

Таблица 2.

Параметры стоимости закупки электроэнергии и средних тарифов закупки для различных графиков спроса в ценах Воронежской области за период апреля 2019 года. СНЭ – системы накопителей электроэнергии

Table 2.

The cost parameters of the purchase of electricity and the average purchase tariffs for various demand schedules in the prices of the Voronezh region for the period of April 2019. SNE – power storage systems

Параметр Parameter	График А Chart A	График Б Chart B	График В Chart C
1	2	3	4
Стоимость закупки электроэнергии до применения СНЭ, тыс. р. The cost of the purchase of electricity before the application of SNE, thousand roubles	5 454,4	6 085,5	6 445,6
Стоимость закупки электроэнергии после применения СНЭ, тыс. р. The cost of purchasing electricity after the application of SNE, thousand roubles	4 546,2	5 177,2	5 537,4
Эффект от применения СНЭ, тыс. р. The effect of the use of SNE, thousand roubles	908,3	908,3	908,3
Эффект от применения СНЭ, % The effect of the use of SNE, %	17	15	14

Продолжение табл. 2 | Continuation of table 2

1	2	3	4
Средний тариф на закупку электроэнергии до применения СНЭ, р. The average tariff for the purchase of electricity to the application of SNE, rubles	9,39	6,63	5,78
Средний тариф на закупку электроэнергии после применения СНЭ, р. The average tariff for the purchase of electricity after the application of SNE, rubles	7,83	5,64	4,97
Эффект от применения СНЭ, р. The effect of the use of SNE, rubles	1,6	1,0	0,8
Эффект от применения СНЭ, % The effect of the use of SNE, %	17	15	14

Результат расчета параметров стоимости закупки электроэнергии и средних тарифов закупки до и после применения систем накопителей электроэнергии представлен в таблице 2 и на рисунке 6. Как видно из расчетов, общая стоимость закупок электроэнергии для графиков «А», «Б» и «В» различна, это связано с различием общего объема потребления электроэнергии рассматриваемыми графиками. При этом величина эффекта от закупок электроэнергии для всех графиков является одинаковой – 908,3 тыс. р., что связано с одинаковой величиной снижения нагрузки в часы пикового спроса. Сравнение величины относительного эффекта для различных графиков показало, что эффект для «Графика А» является самым большим и составляет 17% от общей величины затрат, для графиков «Б» и «В» эффект составляет 15 и 14% соответственно, что также объясняется различными параметрами стоимости электроэнергии для различных графиков.

Сравнительная оценка средних тарифов $C_{мес}$ на закупку электроэнергии показывает обратную зависимость. Для «Графика А» тариф на закупку электроэнергии является самым высоким – 9,39 р./кВт·ч, и снижается для графиков «Б» и «В». Несмотря на то что общий эффект для рассматриваемых графиков одинаковый, величина снижения средних тарифов

на закупку электроэнергии различна: для «Графика А» – 1,6 р./кВт·ч., для «Графика Б» – 1,0 р./кВт·ч., для «Графика В» – 0,8 р./кВт·ч.

$$C_{мес} = \frac{C_{мес}}{W_{мес}}, \quad (3)$$

где $W_{мес}$ – объем электропотребления за календарный месяц, кВт·ч;

Как видно из рисунка 6, если по мере увеличения коэффициента заполнения суточного графика нагрузок величина стоимости закупок электроэнергии возрастает, а эффект от применения систем накопителей является одинаковым, то по мере увеличения коэффициента заполнения средний тариф на закупку электроэнергии снижается, и разница в тарифах от применения системы накопителей снижается по мере увеличения коэффициента заполнения графиков нагрузки.

Таким образом, характеристика коэффициента заполнения суточных графиков нагрузки оказывает существенное влияние на параметры уровня эффектов от применения систем накопителей электроэнергии и снижение средних тарифов на закупку электроэнергии по мере снижения параметров коэффициентов заполнения суточных графиков нагрузки.

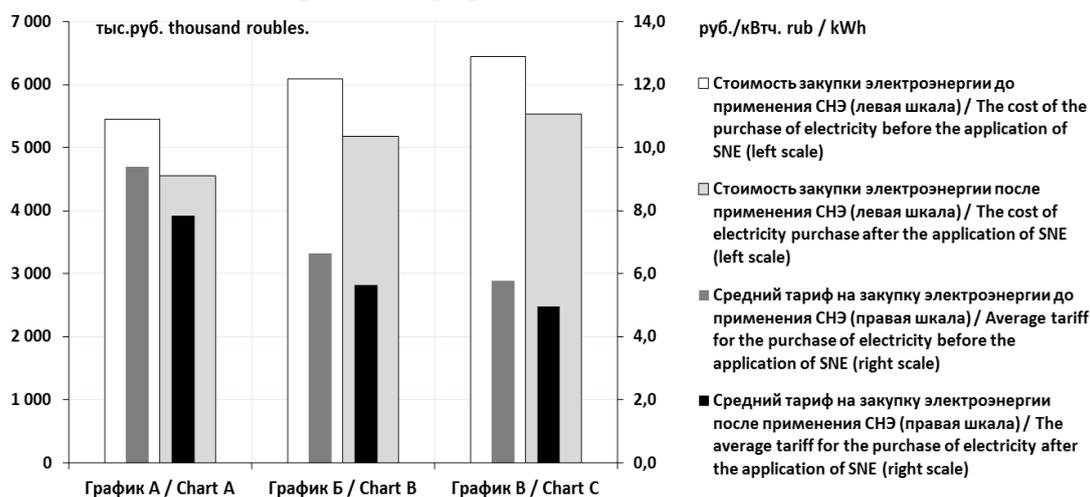


Рисунок 6. Параметры стоимости закупки электроэнергии и средних тарифов закупки для различных графиков спроса в ценах Воронежской области за период апреля 2019 г.

Figure 6. The cost parameters of the purchase of electricity and the average purchase tariffs for various demand schedules in the prices of the Voronezh region for the period of April 2019

Сравнение эффектов на примере регионов ЦФО. Ценовые параметры закупки электроэнергии для регионов России имеют существенные различия по каждому компоненту стоимости электроэнергии. На основании различных параметров компонентов стоимости электроэнергии эффект от применения систем промышленных накопителей электроэнергии для различных регионов может существенно отличаться, как и величина эффекта, связанная с изменением коэффициента заполнения суточных графиков электрических нагрузок (таблица 3).

Для каждого региона произведен расчет стоимости закупок электроэнергии на розничном рынке для уровня «среднее второе напряжение (СН2)». Расчет выполнен для параметров графиков «А», «Б» и «В» с учетом базового графика нагрузки, а также применения систем промышленного накопителя электроэнергии. Как видно из результатов расчетов, несмотря на применение в процессе расчетов эквивалентных графиков электропотребления и равных параметров корректировки величины

спроса на параметры заряда и разряда системы накопителей электроэнергии, эффекты для исследуемых регионов различаются. Различия проявляются как в величине эффектов в рамках регионов, так и в величине изменения эффектов с изменением параметров коэффициентов заполнения суточных графиков нагрузки для представленных примеров «График А–В».

На рисунке 7 представлена диаграмма месячных затрат на закупку электроэнергии до и после применения систем накопителей электроэнергии для регионов ЦФО на примере расчета «Графика А». Величина затрат на закупку электроэнергии при эквивалентном графике спроса для регионов ЦФО различна. Наиболее высокая стоимость наблюдается в Курской, Смоленской и Липецкой областях, самая низкая – в Тульской и Московской областях и г. Москве. В целом затраты на закупку электроэнергии могут различаться на величину до 40%, что существенно влияет на эффект от применения систем промышленных накопителей.

Таблица 3.
Параметры изменения стоимости закупок электроэнергии и средних тарифов до и после применения системы накопителей электроэнергии в регионах ЦФО

Table 3.
Parameters of changes in the cost of purchasing electricity and average tariffs before and after the application of the system of electricity storage in the regions of the Central Federal District

Регион ЦФО Region CFD	Параметр Parameter	А/А +		Б/Б +		В/В +	
		Стоимость Cost	Средний тариф Average fare	Стоимость Cost	Средний тариф Average fare	Стоимость Cost	Средний тариф Average fare
		тыс. р. thousand roubles.	р./кВт·ч rub / kWh	тыс. р. thousand roubles	р./кВт·ч rub/kWh	тыс. р. thousand roubles.	р./кВт·ч rub/kWh
1	2	3	4	5	6	7	8
Белгородская область Belgorod region	X	4 773	8,22	5 410	5,90	5 773	5,18
	Y	4 008	6,90	4 645	5,06	5 008	4,49
	Z	765	1,32	765	0,83	765	0,69
	H	16%	16%	14%	14%	13%	13%
Брянская область Bryansk region	X	5 593	9,63	6 186	6,74	6 524	5,85
	Y	4 642	7,99	5 235	5,71	5 574	5,00
	Z	950	1,64	950	1,04	950	0,85
	H	17%	17%	15%	15%	15%	15%
Владимирская область Vladimir region	X	5 295	9,12	5 921	6,45	6 279	5,63
	Y	4 419	7,61	5 044	5,50	5 403	4,85
	Z	876	1,51	876	0,95	876	0,79
	H	17%	17%	15%	15%	14%	14%
Воронежская область Voronezh region	X	5 454	9,39	6 086	6,63	6 446	5,78
	Y	4 546	7,83	5 177	5,64	5 537	4,97
	Z	908	1,56	908	0,99	908	0,81
	H	17%	17%	15%	15%	14%	14%
Ивановская область Ivanovo region	X	5 180	8,92	5 729	6,25	6 042	5,42
	Y	4 301	7,41	4 849	5,29	5 163	4,63
	Z	879	1,51	879	0,96	879	0,79
	H	17%	17%	15%	15%	15%	15%

Продолжение табл. 3 | Continuation of table 2

1	2	3	4	5	6	7	8
Калужская область Kaluga region	X	5 526	9,52	6 189	6,75	6 568	5,89
	Y	4 615	7,95	5 278	5,75	5 657	5,07
	Z	911	1,57	911	0,99	911	0,82
	H	16%	16%	15%	15%	14%	14%
Костромская область Kostroma region	X	5 724	9,86	6 305	6,87	6 637	5,95
	Y	4 744	8,17	5 324	5,80	5 656	5,07
	Z	981	1,69	981	1,07	981	0,88
	H	17%	17%	16%	16%	15%	15%
Курская область Kursk region	X	6 603	11,37	7 232	7,88	7 592	6,81
	Y	5 456	9,40	6 086	6,63	6 446	5,78
	Z	1 146	1,97	1 146	1,25	1 146	1,03
	H	17%	17%	16%	16%	15%	15%
Липецкая область Lipetsk region	X	5 989	10,31	6 652	7,25	7 032	6,31
	Y	4 982	8,58	5 645	6,15	6 025	5,40
	Z	1 007	1,73	1 007	1,10	1 007	0,90
	H	17%	17%	15%	15%	14%	14%
Московская область Moscow region	X	4 523	7,79	5 150	5,61	5 510	4,94
	Y	3 807	6,56	4 434	4,83	4 794	4,30
	Z	716	1,23	716	0,78	716	0,64
	H	16%	16%	14%	14%	13%	13%
Орловская область Oryol Region	X	5 245	9,03	5 965	6,50	6 377	5,72
	Y	4 412	7,60	5 132	5,59	5 544	4,97
	Z	833	1,43	833	0,91	833	0,75
	H	16%	16%	14%	14%	13%	13%
Рязанская область Ryazan Oblast	X	5 848	10,07	6 450	7,03	6 793	6,09
	Y	4 848	8,35	5 450	5,94	5 794	5,20
	Z	1 000	1,72	1 000	1,09	1 000	0,90
	H	17%	17%	16%	16%	15%	15%
Смоленская область Smolensk region	X	6 344	10,92	6 985	7,61	7 355	6,60
	Y	5 256	9,05	5 897	6,43	6 268	5,62
	Z	1 087	1,87	1 087	1,19	1 087	0,98
	H	17%	17%	16%	16%	15%	15%
Тамбовская область Tambov Region	X	5 538	9,54	6 154	6,71	6 505	5,83
	Y	4 607	7,93	5 223	5,69	5 575	5,00
	Z	931	1,60	931	1,01	931	0,83
	H	17%	17%	15%	15%	14%	14%
Тверская область Tver region	X	5 453	9,39	6 176	6,73	6 594	5,91
	Y	4 579	7,88	5 302	5,78	5 720	5,13
	Z	874	1,50	874	0,95	874	0,78
	H	16%	16%	14%	14%	13%	13%
Тульская область Tula region	X	4 872	8,39	5 587	6,09	5 998	5,38
	Y	4 115	7,09	4 831	5,27	5 241	4,70
	Z	757	1,30	757	0,82	757	0,68
	H	16%	16%	14%	14%	13%	13%
Ярославская область Yaroslavskaya oblast	X	4 930	8,49	5 526	6,02	5 868	5,26
	Y	4 120	7,09	4 715	5,14	5 058	4,54
	Z	810	1,40	810	0,88	810	0,73
	H	16%	16%	15%	15%	14%	14%
г. Москва Moscow	X	4 365	7,52	4 925	5,37	5 245	4,70
	Y	3 658	6,30	4 218	4,60	4 538	4,07
	Z	707	1,22	707	0,77	707	0,63
	H	16%	16%	14%	14%	13%	13%

X – стоимость электроэнергии при базовом графике спроса / electricity cost at the base demand schedule;
 Y – стоимость электроэнергии при скорректированном графике спроса / electricity cost with adjusted demand graph;
 Z – эффект в руб. / effect in rub.; H – эффект в% / effect in proc.

На рисунке 8 показаны параметры снижения средних тарифов на закупку электроэнергии после применения систем накопителей электроэнергии для графиков нагрузки с различными

параметрами коэффициентов заполнения. Эффекты от применения систем промышленных накопителей электроэнергии являются различными. Для Курской области величина эффекта

для «Графика А» составляет 1,97 р./кВт·ч., а для г. Москвы при эквивалентном графике спроса и системе промышленного накопителя эффект составляет 1,22 р./кВт·ч, что отличается на 38%. Выявленное различие эффектов существенно влияет как на эффект от применения систем накопителей, так и на параметры инвестиционных проектов внедрения систем промышленных накопителей.

Если различие эффектов от применения систем накопителей электроэнергии для графиков «А» и «В» для Курской области составляет 0,95 р./кВт·ч., то для г. Москвы данный показатель составляет 0,58 р./кВт·ч, что влияет на эффект применения систем накопителей электроэнергии для потребителей, имеющих различные коэффициенты заполнения суточных графиков спроса.

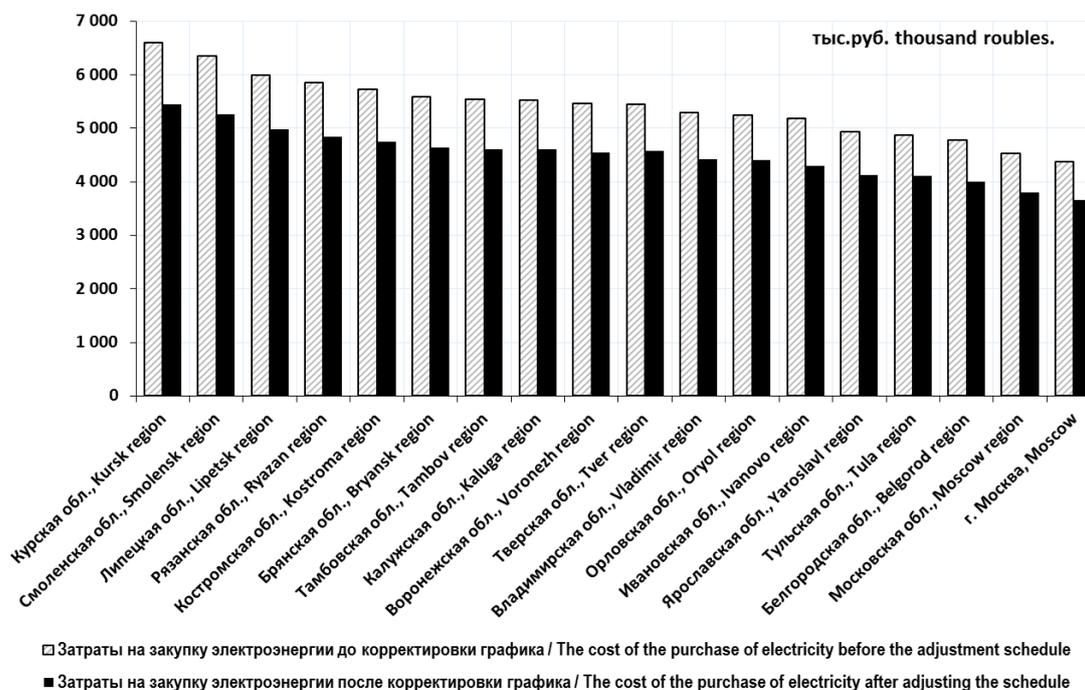


Рисунок 7. Месячные затраты на закупку электроэнергии до и после применения систем накопителей электроэнергии для регионов ЦФО на примере расчета «Графика А»

Figure 7. Monthly costs for the purchase of electricity before and after the application of electric power collectors for the regions of the Central Federal District on the example of the calculation of "Graphic A"

Оценка эффектов для различных уровней расчетного напряжения

Учитывая, что параметры стоимости электрической энергии и электрической мощности одинаковы для всех категорий потребителей электроэнергии, для потребителей, подключенных к различным уровням напряжения ВН (110 кВ и выше), СН1 (35 кВ), СН2 (20 – 1 кВ), НН (0,4 кВ и ниже), тарифы на передачу электроэнергии имеют существенные различия, что также требует дополнительных исследований. Исследованию особенностей формирования стоимости компонента услуги по передаче электроэнергии посвящена работа.

Учитывая выявленные различия эффектов от применения систем промышленных накопителей электроэнергии для суточных графиков нагрузки, имеющих различные показатели коэффициентов заполнения, был проведен расчет эффектов для различных графиков спроса

и различных уровней расчетного напряжения (рисунок 9).

Средние цены на закупку электроэнергии имеют тенденции увеличения по мере снижения уровня расчетного напряжения, за исключением уровней напряжения «СН2» и «НН», в которых по мере снижения уровня напряжения производится увеличение средней цены. Это связано с особенностями формирования тарифов на передачу электроэнергии в различных регионах России. При этом в большинстве регионов тарифы имеют строгое увеличение по мере снижения расчетного уровня напряжения. По мере увеличения коэффициента заполнения суточного графика нагрузок на всех уровнях расчетного напряжения средний тариф на закупку электроэнергии снижается. По мере увеличения коэффициента заполнения суточного графика нагрузок эффект от применения системы накопителей снижается, что подтверждается расчётами, выполненными для всех уровней напряжения.

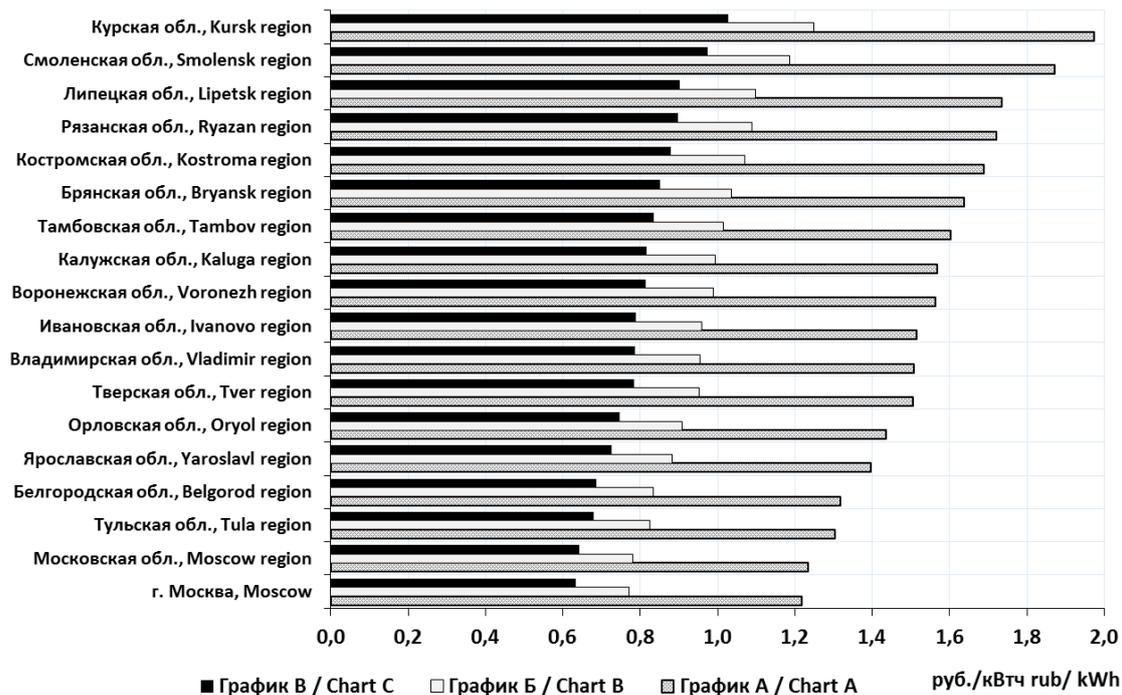


Рисунок 8. Диаграммы параметров снижения средних тарифов на закупку электроэнергии после применения систем накопителей электроэнергии для графиков нагрузки с различными параметрами коэффициентов заполнения
 Figure 8. Diagrams of parameters for reducing the average tariffs for the purchase of electricity after the application of electric energy storage systems for load graphs with different fill factor parameters

Как следует из графиков средних эффектов от применения систем накопителей, по мере снижения расчетного напряжения показатели эффектов имеют тенденцию к увеличению. Для «Графика А», рассчитанного для уровня напряжения «ВН», эффект от применения систем накопителей составляет 1,09 р./кВт·ч, для аналогичного графика, но для уровня напряжения «НН» полученный эффект составляет 1,46 р./кВт·ч, что выше эффекта на уровне напряжения «ВН» на 33,8%. Результаты анализа подчеркивают тенденцию увеличения эффекта от применения систем промышленных накопителей электроэнергии по мере снижения коэффициентов заполнения суточных графиков нагрузок на всех уровнях расчетных напряжений по определению услуги по передаче электроэнергии.

Заклучение

По результатам проведенного исследования можно сделать ряд выводов.

1) Одним из базовых направлений развития современных систем электроснабжения является интеграция потребления электроэнергии одновременно от централизованной сети электроснабжения и локальных систем промышленных накопителей электроэнергии. Промышленные накопители электроэнергии представляют собой принципиально новый элемент архитектуры сетей электроснабжения, который позволит предать ей новые функциональные свойства и изменить привычный подход к управлению

бизнес-процессами централизованного энергообеспечения потребителей электроэнергии.

2) Развитие мирового рынка систем солнечной и ветрогенерации привело к развитию технологий в области электрохимических накопителей электроэнергии, а также постепенному снижению их стоимости производства, что позволяет расширить использование систем промышленных накопителей на локальных объектах. Действующие условия ценообразования оптового и розничного рынков электроэнергии России позволяют использовать системы промышленных накопителей электроэнергии для целей управления затратами на закупку электроэнергии, это реализуется на основе ценозависимого электропотребления.

3) В результате анализа эффективности применения систем промышленных накопителей электроэнергии для графиков электрических нагрузок, имеющих различные параметры коэффициентов заполнения на примере ценовых параметров, действующих в Воронежской области, было выявлено, что по мере увеличения коэффициентов заполнения суточного графика нагрузки величина снижения среднего тарифа на закупку электроэнергии снижается. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности использования систем промышленных накопителей электроэнергии в первую очередь для потребителей, имеющих коэффициент заполнения суточных графиков нагрузки менее 0,5.

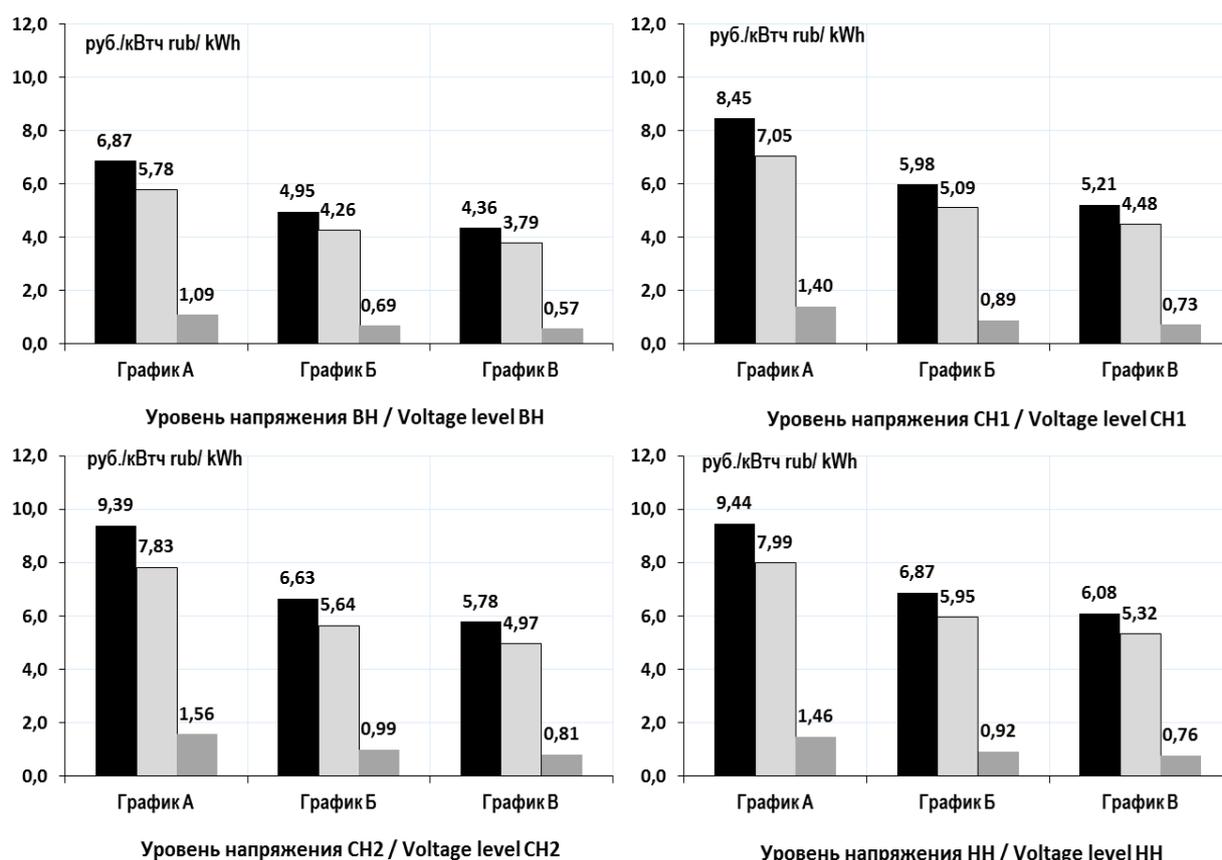


Рисунок 9. Средние цены на закупку электроэнергии до и после применения системы накопителей электроэнергии для различных уровней расчетного напряжения

Figure 9. Average prices for the purchase of electricity before and after applying the system of electricity storage for different levels of rated voltage

4) Расчет и сравнение эффектов от использования систем промышленных накопителей электроэнергии на основе графиков электрических нагрузок, имеющих различный коэффициент заполнения для регионов, входящих в ЦФО, позволили выявить, что тенденция увеличения среднего эффекта по мере увеличения коэффициента заполнения сохраняется для всех регионов. При этом эффект от применения систем промышленных накопителей в рамках различных типовых графиков для исследуемых регионов является различным, что свидетельствует о необходимости проведения отдельных исследований потенциальных эффектов в случае принятия инвестиционных решений об установке локальных систем промышленных накопителей.

5) Анализ эффектов для различных уровней расчетного напряжения на основе графиков электрических нагрузок, имеющих различный коэффициент заполнения, рассчитанных на примере ценовых параметров услуг по передаче электроэнергии, действующих в Воронежской области, позволил выявить тенденцию увеличения средних эффектов от применения систем накопителей пропорционально снижению уровней расчетного напряжения. Выявленная тенденция подчеркивает получение наибольшего эффекта и показателей эффективности инвестиционных проектов от применения систем промышленных накопителей электроэнергии для потребителей, имеющих более низкий расчетный тариф на услугу по передаче электроэнергии.

Литература

- 1 Knudsen J.A., Hansen J., Annaswamy A.M. Dynamic Market Mechanism for the Integration of Renewables and Demand Response // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2016. V. 24. № 3. P. 940–955. doi: 10.1109/TCST.2015.2476785
- 2 Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID. М.: ИАЦ Энергия, 2010. 208 с.
- 3 Litjens G., Sark W.V., Worrell E. On the influence of electricity demand patterns, battery storage and PV system design on PV self-consumption and grid interaction // 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). 2017. P. 2021–2024. doi: 10.1109/PVSC.2016.7749983

- 4 Foucault F., Girard R., Kariniotakis G. A robust investment strategy for generation capacity in an uncertain demand and renewable penetration environment // 11th International Conference on the European Energy Market (EEM14). 2014. P. 1–5. doi: 10.1109/EEM.2014.6861240
- 5 Ярапин И.Ю. Сферы применения систем хранения электроэнергии: мировой опыт и российские перспективы // Материалы Международного конгресса REENCON-XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность». Москва, 2016. С. 257–258.
- 6 Renewables Information. Report International Energy Agency. 2017. 488 p. URL: <https://www.iea.org>
- 7 Power storage systems. Navigant Research URL: www.navigantresearch.com
- 8 Рынок систем накопления электроэнергии в России: потенциал развития. Экспертно-аналитический доклад «Роснано». Москва, 2018. 70 с.
- 9 Соловьева И.А., Дзюба А.П. Управление затратами на электропотребление по показателям волатильности спроса // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2017. № 1(33). С. 36–43.
- 10 Головкин П.И. Энергосистема и потребители электрической энергии. М.: Энергия 1, 1979. 359 с.
- 11 Баев И.А., Соловьева И.А., Дзюба А.П. Внедрение модели ценозависимого управления спросом на электропотребление в промышленности // Управление. 2018. Т. 9. № 6. С. 111–121. doi: 10.29141/2218-5003-2018-9-6-11

References

- 1 Knudsen J.A., Hansen J., Annaswamy A.M. Dynamic Market Mechanism for the Integration of Renewables and Demand Response. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2016. vol. 24. no. 3. pp. 940–955. doi: 10.1109/TCST.2015.2476785
- 2 Kobec B.B. Innovative development of the electric power industry based on the SMART GRID concept. Moscow, IAC Energiya 2010. 208 p. (in Russian).
- 3 Litjens G., Sark W.V., Worrell E. On the influence of electricity demand patterns, battery storage and PV system design on PV self-consumption and grid interaction. 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). 2017. pp. 2021–2024. doi: 10.1109/PVSC.2016.7749983
- 4 Foucault F., Girard R., Kariniotakis G. A robust investment strategy for generation capacity in an uncertain demand and renewable penetration environment. 11th International Conference on the European Energy Market (EEM14). 2014. pp. 1–5. doi: 10.1109/EEM.2014.6861240
- 5 Ryapin I.Yu. Spheres of application of electric storage systems: world experience and Russian prospects. Materials of the International Congress REENCON-XXI “Renewable Energy XXI Century: Energy and Economic Efficiency”. Moscow, 2016. pp. 257–258. (in Russian).
- 6 Renewables Information. Report International Energy Agency. 2017. 488 p. Available at: <https://www.iea.org>
- 7 Power storage systems. Navigant Research Available at: www.navigantresearch.com
- 8 Market of electric energy storage systems in Russia: development potential. Expert-analytical report of Rusnano. Moscow, 2018. 70 p. (in Russian).
- 9 Solovyova I.A., Dzyuba A.P. Management of energy consumption by demand volatility indicators. Bulletin of Kazan State Power Engineering University. 2017. no. 1 (33). pp. 36–43. (in Russian).
- 10 Golovkin P.I. Power system and consumers of electric energy. Moscow, Energiya 1, 1979. 359 p. (in Russian).
- 11 Baev I.A., Solovieva I.A., Dzyuba A.P. Introducing a model of price-dependent demand management for electricity consumption in industry. Manager. 2018. vol. 9. no. 6. pp. 111–121. doi: 10.29141/2218-5003-2018-9-6-11 (in Russian).

Сведения об авторах

Анатолий П. Дзюба к.э.н., ст. науч. сотрудник, кафедра финансов, денежного обращения и кредита, Южно-Уральский государственный университет, пр-т Ленина, 76, г. Челябинск, 454080, Россия, dzyuba-a@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-6319-1316>

Information about authors

Anatoly P. Dzyuba Cand. Sci. (Econ.), senior researcher, finance, money circulation and credit department, South-Ural State University, Lenin Av., 76, Chelyabinsk, 454080, Russia, dzyuba-a@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-6319-1316>

Вклад авторов

Анатолий П. Дзюба написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Contribution

Anatoly P. Dzyuba wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 15/09/2019	После редакции 14/11/2019	Принята в печать 12/01/2020
Received 15/09/2019	Accepted in revised 14/11/2019	Accepted 12/01/2020