

УДК 338.45:621.31
doi:10.35853/vestnik.gu.2023.4(43).12
5.2.3

Модель выравнивания суточного графика нагрузки потребителями электроэнергии

Михаил Борисович Петров¹, Константин Борисович Кожов²

^{1,2}ФГБУН Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

¹petrov.mb@uiec.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3043-6302>

²kozlov.kb@uiec.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3694-564X>

Аннотация. Одним из отличительных свойств электроэнергетических систем является одновременность производства и потребления электроэнергии и, следовательно, сохранение баланса электрической мощности в любой момент времени. При этом потребляемая мощность зависит от интенсивности и временного распределения производственно-хозяйственной деятельности, которой присуща суточная неравномерность с утренним и вечерним максимумом. Эта особенность процесса потребления энергии существенно удорожает саму энергию, повышая тем самым энергетическую нагрузку на экономику. В статье предложено концептуальное обоснование и методический аппарат сглаживания неравномерности суточного графика электрической нагрузки для отдельного и агрегированного потребителя электроэнергии, проиллюстрирована коммерческая эффективность вложений в организационно-экономические и инновационно-технические мероприятия по сглаживанию на основе оперативно меняющихся цен оптового рынка электроэнергии. Введено понятие и инструментарий квантования экономии на электроэнергии с использованием единичной ячейки. Дана оценка эффекта при появлении в настоящее время новых технологических способов выравнивания графиков в масштабах объединенной энергосистемы Урала.

Ключевые слова: электропотребление, электрическая нагрузка потребителя, суточный график, оптовые цены электроэнергии, единичная ячейка

Благодарности: статья подготовлена в соответствии с утвержденным планом НИР Института экономики УрО РАН на 2023 год.

Для цитирования: Петров М. Б., Кожов К. Б. Модель выравнивания суточного графика нагрузки потребителями электроэнергии // Вестник Гуманитарного университета. 2023. № 4 (43). С. 124–134. DOI 10.35853/vestnik.gu.2023.4(43).12.

A Model for the Balancing of the Daily Load Plan by the Consumers of Electricity

Mikhail B. Petrov¹, Konstantin B. Kozhov²

^{1,2}Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

¹petrov.mb@uiec.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3043-6302>

²kozlov.kb@uiec.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3694-564X>

Abstract. The simultaneous production and consumption of electricity, and thus the maintenance of an electrical energy balance at any given time, is one of the characteristics of electrical power systems. At the same time, the power consumption depends on the intensity and time distribution of production and economic activity, which is characterized by a daily unevenness with a morning and evening maximum. This feature of the energy consumption

process significantly increases the cost of energy itself, thereby increasing the energy burden on the economy. The article offers a conceptual justification and methodological apparatus for smoothing the unevenness of the daily schedule of electrical load for an individual and aggregated consumer of electricity, illustrates the commercial effectiveness of investments in organizational, economic, innovative and technical measures for smoothing on the basis of rapidly changing prices of the wholesale electricity market. The concept and tools of quantification of energy savings by means of a single cell are presented. An estimation of the impact of the appearance of new technological methods of schedule adjustment on the scale of the Urals Unified Energy System is given.

Keywords: power consumption, electrical load of the consumer, daily schedule, wholesale electricity prices, single cell

Acknowledgments: the article was prepared in accordance with the approved research plan of the Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences for 2023.

Введение

Одним из фундаментальных ограничений традиционных рынков электроэнергии является неэластичность спроса, когда потребление электроэнергии практически не зависит от цен на рынке. При этом рынок электроэнергии – это «рынок продавца», где, несмотря на возможности сильного госрегулирования, цена зависит практически целиком от поставщиков. Потребители электроэнергии обычно никак не участвуют в процессах ценового регулирования, а лишь учитывают цены при выборе решений по электроемким технологиям и эксплуатации собственных энергоисточников. Однако и они обладают некоторым потенциалом воздействия на графики нагрузки, а отказ от использования этого потенциала негативно сказывается на ситуации в отрасли и приводит к дополнительному росту цен на электроэнергию [Обоснование развития электроэнергетических систем ... 2015; Петров, Серков, Кожов 2021]. Включение потребителей в процессы регулирования графика означает рост ценовой эластичности электроэнергии и дает два важных энергоэкономических последствия – балансовое и режимное. Первое состоит в снижении суточного максимума нагрузки – в аспекте выравнивания суточного графика оно достигается путем переноса потребления энергии из пиковой зоны в базисную. Режимное последствие состоит в улучшении режима работы электростанций, когда снижаются относительная потребность в дорогостоящих пиковых источниках и глубина суточных колебаний нагрузки на базисных генерирующих мощностях.

Проблема выравнивания графика электрических нагрузок в рамках процесса управления спросом на электроэнергию с целью повышения эффективности работы производителей и потребителей электроэнергии весьма актуальна и является предметом научного интереса многих исследователей.

Научный обзор и предлагаемый подход

Проблемой технико-экономического управления спросом, направленного на выравнивание графиков электрической нагрузки в условиях рыночного ценообразования на электроэнергию, занимается целый ряд современных научных школ экономистов и энергетиков. Так, научный коллектив Л. Д. Гительмана с сотрудниками изучает проблему применения концепции управления спросом на электроэнергию с позиций решения инвестиционной проблемы региональных систем энергетики. В его статье [Гительман, Ратников, Кожевников 2013] проанализированы институциональные и ментальные барьеры, мешающие введению широкой практики управления спросом в отечественной электроэнергетике и предложены мотивационные мероприятия, основанные на административном принуждении и экономическом стимулировании производителей и потребителей электроэнергии для скорейшего внедрения программ управления спросом в регионе.

В трудах А. П. Дзюбы показано, что «одним из инновационных направлений перспективного развития электроэнергетических комплексов стран мира являются технологии умных сетей электроснабжения» [Дзюба 2020], основанные на системах промышленных накопителей электроэнергии, которые используются совместно с возобновляемыми источниками электроэнергии. Определена тенденция увеличения эффекта снижения цен на электроэнергию при снижении уровня напряжения в энергокомплексах с применением систем накопителей электроэнергии.

В работах Сибирского энергетического института [Гальперова 2016; Мазурова, Гальперова, Локтионов 2022] применены «агентные модели активного потребителя» к задачам прогнозирования электропотребления. Активный потребитель стремится оптимизировать свое электропотребление путем изменения его объемов и, соответственно, минимизации расходов. Предполагается, что это позволит существенно расширить круг таких субъектов, а наличие таковых – значимо, в том числе и при долгосрочном прогнозировании.

В этих и других работах исследуются преимущественно общесистемные аспекты проблемы на основе укрупненных показателей управления спросом на электроэнергию. Однако высокая и существенно колеблюмая цена электроэнергии по регионам, а также расширение технических возможностей регулирования вызывают дальнейший интерес к этим исследованиям в направлении более подробного изучения суточных графиков электрической нагрузки не только региональных энергосистем, но и отдельных категорий потребителей, отдельных потребителей на предмет поиска механизмов выравнивания графиков электрической нагрузки на основе их моделирования.

Исходя из вышесказанного, в качестве цели данной публикации принята разработка методического подхода и модели выравнивания суточного графика электрических нагрузок для системы потребителей электроэнергии любого локального уровня с использованием всего арсенала возможностей переноса пиковой нагрузки во внепиковую зону.

Основные возможности участия потребителей в управлении спросом на данном этапе видятся в смещении некоторой части электрической мощности потребителя на периоды более низких цен во внепиковую зону, при этом интегральные значения потребления электроэнергии не снижаются.

Создание механизма управления спросом должно начинаться с оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ), но потенциал регулирования графиков на ОРЭМ ограничен, в том числе ввиду тенденции к сокращению доли мощности энергосистемы, регулируемой там. На розничном рынке, где работает большая часть предприятий по закупкам электроэнергии, тоже мало что меняется в вопросах выравнивания суточных графиков. На сегодняшний день в РФ практически отсутствуют нормативные, организационные и технические решения в этой области, которые позволили бы сравнительно небольшой ресурс управления розничного потребителя состыковать с предъявляемыми требованиями оптового рынка, не неся при этом значительных издержек на взаимодействие с системным оператором, но транслируя экономический эффект от снижения нагрузки на оптовом рынке к розничному потребителю. Высокие затраты, дороговизна электроэнергии и системные ограничения в странах ОЭСР уже в 70-х годах привели эти государства к необходимости разработки таких программ для сокращения энергозатрат на коммунальных предприятиях. Впоследствии появились международные программы по развитию технологий «demand-side management или DSM» [World Energy Balances ... 2017]. В результате возникли в качестве особого рыночного субъекта агрегаторы нагрузки, которые, являясь участниками оптового рынка электроэнергии, могут управлять изменением нагрузки не одного, а целой группы потребителей и продавать в качестве товара на рынке системных услуг всю совокупность регулировочных способностей этих потребителей как единый объект. Агрегатор принимает сигналы на изменение потребления в виде графиков нагрузки от инфраструктурных организаций в соответствии с требованиями оптового рынка и, распределяя между по-

требителями, координирует оказание им услуг в рамках требований по обеспечению системной надежности, выставляемых системным оператором. При этом управление спросом осуществляется на основании использования дифференцированных по времени тарифов на электроэнергию. Учет оптовым рынком экономического эффекта от снижения рабочей мощности потребителей обеспечивается информационным взаимодействием системного и коммерческого операторов. Агрегатор получает на рынке электроэнергии и мощности оплату за снижение пиковой мощности и оплачивает услуги всех потребителей из группы соответственно их вкладу [Дзюба 2021].

В России роль такого агрегатора мог бы в перспективе выполнять гарантирующий поставщик. На период перехода к такому положению взять на себя такую роль могли бы отдельные сбытовые компании. Предпосылкой к этому является наличие в одном узле разнородных, в том числе инновационных, потребителей электрической энергии [Torrìti 2015; Гашо, Чехранова 2023]. Разработка и реализация программы управления спросом на потребление электроэнергии в России требует учета индивидуальной специфики параметров, связанных с электропотреблением, как в масштабах всей энергосистемы страны, так и на уровне региональных энергосистем и энергосистем территориальных образований. При этом необходимо отметить, что для решения энергоэкономических проблем возрастают возможности информационно-измерительных технологий в сфере коммерческого учета энергии (передача данных, цифровизация измерительных трансформаторов, BigData, интернет вещей, Smart-технологии). Тем самым объективно возрастает и запрос на инструментальное моделирование в этой сфере [Баев, Соловьева, Дзюба 2018].

Механизм управления спросом повышает эффективность электропотребления не только у потребителей, но и для энергосистемы за счет снижения выработки электроэнергии электростанциями с наиболее высокой себестоимостью отпущенной электроэнергии. Электроэнергия, не потребленная в пиковые часы, будет использована в другие часы, при этом для ее производства будут задействованы более экономичные генерирующие мощности, чем те, которые были бы загружены в пиковые часы. А значит, выравнивание графиков, улучшая экономику потребления электроэнергии, не противоречит системным интересам. Управление спросом на потребление электрической энергии представляет собой инициативную форму экономического взаимодействия между электроэнергетической системой и потребителями электроэнергии в части искусственного выравнивания графиков электрической нагрузки на уровне энергосистемы с целью снижения предельных издержек на покрытие пиков неравномерности спроса и тарифов на поставку электроэнергии всем потребителям, действующим в рамках электроэнергетической системы.

Ключевым и наиболее перспективным техническим средством выравнивания графиков нагрузки станут в ближайшем будущем промышленные накопители электроэнергии – сначала электрохимические, а затем и основанные на новых физических принципах (сверхпроводящие индукционные и другие). Их разработки успешно ведутся в России. С переходом к их массовому производству сложатся технико-экономические условия развития активно-адаптивных систем электроснабжения достаточно большой мощности, значимой для ценового управления спросом на электрическую энергию за счет возможности ее хранения [Кобец, Волкова 2010]. Накопители работают как потребители электроэнергии в часы минимальных нагрузок и как источники дополнительной мощности в часы высоких нагрузок, выравнивая суточный график. Технологии промышленного хранения электроэнергии позволят аккумулировать значительные объемы электроэнергии, вырабатываемой в часы низкой суточной нагрузки, для ее выдачи в сеть в часы повышенных нагрузок (суточных максимумов) [Litjens, van Sark, Worrell 2016]. В зависимости от масштаба применения накопительных технологий эти устройства могут быть подключены либо на объектах централизованного электроснабжения на питающих подстанциях энергосистемы (накопители системного назначения), либо непосредственно у потребителя, экономически заинтересованного в

выравнивании суточного графика, а также в групповых объединениях таких потребителей [Дзюба 2020].

Суточные графики электрических нагрузок для различных региональных энергосистем имеют сильно отличающиеся показатели плотности и неравномерности графика, что в значительной степени влияет на энергетические затраты в этих системах. Сокращение потребностей в дорогостоящих маневренных генерирующих мощностях за счет использования потребителей-регуляторов позволит снизить издержки на производство и передачу электрической энергии. Поэтому предприятия, осуществляющие перенос нагрузки из пиковой зоны на ночные часы суточного графика, должны стимулироваться при оплате электроэнергии в рамках их участия в программах управления спросом [Малыш, Матюнина 2023].

Так как при реализации стратегий DSM на региональном уровне должно быть учтено множество факторов, таких как суммарный объем потребления электроэнергии, структура спроса на электроэнергию у различных потребителей, структура выработки электроэнергии, структура покрытия неравномерности спроса на электропотребление, характеристики неравномерности электропотребления, механизмы управления спросом должны постоянно совершенствоваться с целью повышения их результативности и снижения трудоемкости при осуществлении.

Модель и ее оценка

Информационной основой проведенного исследования является официальная статистика Росстата и данные ведомственных организаций. В статье использовался ряд данных за 2020 год в разрезе 24 часов суточного графика.

Модель выравнивания суточного графика предлагается формировать и оценивать по алгоритму, показанному на рисунке 1. Программная реализация алгоритма выполнена средствами языка Python. С ее помощью автоматизированы процессы загрузки и подготовки исходных данных с учетом параметров расчетов, расчет нагрузочных и ценовых показателей суточных графиков, вывод результатов расчетов. Итоговую информацию пользователь получает (в системе электронных таблиц MS Office Excel) в виде различных таблиц и графиков.

На рисунке 2 совмещены реальный суточный график с соответствующим ему полностью выровненным при том же значении электропотребления (горизонтальная линия). В этом случае нагрузка в течение суток была бы постоянной, равной среднесуточной ($P_{ср}$).

Построенная на графике (рис. 2) вертикальная линия $t_{ср}$ (вертикальная линия на рисунке) обозначает пересечение реального графика и $P_{ср}$.

Для переноса нагрузок из пиковой зоны графика в базовую в разработанном алгоритме задействована так называемая «единичная ячейка», которая представляет собой прямоугольник (ячейку), у которого сторона по оси мощности нагрузки равна 1 МВт, сторона по оси времени суток – 1 час. С учетом этого пиковая и базовая зоны (рис. 2) разбиваются на эти единичные ячейки и определяется количество ячеек в каждой из рассматриваемых зон графика. Нумерация ячеек пиковой зоны проводится по правилу сверху вниз и слева направо. Ячейки соответствуют единичному электропотреблению, которое в зависимости от реального времени суток имеет соответствующие ценовые показатели.

Например, имеются пиковые ячейки $П1(10;1)$, где $P_i^{пч} = 1$ МВт, $P_j^{пч} = 1$ -й час суток в отсортированном по убыванию графике и ячейки $П2(9;1)$, $П3(9;2)$, тогда в соответствии с записанным правилом ячейка $П1$ имеет номер 1, $П2$ – номер 2, $П3$ – номер 3. Нумерация ячеек базовой зоны (Б) проводится снизу вверх и справа налево. Каждой ячейке пиковой зоны соответствует ячейка с таким же номером в базовой зоне, и на каждом шаге выравнивания графика происходит переход одной пиковой ячейки в аналогичную базовую. Процесс полного выравнивания графика завершается, когда все участвующие в расчетах ячейки перейдут из пиковой в базовую зону.

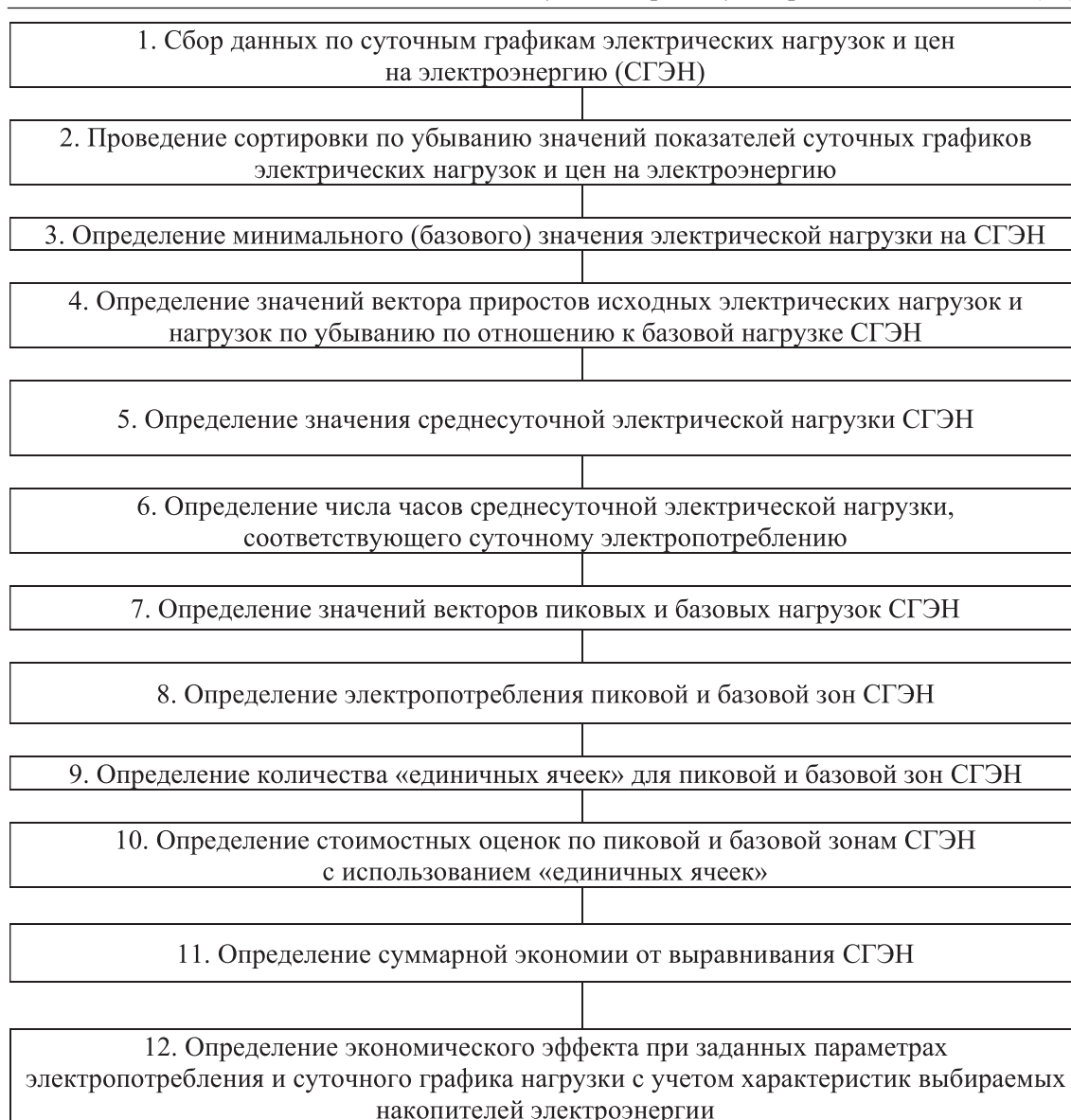


Рис. 1. Блок-схема определения экономического эффекта от ячеистого выравнивания суточного графика электрических нагрузок (СГЭН) (составлено авторами)

Экономия на расходах на электроэнергию у потребителя (EF_m) для ячейки m состоит:

$$EF_m = CЭ_m^{\text{пик}} - CЭ_m^{\text{баз}}, \quad (1)$$

где $CЭ_m^{\text{пик}}$ – стоимость электроэнергии пиковой зоны для ячейки m ;

$CЭ_m^{\text{баз}}$ – стоимость электроэнергии базовой зоны для ячейки m .

Суммарная экономия для потребителя по всем суточным графикам за год рассчитывается суммированием нарастающим итогом экономии расходов на электроэнергию по этим графикам, что является экономической оценкой результата от процедуры выравнивания годового графика в виде экономии на покупаемой потребителем электрической энергии. Предложенный алгоритм может применяться к суточному графику любой формы, поскольку предполагает преобразование его к монотонно убывающему виду.

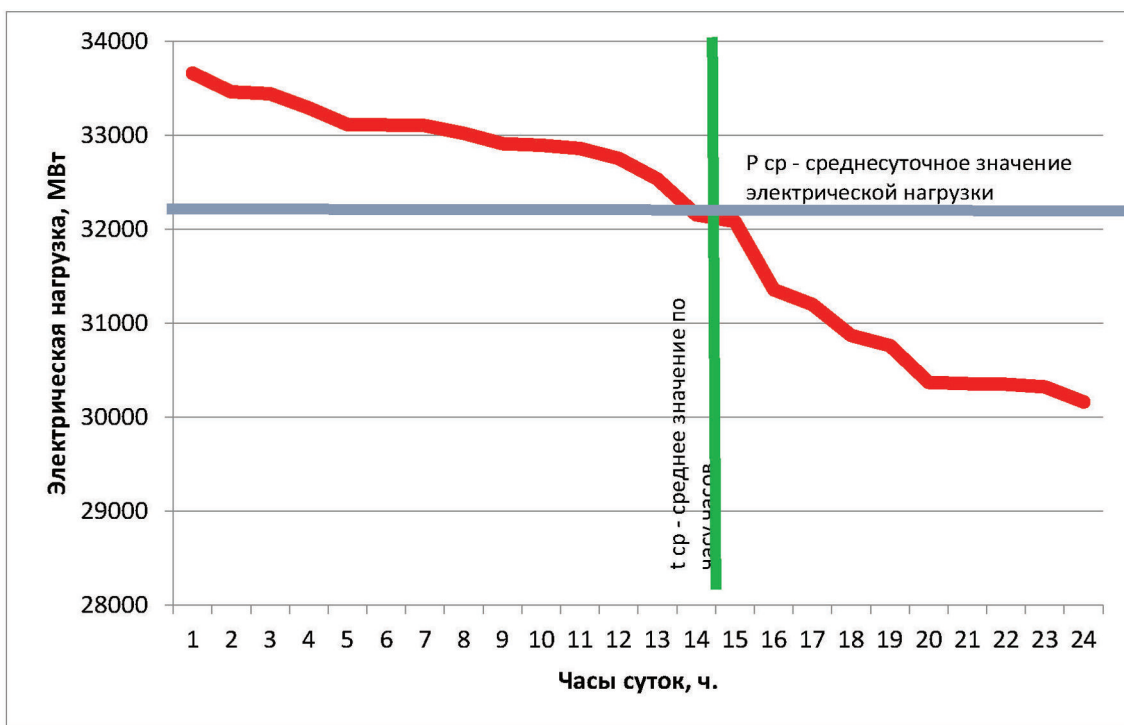


Рис. 2. Суточный график электрической нагрузки ОЭС Урала, преобразованный в монотонно убывающий (по состоянию на 01.02.2020) (составлено авторами по исходным данным АО «Системный оператор ЕЭС России»)

В экспериментальных расчетах использовался плановый совмещенный график нагрузки ОЭС Урала по часам суток, МВт (рис. 3) и цена электроэнергии первой ценовой зоны, руб./МВт. ч (рис. 4) на 01.02.2020 г.

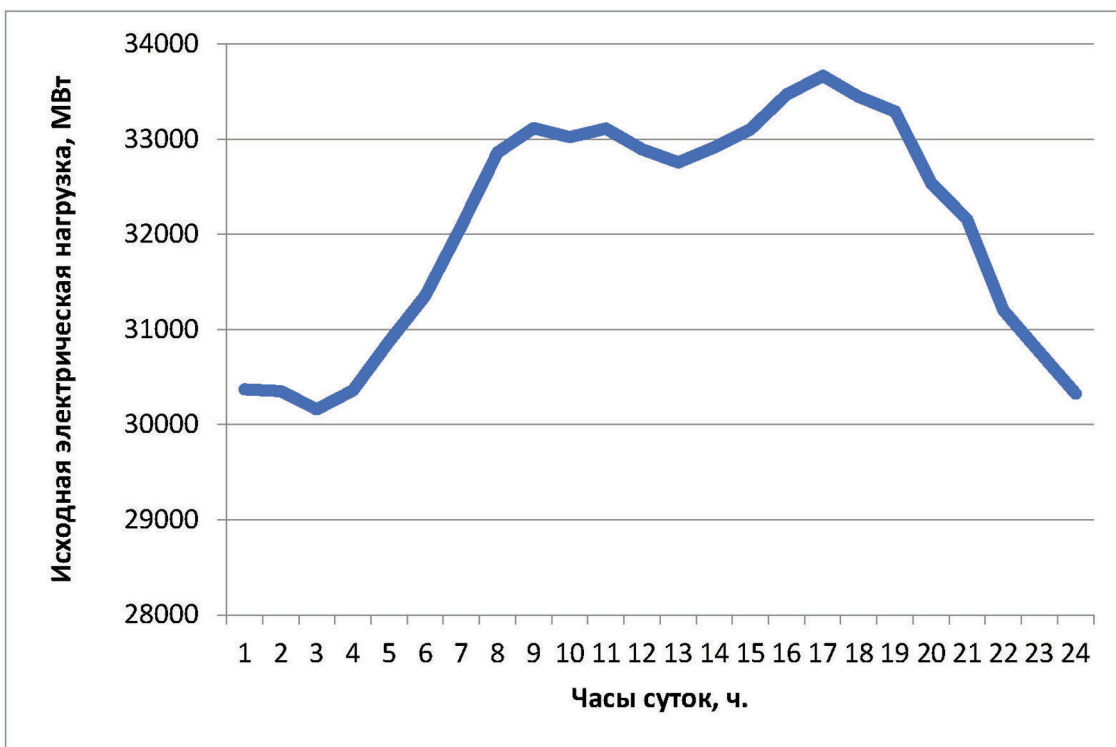


Рис. 3. Суточный график электрических нагрузок по ОЭС Урала (по состоянию на 01.02.2020). Источник: официальный сайт Системного оператора ЕЭС России. URL: https://www.soups.ru/index.php?id=972&tx_ms1cdu_pi1%5Bkpo%5D=630000&tx_ms1cdu_pi1%5Bdt%5D=08.02.2020

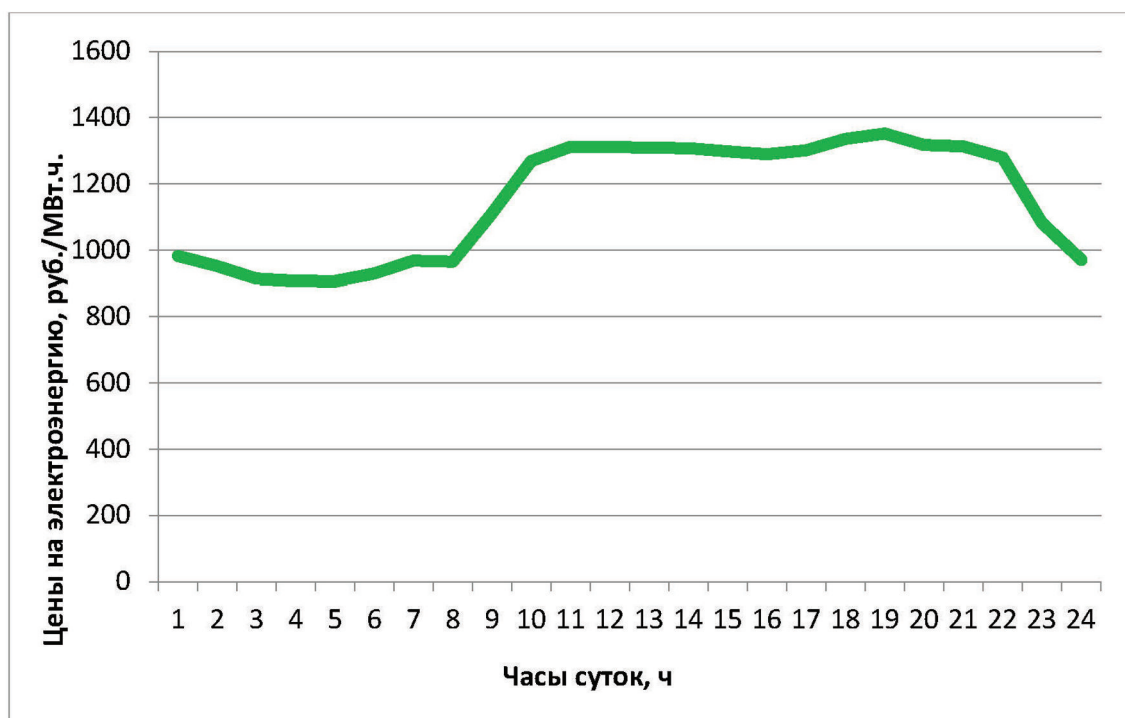


Рис. 4. Суточный график цен на электроэнергию по ОЭС Урала (по состоянию на 01.02.2020).
 Источник: официальный сайт Системного оператора ЕЭС России. URL: https://www.soups.ru/index.php?id=972&tx_ms1cdu_pi1%5Bkpo%5D=630000&tx_ms1cdu_pi1%5Bdt%5D=08.02.2020

Затраты на эти мероприятия включают текущие расходы преимущественно организационного характера (они незначительны) и затраты инвестиционные, зависящие от выбранного технического способа выравнивания графика, мощности и емкости накопителей энергии, инвестиционной схемы, стоимости инвестиционных ресурсов, в которых могут быть учтены обоснованные преференции, учитывающие системное значение мероприятия. Тестовый расчет был проведен на основе оптовых цен конкретных отчетных суток 01.02.2020 г. (рис. 4).

Экономическая отдача от мероприятий по выравниванию СГЭН приобретает системный характер и начинает отражать эмерджентность больших систем энергетики, если такие мероприятия проводятся в масштабах объединенной энергосистемы. Так, возможная установка в ОЭС Урала накопителя электроэнергии установленной электрической мощностью 500 МВт позволит обеспечить выравнивание совокупного СГЭН с суточным максимумом 33 167 МВт. Уровень рабочей мощности такого системного накопителя говорит и о степени переноса нагрузки совокупности потребителей энергосистемы из пиковой зоны в полупиковую, а из полупиковой в базисную. По мере ее нарастания растет и суточный экономический эффект выравнивания СГЭН, причем наиболее интенсивное нарастание эффекта происходит в диапазоне рабочей мощности накопителя до 300 МВт. Зависимость эффекта от рабочей мощности системного накопителя в ОЭС Урала представлена на рисунке 5. При полном использовании установленной мощности системного накопителя в зимний рабочий день эффект составлял бы 451 416 рублей. Эта оценка получена в условиях оптовых цен на электроэнергию и параметрах СГЭН по состоянию на 01.02.2020 года.



Рис. 5. Зависимость экономии на закупках электроэнергии от переносимой нагрузки (рассчитано авторами на основе данных, представленных на рис. 3 и 4)

Обсуждение и выводы

Формирование и развитие больших электроэнергетических систем с самого начала и по настоящее время отмечено ростом единичной и относительной мощности крупных энергоблоков, где себестоимость производимой электроэнергии снижается при росте числа часов использования установленной мощности, то есть при работе энергоблока в базисном режиме. Эта тенденция только усиливается при снижении степени физического износа энергогенерирующего оборудования путем демонтажа наиболее старых агрегатов, возможности которого возросли в условиях относительно медленного роста совокупного электропотребления страны и регионов на фоне накопленных ранее резервов установленной генерирующей мощности. Демонтажу, в первую очередь, подлежат маневренные агрегаты мощностью 50–200 МВт. На смену сравнительно небольшим по современным меркам турбоагрегатам внедряются крупные энергоблоки, в первую очередь, атомные единичной мощностью 1 000 МВт, пылеугольные – 660 МВт, парогазовые – 420 МВт. В результате в энергосистемах при нагрузках, составляющих, например, лишь половину от номинальной, удельный расход топлива может возрасти на 16–26 г/кВт. ч.

Таким образом, для обновляемой структуры энергетики выравнивание суточных графиков электропотребления становится только важнее, поскольку оно выступает одной из предпосылок оптимизации энергетических режимов и возможности снижения цен электроэнергии. Вследствие этого включение в электроэнергетическую систему накопителей, позволяющих разделить во времени процессы выработки и потребления энергии (и поддержания при этом их высокого коэффициента использования установленной мощности и КПД), имеет большое народно-хозяйственное значение [Бушуев, Новиков 2020].

Предложенный здесь подход и инструмент, позволяющий выполнять модельные исследования на суточном графике электрической нагрузки индивидуальных и групповых потребителей энергосистемы в задачах управления спросом на электроэнергию, предполагает три этапа:

- приведение графика к монотонно убывающему виду;
- перенос мощности потребления из пиковой во внепиковую зону для обоснования рациональных масштабов регулирования спроса на электроэнергию;

– разработка и экономическое обоснование мероприятий для реализации такого переноса путем определения организационных инструментов и (или) технических способов накопления электроэнергии в часы с низкой ценой на нее для расходования в пиковые часы.

Окупаемость таких мероприятий и достижение чистого экономического эффекта осуществимо за счет снижения расходов на закупку электроэнергии на оптовом или розничном рынке. Такой подход позволяет вести мониторинг процесса на основе приростного выигрыша каждого дополнительного шага по выравниванию графика электрических нагрузок, поскольку он основан на квантовании экономии с помощью единичных ячеек графика.

Дальнейшей проработки требуют комплексные аспекты регулирования графиков электрических нагрузок – в разрезе не только суток, но и дней недели, сезонов года, отраслевых, территориальных и корпоративных агрегатов потребления. Радикальные решения с системным эффектом удешевления отпускаемой электроэнергии со стороны территориальных энергосистем станут возможными на основе промышленного освоения технологий разделения во времени процессов получения и использования электрической энергии с применением мощных накопителей.

Список источников

- Баев И. А., Соловьева И. А., Дзюба А. П. Управление спросом на поставку энергоресурсов в условиях развития информационно-коммуникационных технологий // Известия Уральского государственного экономического университета. 2018. Т. 19, № 3. С. 111–125. DOI 10.29141/2073-1019-2018-19-3-10.
- Бушуев В. В., Новиков Н. Л. Инфраструктурные накопители в энергетике // Энергетическая политика. 2020. № 10 (152). С. 74–89. DOI 10.46920/2409-5516_2020_10152_74.
- Гальперова Е. В. Методический подход к долгосрочному прогнозированию рыночного спроса на топливо и энергию с учетом региональных особенностей и роста неопределенности // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 5. С. 33–44.
- Гапо Е. Г., Чехранова О. А. Оценка динамики и изменения пропорций топливно-энергетического баланса РФ // Промышленная энергетика. 2023. № 4. С. 2–9. DOI 10.34831/EP.2023.57.25.005.
- Гительман Л. Д., Ратников Б. Е., Кожевников М. В. Управление спросом на энергию в регионе // Экономика региона. 2013. № 2 (34). С. 71–84.
- Дзюба А. П. Влияние формы графиков электрических нагрузок потребителей на эффективность ценозависимого управления на основе систем накопителей электроэнергии // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82, № 1 (83). С. 291–303. DOI 10.20914/2310-1202-2020-1-291-303.
- Дзюба А. П. Обзор программ управления спросом на потребление электроэнергии стран мира // Менеджмент социальных и экономических систем. 2021. № 3 (23). С. 5–11.
- Кобец Б. Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SMART GRID : монография. М. : ИАЦ Энергия, 2010. 208 с.
- Мазурова О. В., Гальперова Е. В., Локтионов В. И. Перспективная оценка спроса на электроэнергию в РФ и регионах с учетом углубленной электрификации // Экономика региона. 2022. Т. 18, вып. 2. С. 528–541. DOI 10.17059/ekon.reg.2022-2-16.
- Малыш М. Е., Матюнина Ю. В. Оценка эффективности переноса нагрузки предприятия на ночные часы с использованием кластерного анализа // Промышленная энергетика. 2023. № 3. С. 38–44. DOI 10.34831/EP.2023.96.43.005.
- Обоснование развития электроэнергетических систем: методология, модели, методы, их использование / Н. И. Воропай, С. В. Подковальников, В. В. Труфанов и др. ; отв. ред. Н. И. Воропай. Новосибирск : Наука, 2015. 448 с.
- Петров М. Б., Серков Л. А., Кожов К. Б. Анализ пространственных особенностей регионального электропотребления в РФ // Прикладная эконометрика. 2021. № 1 (61). С. 5–27. DOI 10.22394/1993-7601-2021-61-5-27.

Litjens G., van Sark W., Worrell E. On the influence of electricity demand patterns, battery storage and PV system design on PV self-consumption and grid interaction // 2016 IEEE 43th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). Portland, OR, USA, 2016. P. 2021–2024. DOI 10.1109/PVSC.2016.7749983.

Torrìti J. Peak Energy Demand and Demand Side Response. London : Routledge, 2015. 188 p.

World Energy Balances 2017 IEA. Report of International Energy Agency. 747 p. URL: <http://data.iaea.org/> (access date: 31.05.2021).

Информация об авторах

Михаил Борисович Петров, д-р техн. наук, руководитель Центра развития и размещения производительных сил Института экономики УрО РАН (Екатеринбург, Россия).

Константин Борисович Кожов, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института экономики УрО РАН (Екатеринбург, Россия).

Information about the authors

Mikhail B. Petrov, Dr. Sci. (Engineering), Head of the Centre for the Development and Distribution of Production Forces, Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Yekaterinburg, Russia).

Konstantin B. Kozhov, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Yekaterinburg, Russia).

Статья поступила в редакцию | The article was submitted 01.10.2023.

Одобрена после рецензирования | Approved after reviewing 17.10.2023.