

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Администрация Правительства Кузбасса
Администрация г. Новокузнецка
Институт проблем управления им. Трапезникова РАН
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
АНО «Научно-образовательный центр «Кузбасс»

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ
(в образовании, науке и производстве)
AS' 2022

ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО–ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ
(с международным участием)

15-16 декабря 2022 г.

Новокузнецк
2022

УДК 658.011.56
С 409

Редакционная коллегия:

д.т.н., проф. В.В. Зимин (ответственный редактор),
д.т.н., проф. С.М. Кулаков, д.т.н., проф. В.Ю. Островляничик,
д.т.н., проф. Л.Д. Павлова, д.т.н., доц. И.А. Рыбенко,
к.т.н., доц. В.И. Кожемяченко (технический редактор).

С 409 Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2022: труды Всероссийской научно–практической конференции (с международным участием), 15-16 декабря 2022 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский государственный индустриальный университет ; под общ. ред. В.В. Зимина. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2022. – 632 с.

ISBN 978-5-7806-0583-6

Труды конференции посвящены научным и практическим вопросам в области современных систем автоматизации и информатизации учебных, исследовательских и производственных процессов. Представлены результаты исследования, разработки и внедрения методического, математического, программного, технического и организационного обеспечения систем автоматизации и информационно-управляющих систем в различных сферах деятельности.

Сборник трудов ориентирован на широкий круг исследователей, научных работников, инженерно-технический персонал предприятий и научно-исследовательских лабораторий, преподавателей вузов, аспирантов и обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры.

УДК 658.011.56

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2022

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА
СНИЖЕНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГОПРИНИМАЮЩИХ УСТРОЙСТВ В
ПРОЕКТЕ УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ**

Городнов Я.А., Кузнецова Е.С.,

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, igorodnov96@gmail.com

Аннотация. Исследованы методы определения и контроля снижения объема потребления электроэнергии энергопринимающими устройствами в дни событий по снижению потребления в рамках проекта по управлению спросом. Приведены примеры определения оптимального метода в зависимости от графика и объема нагрузки потребителя электроэнергии. Приведены выводы по применимости методов к различным потребителям.

Ключевые слова: управление спросом на электроэнергию, методы определения объема снижения потребления, методы контроля, график базовой нагрузки, заявленный график нагрузки, максимальная базовая нагрузка.

Abstract. The methods of determining and controlling the reduction in the volume of electricity consumption by energy receiving devices during the days of events to reduce consumption within the framework of the demand management project are investigated. Examples of determining the optimal method depending on the schedule and the amount of load of the electricity consumer are given. Conclusions on the applicability of the methods to various consumers are presented.

Keywords: electricity demand management, methods for determining the volume of consumption reduction, control methods, base load schedule, declared load schedule, maximum base load.

Возможность потребителей влиять на спрос – ключевая черта любого эффективно функционирующего конкурентного рынка. Это утверждение справедливо для любого рынка, и рынок электроэнергии не исключение. Особые свойства электроэнергии как товара (одновременность производства и потребления, невозможность создания складских запасов или замены другим товаром) привели к тому, что исторически потребители не имели практической возможности влиять на баланс спроса и предложения, а, следовательно, и на цены на рынке. Потребители электроэнергии не уменьшают потребление при росте цены на электроэнергию. В условиях такой неэластичности спроса активной стороной, полностью определяющей цену электроэнергии, выступают производители.

Благодаря современным тенденциям в электроэнергетике, появлению цифровых интервальных приборов учета электроэнергии, развитию телекоммуникаций и «интеллектуальных сетей» появилась возможность повышения эластичности рынка электроэнергии и привели к появлению концепции demand response (управление спросом).

Таким образом, в 2017 году в России был запущен пилотный проект по управлению спросом на электроэнергию для потребителей – участников оптового рынка, а в июне 2019 года, согласно постановлению Правительства РФ № 287 от 20.03.2019г, стартовал пилотный проект по формированию механизма управления спросом розничных потребителей. Данный проект включен в стратегию энергетического развития Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ.

Управление спросом, являясь новым источником гибкости в энергосистеме, конкурирует как с наименее эффективной и наиболее дорогой частью действующей генерации, так и с инвестициями в новую генерацию и сетевые объекты, снижая потребность в них. Цели внедрения механизмов управления спросом можно разделить по времени проявления эффектов:

– в краткосрочной перспективе это уменьшение затрат потребителей на энергообеспечение за счет более эффективного балансирования на рынках электроэнергии и снижения цен на РСВ;

- в среднесрочной перспективе это вывод из эксплуатации неэффективного энергооборудования, замещенного в рамках реализации программ по управлению спросом;
- в долгосрочной перспективе это временный отказ от строительства генерации или сетевого оборудования в энергорайонах быстрого роста спроса, территориальных, топливных, режимных или стоимостных ограничений на ввод новых энерго мощностей.

Основными участниками проекта управления спросом являются:

- системный оператор - осуществляет централизованное оперативно-диспетчерское управление Единой энергетической системой России;
- агрегатор управления спросом - специализированные организации, координирующие способность группы розничных потребителей управлять своим электропотреблением;
- потребители розничного рынка.

Системный оператор	Агрегатор управления спросом
■ Проводит конкурентные отборы агрегаторов управления спросом и заключает с ними договоры оказания услуг ■ Получает уведомления от агрегаторов о готовности потребителей к разгрузке на предстоящие сутки ■ Взаимодействует с инфраструктурой ОРЭ для учета объемов разгрузки в расчетных системах РСВ ■ Уведомляет агрегаторов о востребованности разгрузки в конкретный час ■ Контролирует исполнение обязательств агрегатора по снижению потребления	■ Формирует агрегированные объекты управления – ищет потребителей, имеющих техническую возможность перераспределения потребления внутри суток и экономическую заинтересованность в оказании услуг ■ Представляет консолидированных потребителей при взаимодействии с инфраструктурой оптового рынка ■ Распределяет долевое участие в разгрузке в конкретный час между конечными потребителями, входящими в объект агрегированного управления ■ Контролирует исполнение обязательств со стороны потребителей и организует финансовые расчеты
Потребитель розничного рынка ■ Выбирает агрегатора управления спросом и заключает договор оказания услуг ■ Совместно с агрегатором управления спросом оценивает технологические возможности по разгрузке и формирует оптимальный сценарий участия в управлении спросом ■ Уведомляет агрегатора о готовности к разгрузке в конкретные сутки ■ Исполняет обязательства по снижению потребления ■ Получает плату за оказанные услуги	

Рисунок 1 – Основные функции участников проекта управления спросом на электроэнергию

Модель взаимодействия субъектов проекта выглядит следующим образом:

1. потребитель заключает договор оказания услуг по изменению нагрузки с агрегатором управления спросом;

2. имея договор с потребителем, агрегатор получает возможность принять участие в конкурентном отборе исполнителей услуг по управлению спросом. Организатором конкурентного отбора является Системный оператор;
3. в случае успешного прохождения конкурентного отбора агрегатор заключает с Системным оператором договор оказания услуг по управлению спросом.

Согласно условиям проекта количество необходимых разгрузок энергопотребляемого оборудования в месяц может варьироваться от 1 до 5. Продолжительность разгрузки – 2 или 4 часа подряд по выбору агрегатора (с учетом возможностей конечного потребителя). Объем снижения потребления также заявляется агрегатором управления спросом, и также исходя из возможностей потребителя к снижению потребления.

В рамках реализации услуг по управлению спросом применяются различные методы контроля исполнения и оценки показателя участия в снижении потребления. Согласно стандартам «NAESB Business Practice Standards for Measurement and Verification for demand response» к методам контроля исполнения событий по снижению энергопотребления предъявляются такие требования как: точность, гибкость, простота, воспроизводимость.



Рисунок 2 – Модель взаимодействия субъектов проекта по управлению спросом

Для оценки эффективности участия потребителя в проекте по управлению спросом и расчета денежного вознаграждения за выполнение задания Системного оператора на снижение нагрузки необходимо качественно определить объем фактического снижения потребления энергопринимающих устройств в требуемые часы относительно теоретической нагрузки, которая, имела бы место при отсутствии события управления спросом.

Для этих целей применяются три основных метода:

1. график базовой нагрузки;
2. заявленный график;
3. максимальная базовая нагрузка.

Все эти методы в качестве информации о фактическом потреблении используют данные коммерческого учета электроэнергии. Методы графика базовой нагрузки и максимальной базовой нагрузки также применяют данные коммерческого учета как источник информации о теоретической нагрузке в отсутствие события.

Методы контроля за исполнением обязательств по снижению нагрузки различаются по критериям применимости к объектам энергопотребления, а также по точности и сложности расчетов.

Метод графика базовой нагрузки основан на применении информации об объемах потребления объекта в предыдущие периоды. Для расчета принимаются предыдущие 10 дней фактического потребления.

Точность данного метода определяется, при сопоставлении графика базовой нагрузки с фактическим энергопотреблением объекта в те дни, когда отсутствуют события по управлению спросом (нет команд от Системного оператора). Оценить применимость метода для конкретного потребителя можно по характеристике RMSE – среднеквадратическое отклонение ошибки. Однако более удобным способом будет являться характеристика RRMSE – относительное среднеквадратическое отклонение.

$RRMSE = RMSE/C$, где C – среднее потребление за период. Относительное среднеквадратическое отклонение – величина безразмерная и удобна для нормирования.

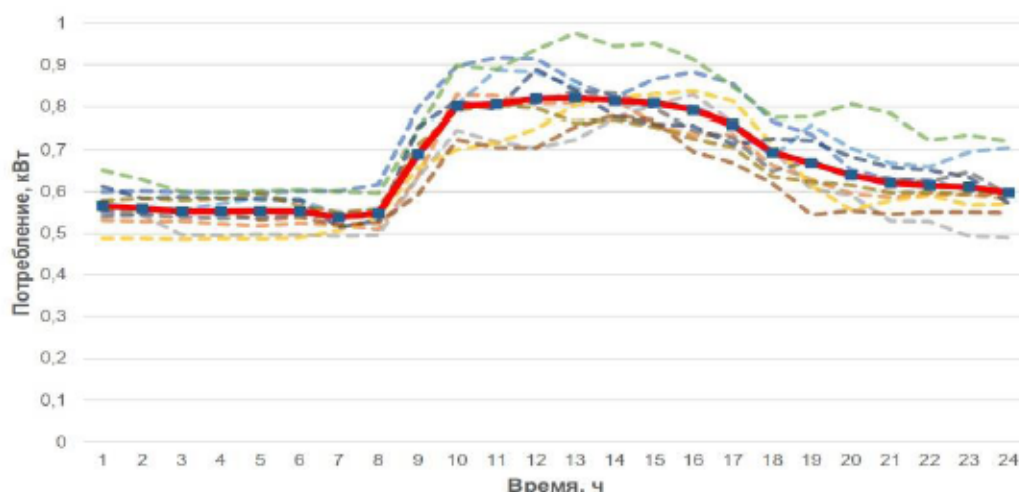


Рисунок 3 – График базовой нагрузки на основе энергопотребления за предыдущие 10 дней

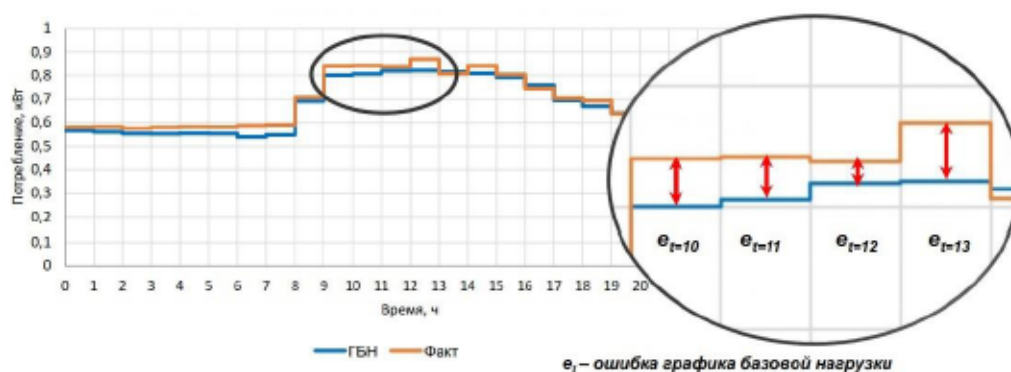


Рисунок 4 – Сопоставление графика базовой нагрузки и фактического потребления

Ошибка графика базовой нагрузки (e_t) – это разница между ГБН и фактическим потреблением в каждый час. Совокупность ошибок можно описать среднеарифметическим значением.

Требованием проекта по управлению спросом регламентировано требование $RRMSE \leq 0,2$. Это значит, что среднеквадратическое отклонение ошибки не должно превышать 20% от среднего потребления объекта.

Плюсами метода графика базовой нагрузки являются:

- подходит к большому количеству потребителей;
- простота расчета;
- устойчивость к манипулированию.

К минусам ГБН можно отнести требовательность к объемам потребления и наличие относительно типового графика нагрузки каждый день.

Метод заявленного графика нагрузки схож с методом графика нагрузки, но вместо расчетного теоретического потребления принимается типовой график нагрузки в дни отсутствия события по управлению спросом. Объем разгрузки также определяется аналогичным с ГБН способом: сравнением фактического потребления в часы события и заявленным графиком.

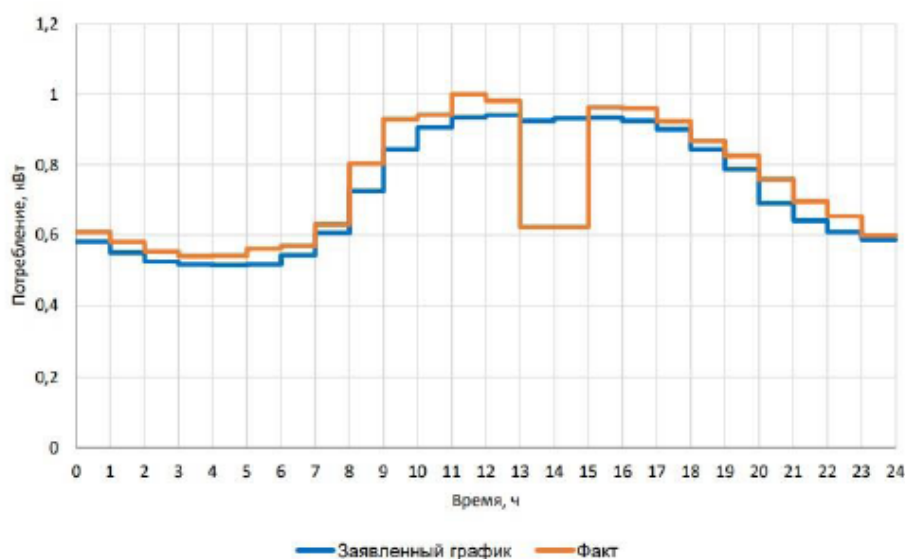


Рисунок 5 – Сопоставление графика заданной нагрузки и фактического потребления в день события по управлению спросом

Данный метод имеет существенный минус, заключающийся в возможном манипулировании графиком со стороны участников проекта – потребителей.

Подходит к ограниченному кругу потребителей из-за необходимости точного планирования своего потребления. Однако для потребителей с относительно небольшим потреблением и качественным планированием метод заданного графика нагрузки будет более предпочтительным из-за его простоты и гибкости применения.

Метод максимальной базовой нагрузки представляет собой алгоритм расчета объема снижения потребления как разницу между условной максимальной нагрузкой и максимальной базовой нагрузкой. Величина максимальной базовой нагрузки задается потребителем (агрегатором). А величина МБН определяется как средняя величина максимальной нагрузки за последние 10 дней.

Данный метод лучше всего подходит потребителям с переменным графиком нагрузки при стабильном суточном потреблении (повторно-кратковременный или иные подобные режимы работы).

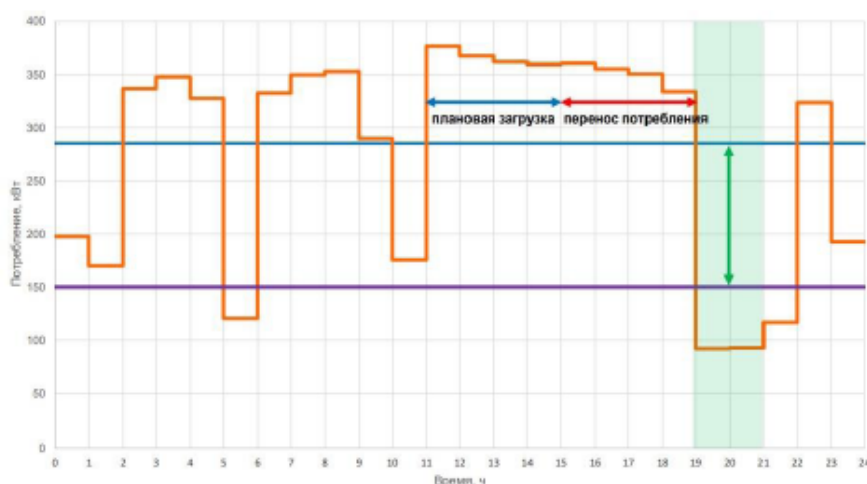


Рисунок 6 – Метод максимальной базовой нагрузки в день события по управлению спросом

Выводы.

Приведена краткая теория по функционированию проекта по управлению спросом на электроэнергию. Описаны функции участников проекта и приведена модель их взаимодействия.

Проведено исследование методов контроля потребителей, участвующих в проекте, и оценки результатов снижения их нагрузки в дни событий по управлению спросом. Приведены графики, иллюстрирующие каждый метод для расчета результатов снижения. Сделаны краткие выводы о плюсах и минусах методов контроля и их применимости к различным потребителям.

Библиографический список

1. Ф. Опадчий, Д. Холкин. Управление спросом в электроэнергетике России: открывающиеся возможности. - Москва, 2019. – 100 с.
2. Л.Д. Гительман, Б.Е. Ратников. Экономика и бизнес в электроэнергетике: междисциплинарный учебник - Москва: Экономика, 2014г. – 432 с.
3. О механизме управления спросом на электроэнергию. Пилотный проект по вовлечению потребителей розничного рынка электроэнергии в управление спросом на электроэнергию. АО «Системный оператор единой энергетической системы», 2019г. – 31 с.
4. Постановление Правительства РФ от 20 марта 2019г. №287 О внесении изменений в некоторые акты правительства российской федерации по вопросам функционирования агрегаторов управления спросом на электрическую энергию в единой энергетической системе России.
5. М. Кулешов, С. Рычков. Концепция функционирования агрегаторов распределенных энергетических ресурсов в составе Единой энергетической системы России. Москва, 2018г. 46 с.