

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОФИЛЕМ МОЩНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗА МАКСИМАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ РЕГИОНА

Н.В. Устюгов, О.М. Проталинский (НИУ «МЭИ»)

Предложен алгоритм построения прогноза электропотребления абонента на розничном рынке электроэнергетики с учетом времени замера максимального потребления мощности в регионе. Прогноз позволяет конечному покупателю электрической энергии снижать объем покупной мощности по рабочим дням на три спланированных часа, что приводит к сокращению расходов на приобретение электроэнергии без снижения общего объема потребления. Прогноз разработан с применением метода аппроксимации, позволяющий сократить объем обрабатываемых данных и принимать решения на основе ключевой информации. Приведены результаты апробации алгоритма на действующем объекте. Предложенный алгоритм предоставляет возможность абоненту самостоятельно организовать эффективное управление профилем мощности своего оборудования.

Ключевые слова: управление, прогноз, пиковые часы, электрическая энергия, профиль мощности.

### Введение

На розничном рынке электроэнергии и мощности для энергосбытовых компаний приоритетной задачей является максимально точное распределение покупаемой на оптовом рынке электрической энергии. Для покупателя электроэнергии актуальны задачи: эффективного применения электрической энергии (мощности) и оптимизации финансовых расходов, связанных с покупкой энергоресурса. При решении данных задач участниками розничного рынка электроэнергии возникает спрос на инженерные работы и услуги, результатом которых является повышение управляемости процесса потребления (покупки, перераспределения и продажи) энергии. Повышение эффективности управления достигается: контролем потребления, точным планированием и прогнозированием пиковых часов потребления. Исследование, позволяющее сократить финансовые расходы на покупку электроэнергии, является актуальным по причине системного роста стоимости электрической энергии и мощности для:

- государства, так как основное электропотребление приходится на городскую инфраструктуру (социальные и рекреационные объекты, коммунальные и транспортные системы);

- для энергообъектов, находящихся в собственности у юридических лиц, одномоментное потребление мощности которых  $\geq 670$  кВт (<https://www.fsk-ees.ru>).

Прогноз электропотребления является предметом исследования отечественных и зарубежных ученых [1]. В России научные работы в этой области направлены на нужды участников оптового рынка электроэнергии и энергосбытовых компаний [2]. Основным недостатком применяемых методов прогноза электропотребления является точность  $\leq 98\%$  [3]. Зарубежные научные работы предлагают управление электропотреблением с применением генерации, аккумуляторов, интеллектуальной сети, возобновляемой энергии и автоматизации [4]. Недостатком иностранных решений является — коммерциализация, выраженная в предоставлении платного программного обеспечения и технического сопровождения [5].

Управление электропотреблением на примере энергообъекта (завод, предприятие, жилое или офис-

ное здание, инженерное сооружение и любой другой объект, подключенный к внешней системе электропитания) дает возможность получить финансовую экономию от изменения объема покупаемой мощности (профиля мощности) в пиковые часы электропотребления в регионе.

Управление профилем мощности (рис. 1) станет гармоничным продолжением (или дополнительным приложением) к разрабатываемым решениям [6–8]: автоматизированному учету и управлению электрооборудованием, вариативным энерготарифам и online мониторингу потребления энергии.

Суть управления профилем мощности в перераспределении электропотребления во времени. Покупателю электроэнергии необходимо уменьшить потребление в пиковые часы, установленные гарантирующим поставщиком, а в остальное время по-

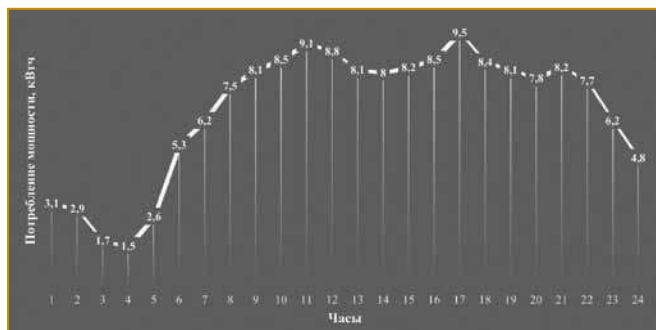


Рис. 1. Профиль мощности энергообъекта за рабочий день

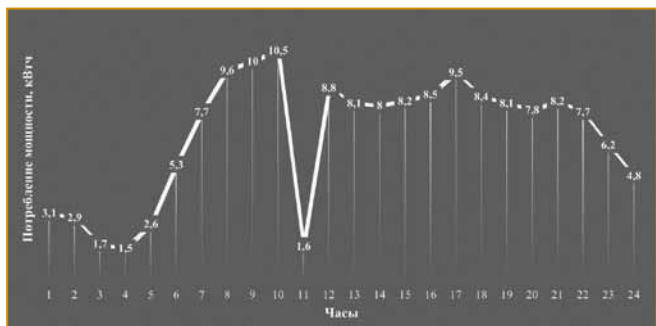


Рис. 2. Сокращение потребления мощности в прогнозируемый пиковый час

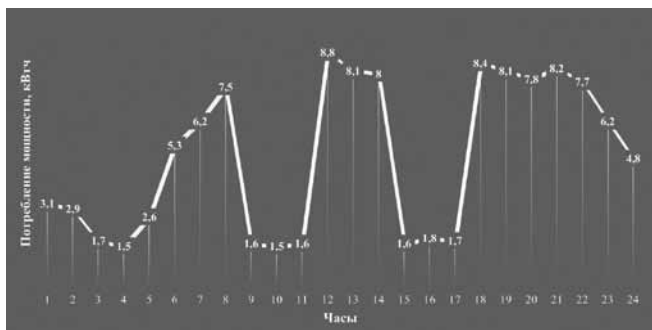


Рис. 3. Сокращение потребления мощности во все архивные пиковые часы

треблять необходимый объем энергии. В процессе исследования были применены два способа перераспределения электропотребления.

1. Снижение потребления мощности в прогнозируемые пиковые часы, по которым гарантирующий поставщик производит замеры максимального электропотребления региона в текущем периоде (рис. 2).

Этот способ предусматривает уменьшение абонентом потребления на несколько часов, в которые прогнозируется замер максимального электропотребления региона. Пиковые часы замеров, гарантирующий поставщик публикует в завершении расчетного месяца, поэтому абонент должен самостоятельно выполнить точный прогноз, необходимый для управления профилем мощности.

2. Снизить потребление мощности во все пиковые часы, по которым производились замеры максимального электропотребления региона в аналогичных предыдущих периодах (рис. 3).

Данный способ не эффективен, потому что абоненту, на основании статистики архивных данных, требуется сократить потребление на длительный период времени.

#### Постановка задачи

Необходимо выполнить управление профилем мощности оборудования энергообъекта с приложением прогноза максимального электропотребления в регионе. Цель работы заключается в повышении точности прогноза до 99% на выбранном промежутке времени (календарный месяц). Нормативные документы не регламентируют точность прогнозирования потребления электрической энергии и мощности. Но при практической реализации требуется максимальная точность прогноза для своевременного управления режимом работы электрооборудования и сохранения общего объема электропотребления.

На основе анализа существующих методов построения прогноза в среднесрочной перспективе (от месяца до года) принято решение использовать для решения поставленной задачи метод аппроксимации, который позволил произвести уменьшение размерности данных, потеряв наименьший объем информации.

Рассмотрим поэтапную разработку прогноза по предложенному алгоритму (рис. 4).

В начале запрашиваются архивные данные о часах пиковой нагрузки за все время наблюдения. Вводятся архивные данные о потреблении энергообъекта за все время работы электроустановки и дополнительные данные от абонента:  $E_b$  — бюджет, выделяемый на оплату электроэнергии и мощности, руб.;  $E_\phi$  — необходимая функциональность объекта, кВт (определяется как сумма необходимого работающего электрооборудования);  $\mathcal{E}_n, M_n$  — планируемая для потребления электроэнергия и мощность, кВт·ч;  $\Sigma_{\min, \max}$  — суммарное минимальное и максимальное электропотребление оборудования, кВт·ч.

Следующим этапом является агрегация архивных данных об электропотреблении и часов максимального потребления в регионе. Далее выполняется систематизация архивных часов пиковой нагрузки региона (за все время наблюдения) и разрабатывается прогноз часов пиковой нагрузки в регионе на планируемый период времени (месяц или год). На следующем этапе осуществляется сравнение с критерием, при котором потребление электроэнергии в каждый прогнозируемый час ( $h$ ) замера ( $z$ ) должно стремиться к минимально возможному электропотреблению ( $J_{nz}^{hz} \rightarrow \Sigma_{\min}$ ). При невыполнении этого условия производится распределение планируемой нагрузки по часам, в которые не прогнозируются замеры максимальной мощности.

На следующих трех этапах алгоритма выполняются подготовительные операции (сравнения). Инженерный объект (прототип) должен выполнять свои функции, то есть должны работать необходимые ин-

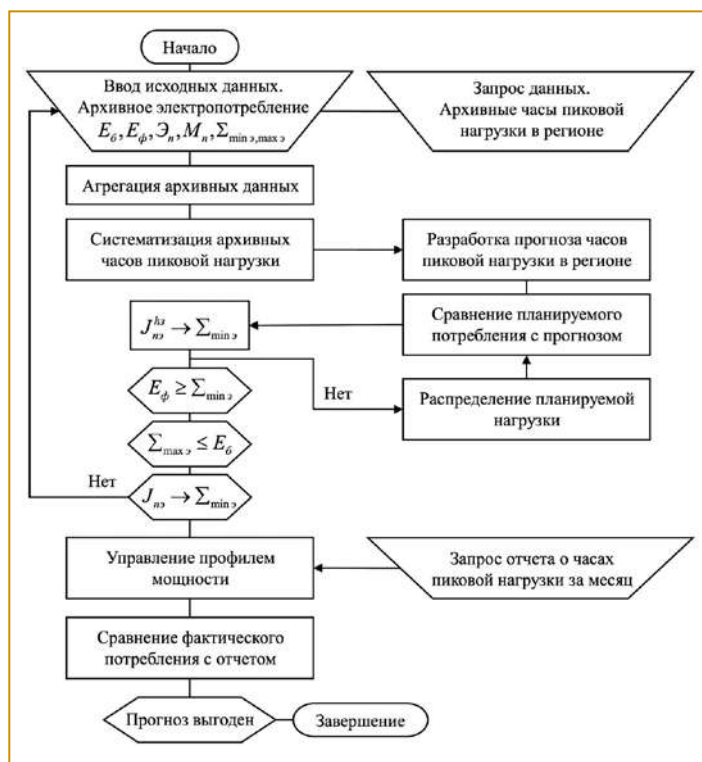


Рис. 4. Алгоритм управления профилем мощности оборудования

Профили по всем измерениям всех фидеров Объекта за период с 01-03-2019 до 01-04-2019												
упорядочено по: 1) количеству; 2) N секции; 3) N фидера; 4) коду измерения												
клин.пр.	0.4 кВ	0.4 кВ	0.4 кВ	0.4 кВ	0.4 кВ	0.4 кВ	0.4 кВ	0.4 кВ	0.4 кВ	0.4 кВ	0.4 кВ	
N сек.	секц. 1	секц. 1	секц. 1	секц. 1	секц. 2	секц. 2	секц. 2	секц. 2	секц. 2	секц. 2	секц. 2	
N фидера	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	
Название	Ввод 1	Ввод 1	Ввод 1	Ввод 1	Ввод 2	Ввод 2	Ввод 2	Ввод 2	Ввод 2	Ввод 2	Ввод 2	
N счетчика	5083534	5083534	5083534	5083534	5083533	5083533	5083533	5083533	5083533	5083533	5083533	
тип сч.	A1140	A1140	A1140	A1140	A1140	A1140	A1140	A1140	A1140	A1140	A1140	
интерв.профиля	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
Ктг х Ктн х М	80,00000	80,00000	80,00000	80,00000	80,00000	80,00000	80,00000	80,00000	80,00000	80,00000	80,00000	
%потерь	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
код изм.	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	
Календарь	Apr	Аюлд	Рпр	Ротд	Apr	Аюлд	Рпр	Ротд	Apr	Аюлд	Рпр	
01.03.2019	пт	рабочий	1	01:00	55,322	0,000	0,053	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	2	02:00	55,840	0,000	0,096	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	3	03:00	56,134	0,000	0,045	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	4	04:00	55,859	0,000	0,102	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	5	05:00	55,416	0,000	0,067	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	6	06:00	55,042	0,000	0,064	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	7	07:00	53,958	0,000	0,097	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	8	08:00	54,542	0,000	0,042	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	9	09:00	52,241	0,000	0,186	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	10	10:00	50,199	0,000	0,026	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	11	11:00	51,165	0,000	0,280	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	12	12:00	53,736	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	13	13:00	52,008	0,000	0,124	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	14	14:00	55,090	0,000	0,343	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	15	15:00	52,919	0,000	0,193	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	16	16:00	51,635	0,000	0,218	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	17	17:00	51,366	0,000	0,240	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	18	18:00	55,022	0,000	0,293	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	19	19:00	55,990	0,000	0,341	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	20	20:00	55,778	0,000	0,063	0,102	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	21	21:00	55,206	0,000	0,005	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	22	22:00	55,303	0,000	0,074	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	23	23:00	55,560	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01.03.2019	пт	рабочий	24	24:00	55,559	0,000	0,132	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Рис. 5. Почасовое электропотребление объекта

женерные системы и электрооборудование, поэтому электропотребление элемента должно быть больше или равно суммарному минимальному потреблению энергии ( $E_{\phi} \geq \sum_{\min \phi}$ ). Планируемое максимальное суммарное электропотребление (за месяц и год) должно быть не больше бюджета, предусмотренного для оплаты электрической энергии ( $\sum_{\max \phi} \leq E_{\phi}$ ). Потребление энергии нужно организовать так, чтобы было стремление достичь (и поддерживать) минимальное электропотребление элемента ( $J_{\text{из}} \rightarrow \sum_{\min \phi}$ ). При не соответствии хотя бы одному (из трех) условий, осуществляется возврат на начальный этап алгоритма.

После успешного прохождения трех подготовительных операций на основе разработанного прогноза организовывается управление профилем мощности на прототипе. По завершению отчетного периода выполняется запрос (у гарантирующего поставщика) отчета о часах пиковой нагрузки за месяц (<http://www.atsenergo.ru>). Далее осуществляется сравнение фактического потребления с полученным отчетом. Результат сравнения (и последующее получение счета за электроэнергию, со значительно меньшей суммой, чем за аналогичный период) подтверждает, что применение предложенного алгоритма является выгодным для потребителей. На этом конечном этапе работа в алгоритме завершается.

#### Апробация алгоритма прогноза

Апробация прогноза экспериментально проверена на прототипе (энергообъекте) — фонтан Дружба народов. 29.01.2019 г. составлены прогнозы электропотребления прототипа на 11 мес. 2019 г. с учетом часов замеров в регионе.

Для разработки прогноза взяты следующие исходные данные: электропотребление объекта за весь период работы, предоставленные программным обе-

спечением (АльфаЦентр, рис. 5) и пиковые часы в регионе (расположения объекта, Москва) за все время наблюдения, запрошенные у гарантирующего поставщика.

При построении прогноза применялась следующая логика операций. Исходные данные о пиковых часах в регионе и электрическом потреблении объекта распределяются по календарным дням месяца (для которого выполняется прогноз) с последующей консолидацией информации (в единой таблице). Выделяются часы архивных замеров мощности (как правило, это рабочие дни в промежутке времени с 11:00 до 20:00). Разрабатывается прогноз электропотребления объекта (на основе необходимого режима работы

оборудования и архивного потребления энергообъекта). Составляется месячный прогноз пикового электропотребления региона (допуская, что архивные часы замеров за аналогичные периоды совпадают с прогнозируемым месяцем). Проводится сверка прогнозируемого потребления объекта с прогнозируемым максимальным потреблением в регионе. При наложении часов максимального потребления энергообъекта на часы замеров вносятся изменения

Таблица. Проверка прогноза пиковых часов в регионе Москва, ноябрь 2019 г.

Дата	1-й час по вероятности	2-й час по вероятности	3-й час по вероятности	Часы замеров
01.11.	18	19	20	18
05.11.	18	19	20	18
06.11.	18	19	20	18
07.11.	19	18	20	18
08.11.	18	19	20	18
11.11.	18	19	20	18
12.11.	18	19	20	18
13.11.	18	19	20	18
14.11.	19	18	20	18
15.11.	19	18	20	18
18.11.	18	19	20	18
19.11.	18	19	20	18
20.11.	19	18	20	18
21.11.	18	19	20	18
22.11.	18	19	20	18
25.11.	18	19	20	18
26.11.	18	19	17	17
27.11.	18	19	17	17
28.11.	17	19	18	17
29.11.	18	19	17	17
Точность	65%	20%	15%	
Общая точность по 3-м часам: 100%				

в график работы электрооборудования таким образом, чтобы его минимальное потребление совпадало с максимальным электропотреблением в регионе.

Благодаря перераспределению нагрузки абонент экономит финансовые средства на покупку электроэнергии с сохранением общего объема потребления.

Применительно к объекту исследования на основании прогноза произведены изменения в режиме работы электрооборудования фонтана, что позволило снизить потребление в рабочие дни на три часа. Для оперативного управления профилем мощности оборудования инженерному персоналу на прототипе предоставили прогнозы по месяцам. В завершении каждого календарного месяца, выполнялись запросы (у гарантирующего поставщика) фактических часов замеров максимальной мощности в регионе. И производилось сравнение с выполненным прогнозом прошедшего месяца (таблица).

При выполнении исследования проанализирована зависимость потребления прототипа от климатических условий. Разработка прогноза с учетом климата, предоставляет точность < 99%.

Обработка информации об электропотреблении позволила выявить общие тенденции: наибольшее потребление в регионе происходит в рабочие дни, в выходные и праздничные дни потребление снижается; каждый энергообъект обладает индивидуальным характером работы электрооборудования; потребление электроэнергии и мощности не стабильно, существуют значительные различия в объеме покупки энергии по месяцам, рабочим дням и часам.

#### Заключение

Разработанный прогноз пиковых часов электропотребления региона на 11 мес. выполнен со средней абсолютной точностью 99,4% на 3 ч по рабочим дням. Сокращение расходов на покупку электрической энергии в 2019 г. составило 17,3%.

Результаты исследования направлены в банк решений умного города [9] для дальнейшего безвозмездного применения на территории РФ.

Пиковое электропотребление региона в большинстве случаев осуществляется в вечерние часы рабочих дней, что предоставляет возможность для снижения расходов на электроэнергию (дополнительно к прогнозу), применением следующих мероприятий:

1) перенос работы энергоемкого оборудования на ночные, утренние и дневные часы, а также в нерабочие дни;

2) перевод всего электрооборудования на дистанционное и автоматическое управление (что позволит получить максимальную оперативность при включении, выключении и переключении нагрузки). Предложенный переход в первую очередь касается энергоемких систем и оборудования. Выполнение тех-

нологических электрозависимых процессов на объекте необходимо выполнять по критическим отметкам и в часы без замеров гарантирующего поставщика.

После получения технико-экономических результатов на фонтане в Москве предложенный алгоритм построения прогноза электропотребления и пиковых часов в регионе получила дальнейшее применение на аналогичных энергообъектах.

Услуга «управление профилем мощности оборудования» поможет в реализации государственного стандарта «Умный город», в соответствии с которым в сферу «Умного жилищно-коммунального хозяйства» предусматривается внедрение до 2024 г. следующих нововведений: снижение энергопотребления в государственном и жилищном секторе, применение дистанционного учета и планирования расходов на коммунальные услуги.

Прогноз максимального электропотребления в регионе позволит уменьшить расходы на оплату коммунальных ресурсов и повысить энергоэффективность государственных и частных объектов всех уровней.

#### Список литературы

1. *Philippe Drobinski, Mathilde Mougeot, Dominique Picard, Riwal Plougonven, Peter Tankov.* Renewable Energy: Forecasting and Risk Management. Conference proceedings FRM 2017. Part of the Springer Proceedings in Mathematics & Statistics book series (PROMS, vol.254) Paris, France, 2017.
2. *Соломахо К.Л.* Применение метода главных компонент для прогнозирования объемов электропотребления энергосбытового предприятия. Диссертация на соискание ученой степени кандидата тех-х наук. 2015.
3. *Доманов В.И., Билалова А.И.* Прогнозирование объемов электропотребления в зависимости от исходной информации. Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2016. Т.16, №2. С. 59-65.
4. *Viktor Unterberger, Thomas Nigitz, Mauro Luzzu, Daniel Muschick, Markus Göllles.* Adaptive Methods for Energy Forecasting of Production and Demand of Solar-Assisted Heating Systems. International Conference on Time Series and Forecasting. Part of the Contributions to Statistics book series. First Online: 19 October 2019.
5. *Dejan Ilić, Stamatis Karnouskos.* Addressing energy forecast errors: an empirical investigation of the capacity distribution impact in a variable storage. Energy Systems vol. 5, pages 643–656, published: 08 April 2014.
6. *Risco Martín, José Luis, Mittal, Saurabh, Oren, Tuncer (Eds.).* Simulation for Cyber-Physical Systems Engineering. Simulation Foundations, Methods and Applications. Publisher Springer International Publishing, 2020.
7. *Wolf, Marilyn Claire, Serpanos, Dimitrios.* Safe and Secure Cyber-Physical Systems and Internet-of-Things Systems. Electronics & Electrical Engineering. Publisher Springer International Publishing, 2020.
8. *Biffl, Stefan, Lüder, Arndt, Gerhard, Detlef (Eds.).* Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. Data Models and Software Solutions for Handling Complex Engineering Projects. Publisher Springer International Publishing, 2017.
9. *Устюгов Н.В.* Прогноз электропотребления предприятия и часов максимального потребления в регионе. Проект № 526, 2020.

**Устюгов Никита Викторович** – аспирант, **Проталинский Олег Мирославович** – д-р техн. наук, проф., кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ». E-mail: [ustugovnv@dom.mos.ru](mailto:ustugovnv@dom.mos.ru) [protalinskiy@gmail.com](mailto:protalinskiy@gmail.com)