

УДК 621.316.722

Е.А. Третьяков¹, Н.Н. Малышева²**УПРАВЛЕНИЕ СПРОСОМ СО СТОРОНЫ АКТИВНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ
В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**Омский государственный университет путей сообщения¹
Нижевартовский государственный университет²

Представлен алгоритм ограничения мощности со стороны активных потребителей на основе широкого использования цифровых технологий обработки данных. Разработан метод управления спросом со стороны активных потребителей в нормальном режиме интеллектуальных электроэнергетических систем. Анализ данных электропотребления и режимов работы осуществляется на основе применения современных технических средств измерений, управления и коммутации электроприемников (advanced metering infrastructure – AMI). Оптимальный график нагрузки формируется не на основе прогнозируемых наборов комбинаций мощности электроприемников, а путем управления ограничением включения (отключением) и плавным изменением мощности контролируемых электроприемников в реальном времени; в модели потребления мощности нагрузка разделяется на контролируемую (отключаемую и с гибким регулированием мощности) и неконтролируемую, в том числе, случайную. Обоснован метод управления спросом со стороны активных потребителей в нормальном режиме интеллектуальных электроэнергетических систем и возможности его практической реализации на промышленном предприятии с привязкой к технологическому процессу.

Ключевые слова: цифровизация, управление, регулирование, оптимизация, анализ данных, реальное время, активные потребители, электроэнергетическая система, график нагрузки.

Введение

Управление спросом активных потребителей рассматривается, как правило, исходя из экономических интересов генерации, распределения и потребления электроэнергии, в соответствии с развитием различных рыночных моделей их взаимодействия [1, 2]. В Российской Федерации в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 20.07.2016 № 699 «О внесении изменений в Правила оптового рынка электрической энергии и мощности» развивается ценозависимое снижение потребления крупными потребителями оптового рынка электроэнергии и мощности, а также потребителей розничного рынка электроэнергии с участием организаций-агрегаторов. Для обеспечения совокупного объема ценозависимого снижения потребления мощности промышленные и другие сопоставимые предприятия должны иметь соответствующие подходы к гибкому изменению технологических процессов без ущерба для своей деятельности.

В ряде работ предлагается универсальная модель управления спросом активных потребителей на основе агрегативного моделирования возможной и предельной длительности отключения для всех наборов присоединений на время начала отключения [4, 5]. При этом отключение присоединений потребителей рассматривается с вероятностной точки зрения в виде дискретных случайных величин. Практическая реализация указанного подхода представляется несколько затруднительной в реальном времени.

В перспективе методы вероятностного управления активными потребителями будут вытесняться подходами на основе полной наблюдаемости и управляемости в реальном времени в рамках концепций промышленного интернета вещей и энергии [6]. В этом случае присоединения таких потребителей к электрическим сетям должны быть полностью управляемыми с помощью коммутационных аппаратов и (или) регулируемых устройств сопряжения и оборудованы автоматизированной системой учета электроэнергии, мощности и прочим, а взаимодействие между активными потребителями и участниками рынка электроэнергетики должно быть организовано таким образом, чтобы обеспечить оптимальное использование ресурсов.

гии целесообразно выполнять в единой аппаратно-программной среде. Производственные и технологические процессы активных потребителей также должны контролироваться (управляться) автоматизированной системой. Цифровизация производственных и технологических процессов предприятий, и организаций является основой для получения необходимой информации о ретроспективных, текущих и прогнозных данных со всех электроприемников и их взаимосвязи, как для повышения эффективности производственного процесса, так и для целей управления активными потребителями в реальном времени.

Данное исследование связано с разработкой возможных подходов к управлению спросом со стороны активных потребителей в интеллектуальных электроэнергетических системах.

Теоретическая часть

Для активного потребителя основной задачей является изменение потребляемой мощности по присоединениям на некоторую величину или в требуемых пределах с какого-то момента времени на заданную продолжительность без негативных последствий и тем более ущерба для себя. При этом очевидно, что основным мотивом активного потребителя участвовать в балансировке мощности электроэнергетической системы является материальная выгода в виде скидки к тарифу за потребленную электроэнергию или мощность, а также возможные другие выгодные условия от гарантирующего поставщика электроэнергии, например, увеличение договорной мощности, исключение ограничений потребления с учетом категоричности и прочее.

Все электроприемники потребителя с точки зрения возможного изменения потребляемой мощности можно условно разделить на группы:

- неотключаемые (в нормальном и аварийном режиме);
- неотключаемые (в нормальном режиме);
- отключаемые;
- с возможностью уменьшения потребляемой активной мощности в пределах $\Delta P_{\min} - \Delta P_{\max}$ (в нормальном режиме);
- с возможностью уменьшения потребляемой активной мощности в пределах $\Delta P'_{\min} - \Delta P'_{\max}$ (в аварийном режиме).

В ряде случаев управление частью нагрузок может быть передано системному оператору (агрегатору).

Задача формирования оптимального графика потребления электроэнергии бытовых и промышленных потребителей во многих работах рассматривается буквально, т.е. как сумма отдельных нагрузок с учетом продолжительности включения по условию минимума затрат на электропотребление [7]. В этом случае не учитывается взаимосвязь электроприемников по функциональному признаку, что соответствует бытовым потребителям. В работах [8-15] представлена модель активного потребителя по минимуму затрат на электропотребление на основе задания планируемых графиков нагрузки со своими коэффициентами выгоды и учета изменения стоимости электроэнергии в течение расчетного периода при наличии собственной генерации. Многие работы также связаны с определением оптимального графика электропотребления по минимуму затрат для MicroGrid [16-18], для группы разнородных потребителей в целом [19], а также по минимуму коэффициента формы графика нагрузки [20]. Для управления спросом активных потребителей электроэнергетических систем для балансирования мощности в нормальном и аварийном режиме необходимо руководствоваться не только возможными стоимостными механизмами стимулирования снижения спроса на электроэнергию, которые имеют вероятностный характер, но и договорными обязательствами системного оператора (агрегатора) и потребителя.

В нормальном режиме работы электроэнергетических систем планирование потребления мощности потребителем в пиковые часы осуществляется заблаговременно и может быть снижено, например, за счет:

- пересмотра и изменения сетевого графика технологических и производственных процессов;
- пересмотра и осуществления сдвига по времени работы электроприемников с переменной нагрузкой, зависящей от объема выполняемых работ;
- изменение режимов работы электроприемников с гибким регулированием производительности и мощности на период прохождения пиков нагрузки (электротермическое, холодильное, насосное, вентиляционное оборудование и т.п.);
- ввод в работу генерирующих мощностей и (или) систем накопления электроэнергии и др.

В данном исследовании рассматриваются возможные подходы к ограничению мощности активного промышленного потребителя до заданного значения для реализации договорных отношений с системным оператором (агрегатором).

Электроприемники (ЭП) различных групп технологических процессов, установок и административных зданий территориально распределены между различными источниками питания и не могут управляться по одному присоединению, фидеру, линии, КТП и ТП. На рис. 1 представлена типовая принципиальная электрическая схема электроснабжения потребителей промышленного предприятия.

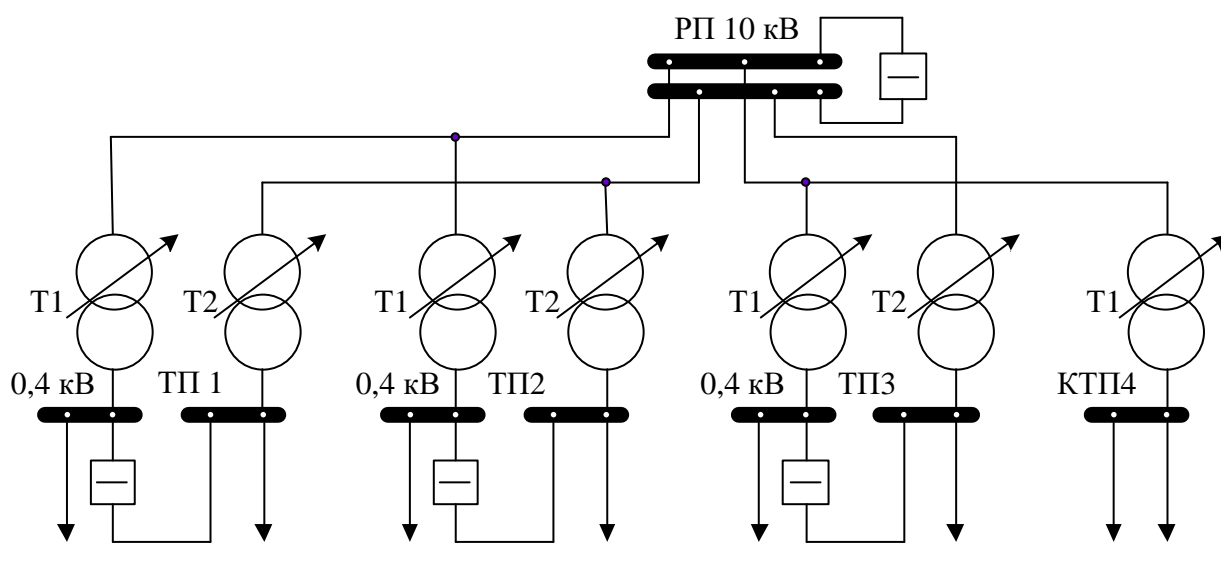


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема электроснабжения потребителей

Предлагаемый алгоритм ограничения мощности со стороны активных потребителей (рис. 2) может быть реализован в аппаратно-программном комплексе на основе широкого использования цифровых технологий обработки данных и современных технических средств измерений, управления и коммутации в распределительных электрических сетях. В частности, все присоединения с крупными электроприемниками и технологическими установками, участвующими в отключении/снижении активной мощности, должны быть оборудованы электроизмерительными устройствами и управляемыми коммутационными аппаратами. Технологические установки с гибким регулированием производительности и мощности (электротермическое, холодильное, насосное, вентиляционное оборудование и т.п.) должны иметь каналы связи с аппаратно-программным комплексом.

В качестве исходных данных для управления ограничением мощности выступают измеренные сигналы мощности, включения/отключения, технологических параметров с электроприемников и база данных, описывающая допустимые режимы, ограничения, технологические связи электрооборудования и прочее.

Связи различных электроприемников целесообразно описывать матрицей или списками смежности на основе теории графов [21]:

- списки смежности для описания связей электроприемников, входящих в технологическую операцию, процесс или электроустановку;
- списки смежности для описания электрических связей электроприемников с питающими центрами;
- списки смежности для описания связей между технологическими операциями, процессами или электроустановками.

Аналогично формируются списки смежности для описания электрических связей электроприемников с центрами питания, а также между технологическими операциями, процессами или электроустановками.

На основе выстроенной структуры электроприемников (по спискам смежности) с указанием электрических, технологических и прочих связей, выполняется статистический анализ данных в реальном времени (с частотой дискретизации несколько раз в секунду), включая время работы (реальный сетевой график технологических процессов), потребление электроэнергии и мощности по технологическим операциям, типам электроприемников, направлениям использования, присоединениям и т.п.

На следующем этапе алгоритма (блок 4, рис. 2) до момента ограничения мощности выполняется проверка соответствия прогнозируемой потребляемой мощности плану. В качестве плана рассматривается суммарный и соответствующие индивидуальные графики нагрузки, отвечающий заданным ограничениям по потреблению мощности в конкретный период времени заданной продолжительности, полученным заблаговременно (за сутки) от системного оператора (агрегатора) (1):

$$P^t \cdot k_t \leq P_{op}^t, \quad P_{op}^t = f(t), \quad t \in (t_1 - t_2), \quad (1)$$

где P^t – суммарная прогнозируемая потребляемая мощность в момент времени t ; k_t – коэффициент запаса; P_{op}^t – опорный план, соответствующий заданным ограничениям мощности в период времени $t_1 - t_2$.

Прогнозирование графика нагрузки на сутки вперед осуществляется с частотой дискретизации, соответствующей периодичности получения данных с информационно-измерительных систем (несколько раз в секунду). По мере приближения к периоду времени с заданным ограничением мощности точность прогноза возрастает. Коэффициент запаса учитывает случайность характера нагрузки, не участвующей в управлении спросом, а также погрешность методов прогнозирования и управления электропотреблением. В случае невыполнения условия (1) выполняется автоматическая корректировка работы электроприемников, графика нагрузки на момент реализации плана ограничения и мощности (по прогнозу): оптимизация режимов работы регулируемой и отключаемой нагрузки (блок 5, рис. 2).

График нагрузки активной мощности для рассматриваемых целей можно представить в виде суммы контролируемых (управляемых) индивидуальных графиков, оборудованных индивидуальной системой учета и коммутации, и неконтролируемых (случайных стационарных) (2):

$$P^t = \sum_{i=1}^n p_{1i}^t + \sum_{i=1}^n p_{2i}^t + \dots + \sum_{i=1}^n p_{mi}^t + m_p + \Phi(\beta)\sigma_p, \quad (2)$$

где $\sum_{i=1}^n p_{1i}^t$ – контролируемые электроприемники технологического процесса, операции;

$\sum_{i=1}^n p_{2i}^t$ – контролируемые электроприемники с гибким регулированием производительности

и мощности; $\sum_{i=1}^n p_{mi}^t$ – контролируемые условно-постоянные электроприемники, в том числе,

неотключаемые; m_p – математическое ожидание неконтролируемых случайных стационарных процессов изменения нагрузки; $\Phi(\beta)$ – функция, обратная интегралу вероятности β закона распределения (например, для нормального закона распределения $\Phi(0,95) = 1,64$); σ_p – среднеквадратическое отклонение мощности неконтролируемой нагрузки.

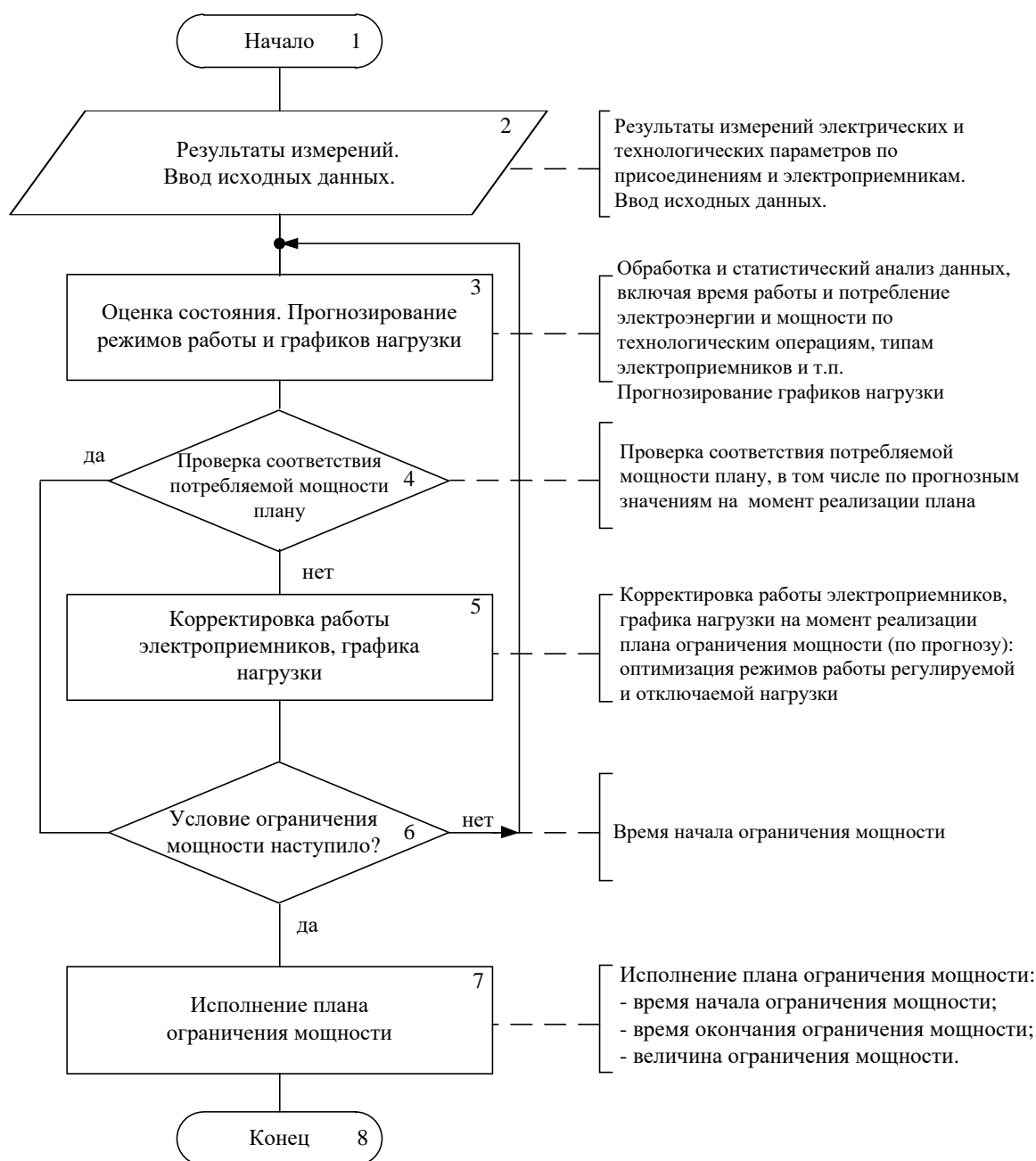


Рис. 2. Алгоритм ограничения мощности со стороны активных потребителей

Статистические характеристики неконтролируемых графиков нагрузки активной мощности были рассчитаны на основании обработки ретроспективных и прогнозных данных, полученных путем вычитания из общего графика нагрузки по присоединению контролируемых графиков нагрузки отдельных электроприемников по сведениям измерительных систем. Целевую функцию спроса для присоединения ТП с активными (управляемыми) потребителями при заданных ограничениях мощности системным оператором (агрегатором) в период времени $t \in (t_1 - t_2)$ можно записать в виде максимизации мощности подключенных активных потребителей: отключаемых и с гибким регулированием производительности и мощности в момент времени t (3):

$$F = \sum_{i=1}^n p_{1i} \cdot v_i \cdot \Delta \omega_i \cdot x_i + \sum_{k=1}^m p_{2k} \cdot v_k \cdot \Delta \omega_k \cdot y_k \rightarrow \max, \quad (3)$$

$$x_i = 0, 1 (i \in Z),$$

$$y_{k \min}, y_{k \max} \in (0 - 1.)$$

при ограничениях: $P^t \cdot k_t \leq P_{op}^t, t \in (t_1 - t_2), \sum_{i=1}^n x_i = a, y_{k \min} \leq y_k < y_{r \max},$

$$\Delta P_{k \min} \leq p_{2k} \cdot y_k \leq y_{k \max}, p_{1i}, x_i \in B; G,$$

где v_i, v_k – приоритет нагрузки, определяется путем ранжирования потребителей по важности нагрузки (в диапазоне 0 – 1); $\Delta \omega_i, \Delta \omega_k$ – чувствительность нагрузки по присоединению ТП к изменению нагрузки потребителя (в диапазоне 0 – 1); x_i – двоичная переменная (0 или 1); y_k – непрерывная переменная – коэффициент изменения мощности нагрузки от минимальной до максимальной (в диапазоне 0 – 1); a – целое число, определяющее статус отключаемых электроприемников; n, m – количество электроприемников с возможностью их отключения и с гибким регулированием мощности соответственно; $\Delta P_{k \min}, \Delta P_{k \max}$ – согласованные уровни сокращения нагрузки с гибким регулированием производительности и мощности; B – допустимый набор электроприемников в соответствии технологическим процессом, сетевым графиком работ, прочих логических условий, соответствующий спискам смежности; G – список смежности, описывающий связи электроприемников, входящих в технологическую операцию, процесс или электроустановку.

По итогам решения задачи смешанного целочисленного программирования (3) определяется подходящий набор электроприемников из допустимых, а также величина сокращения мощности электроприемников с гибким регулированием производительности с учетом заданных ограничений для обеспечения соответствия суммарного графика нагрузки по присоединению заданному значению.

Практическая часть

Рассмотрим реализацию представленных подходов к управлению спросом со стороны активного потребителя путем формирования заданного графика потребления мощности в требуемый период времени на примере электровозоремонтного завода. На рис. 3 представлены связи контролируемых (активных) электроприемников, входящих в технологическую операцию, процесс или электроустановку (на примере одного цеха). Список смежности G для описания связей электроприемников, входящих в технологическую операцию, процесс или электроустановку имеет вид (например, для рис. 3):

$$G = \begin{array}{llll} 1 \rightarrow & 7 \rightarrow & 8 \rightarrow & 11; \\ 2 \rightarrow & 8 \rightarrow & 9 \rightarrow & 11; \\ 3 \rightarrow & 10 \rightarrow & & 12; \\ 4 \rightarrow & 12 \rightarrow & 13 \rightarrow & 14; \\ 5 \rightarrow & 7 \rightarrow & 10 \rightarrow & 16; \\ 6 \rightarrow & & 17; & \end{array} \quad \begin{array}{llll} 7 \rightarrow & 1 \rightarrow & 5; & \\ 8 \rightarrow & 1 \rightarrow & 2; & \\ 9 \rightarrow & & 2; & \\ 10 \rightarrow & 3 \rightarrow & 5; & \\ 11 \rightarrow & 1 \rightarrow & 2; & \\ 12 \rightarrow & 3 \rightarrow & 4; & \end{array} \quad \begin{array}{ll} 13 \rightarrow & 4; \\ 14 \rightarrow & 4; \\ 15 \rightarrow & 4; \\ 16 \rightarrow & 5; \\ 17 \rightarrow & 6. \end{array}$$

Автоматизированная система управления спросом выполняет обработку и статистический анализ измеренных и введенных данных в реальном времени. Измерение электрических и прочих контролируемых параметров электроприемников позволяет иметь обширные сведения о ходе технологического процесса, его соответствия сетевому графику, включая время работы и потребление электроэнергии и мощности по технологическим операциям, типам электроприемников и т.п.

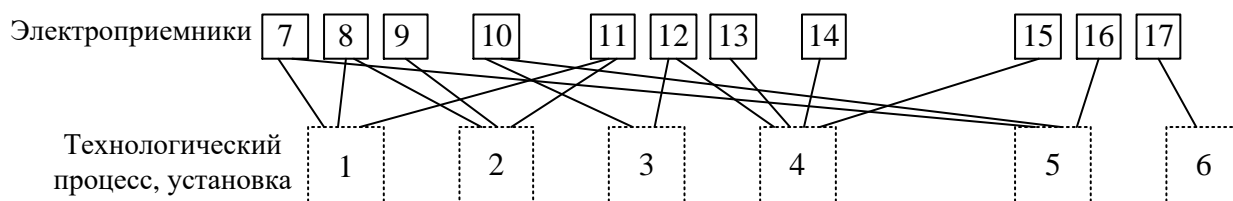


Рис. 3. Связи электроприемников, входящих в технологическую операцию, процесс или электроустановку (направление использования)

На рис. 4 представлена структура потребления мощности по технологическим операциям и группам электроприемников в определенный момент времени по электромашинному цеху. Группы электроприемников 1-5, 8, 9 являются контролируемыми и управляемыми, среди которых 3, 4 – с гибким регулированием производительности и мощности.

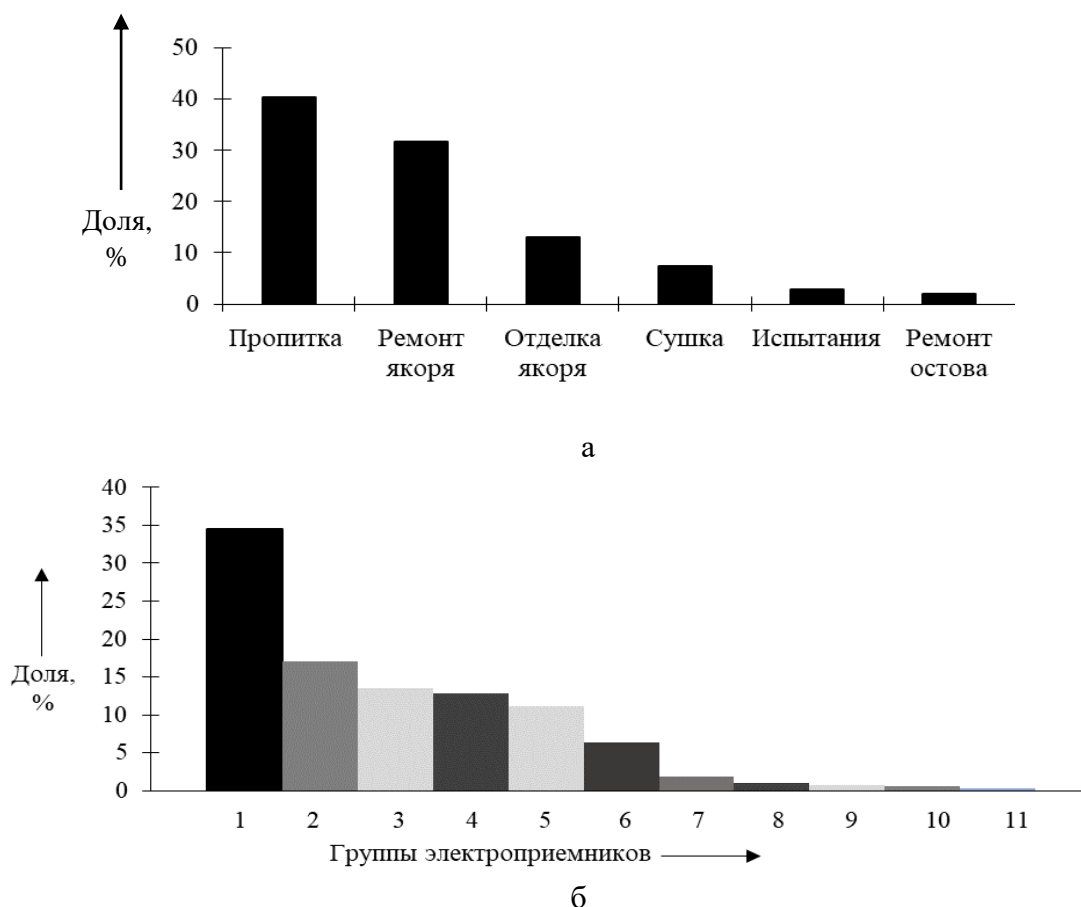


Рис. 4. Структура потребления мощности по технологическим операциям (а) и группам электроприемников (б):

1 – электропечи, калориферы; 2 – электропривод, станки; 3 – холодильное оборудование, вентиляция; 4 – компрессоры, насосы; 5 – моечные машины; 6 – освещение; 7 – бытовая и оргтехника; 8 – сварочное оборудование; 9 – грузоподъемные механизмы; 10 – прочее; 11 –стенды

На основе современных интеллектуальных методов прогнозирования выполняется формирование графика нагрузки в пределах предстоящих суток, когда задано ограничение мощности активных потребителей, для оценки его соответствия планируемой потребляемой мощности. При этом учитываются ретроспективные данные по графикам нагрузки, указанные списки смежности, сетевой график выполнения технологических операций, температура окружающего воздуха, производственные блокировки, ограничения, логические условия и прочие данные, обеспечивающие повышение точности прогнозирования.

Решение оптимизационной задачи смешанного целочисленного программирования (10) выполнялось методом ветвей и границ программными средствами для каждого учитываемого момента времени с учетом данных, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Основные данные

Показатель	Значение для электроприемников										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	307
v_i	1	-	0,3	0,95	1	0,6	0,7	-	-	...	0,8
v_k	-	0,9	-	-	-	-	-	0,8	-	...	-
$\Delta\omega_i$	0,99	-	0,99	0,97	0,98	0,95	0,97		-	...	0,99
$\Delta\omega_k$	-	0,95	-	-	-	-	-	0,99	-	...	-
$\Delta P_{k \min}$, кВт	-	4	-	-	-	-	-	5	-	...	-
$\Delta P_{k \max}$, кВт	-	10	-	-	-	-	-	25	-	...	-
p_{1i} , кВт	34		7	34	56	14	8		-	...	18
p_{2i} , кВт	-	12	-	-	-	-	-	25	-	...	-
m_p / σ_p , кВт	-	-	-	-	-	-	-	-	12/3	...	-

Результатом решения задачи (3) являются множества $x_i = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, $x_i = 0, 1 (i \in Z)$ и $u_k = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\}$, $u_k \in (0, 1)$, в соответствии с которыми осуществляется управление контролируемыми электроприемниками, в том числе, за счет сдвига технологических операций по времени. На рис. 5 представлены графики нагрузок групп электроприемников и суммарный, полученные на основе решения оптимизационной задачи управления спросом активного потребителя (для периода времени с ограничением мощности).

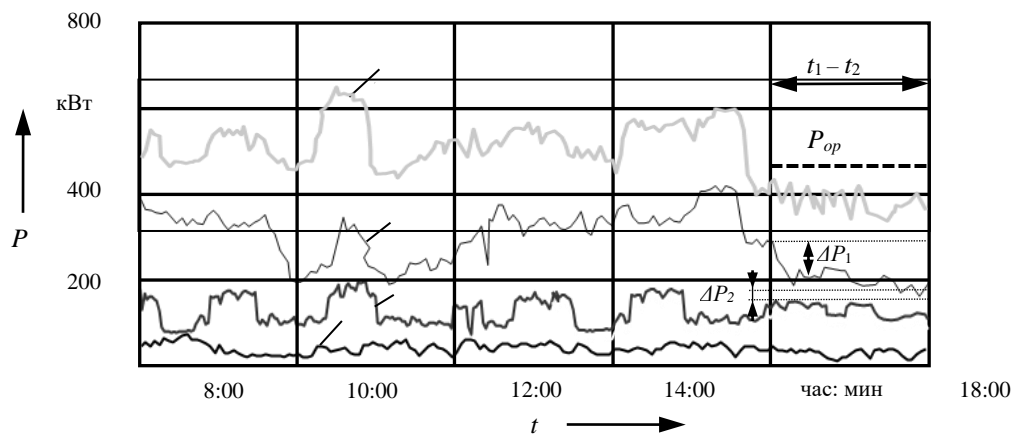


Рис. 5. Графики активной мощности:

- 1 – суммарный с учетом ограничения мощности; 2 – отключаемых электроприемников;
3 – электроприемников с гибким регулированием мощности;
4 – неконтролируемых и (или) неотключаемых электроприемников

Здесь $\Delta P_1 = \sum_{i=1}^n p_{1i}^t x_i$, $\Delta P_2 = \sum_{k=1}^m p_{2k}^t y_k$ – расчетное снижение активной мощности от-

ключаемых электроприемников и с гибким регулированием производительности в указанный момент времени соответственно. Ограничение мощности принималось $P_{op} = 460$ кВт, коэффициент запаса $k_t = 1,1$. Выборка графика нагрузки представлена по 170 точкам во времени с 8:00 до 18:00.

Указанные графики нагрузок являются расчетными, в том числе, на основе измеренных параметров мощности отдельных электроприемников, группируемых по заданным условиям, и неконтролируемых (случайных стационарных) в соответствии с выражением (2). Нестационарные случайные включения нагрузок можно учитывать корректировкой величины коэффициента запаса.

Для ограничения мощности сетевой график был сдвинут по времени в пределах допустимых ограничений, заданных исходных логических условий.

Результаты и выводы

На основе представленного алгоритма разработан метод управления спросом со стороны активных потребителей в нормальном режиме интеллектуальных электроэнергетических систем, характеризующихся следующими отличительными признаками:

- анализ данных электропотребления и режимов работы осуществляется на основе применения современных технических средств измерений, управления и коммутации электроприемников (advanced metering infrastructure – АМІ);
- оптимальный график нагрузки формируется не на основе прогнозируемых наборов комбинаций мощности электроприемников, а путем управления ограничением включения (отключением) и плавным изменением мощности контролируемых электроприемников в реальном времени;
- в модели потребления мощности нагрузка разделяется на контролируемую (отключаемую и с гибким регулированием мощности) и неконтролируемую, в том числе, случайную.

Представленные результаты реализации рассматриваемого подхода к управлению спросом со стороны активного потребителя на примере одного цеха завода позволяют говорить о возможности решения подобной задачи программными средствами в целом по крупному предприятию с привязкой к технологическому процессу по нескольким присоединениям к электроэнергетической системе.

При необходимости выражение (3) можно перевести в минимизацию затрат на электропотребление, путем включения множителя со стоимостью электроэнергии в каждый момент времени и (или) дополнить собственную генерацию (накопление) мощности с переменной стоимостью, что является предметом дальнейших исследований авторов.

Сделана попытка на основе развития перспективных технических средств измерений, управления и коммутации конечных потребителей связать потребляемую мощность различных типов электроприемников с ограничениями инфраструктуры в конкретные моменты (периоды) времени.

Библиографический список

1. **Кучеров, Ю.Н.** Развитие технологий активного потребителя и их интеграция в электрическую сеть общего пользования / Ю.Н. Кучеров, А.В. Иванов, Д.А. Корев, Н.А. Уткин, А.З. Жук // Энергетическая политика. – 2018. – № 5. – С. 73-86.
2. **Волкова, И.О.** Активный потребитель в интеллектуальной энергетике / И.О. Волкова, Е.А. Сальникова, Д.Г. Шувалова // Академия энергетики. – 2011. – № 2 (40). – С. 50-57.

3. **Бушуев, В.В.** Инновационное развитие электроэнергетики как важнейший приоритет стратегического развития России / В.В. Бушуев, Ю.Н. Кучеров // *Электро*. – 2016. – № 1 – С. 45-52.
4. **Куликов, А.Л.** К вопросу о мотивации аварийно-активных промышленных потребителей электроэнергии к управлению своей нагрузкой / А.Л. Куликов, М.В. Шарыгин // *Промышленная энергетика*. – 2017. – № 11. – С. 2-10.
5. **Куликов, А.Л.** Использование внутренних производственных резервов потребителей для ликвидации дефицитов электрической мощности / А.Л. Куликов, М.В. Шарыгин // *Электрические станции*. – 2017. – № 4. – С. 36–43.
6. **Старченко, А.Г.** Интернет энергии: будущее электроэнергетики уже наступило / А.Г. Старченко, В.В. Дзюбенко, И. Ю. Ряпин // *Энергетическая политика*. – 2018. – № 5. – С. 17-24.
7. **Волкова, И.О.** Активный потребитель: задача оптимизации потребления электроэнергии и собственной генерации / И.О. Волкова, М.В. Губко, Е.А. Сальникова // *Проблемы управления*. – 2013. – № 6. – С. 53-61.
8. **Гальперова, Е.В.** Моделирование поведения активного потребителя на основе агентного подхода / Е.В. Гальперова, В.И. Гальперов // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. – 2017. – № 4 (8). – С. 28-38.
9. **Кучеров, Ю.Н.** Развитие технологий активного потребителя и их интеграция в электрическую сеть общего пользования / Ю.Н. Кучеров, А.В. Иванов, Д.А. Корев, Н.А. Уткин, А.З. Жук // *Энергетическая политика*. – 2018. – № 5. – С. 73-86.
10. **Ordehi, A.R.** Optimisation of demand response in electric power systems, a review / A.R. Ordehi // *Renewable and sustainable energy reviews*. – 2019. – Vol. 103. – P. 308-319.
11. **Воденников, Д.А.** Взаимодействие электроснабжающей организации и активного потребителя при управлении электропотреблением / Д.А. Воденников // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. – 2019 – № 8. – С. 77-83.
12. **Jhala, K.** Prospect theory-based active consumer behavior under variable electricity pricing / K. Jhala, V. Natarajan, A. Pahwa // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2018. – Vol. 10. – P. 2809-2819.
13. **Malysheva, N.N.** Optimal Choice of Technical Means for Reactive Power Compensation / 2019 International Conference on Industrial Engineering / N.N. Malysheva // *Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2019. – Sochi, Russia, pp. 1-7
14. **Роженцова, Н.В.** Многоагентный подход к моделированию активных потребителей / Н.В. Роженцова, О.С. Регир, А.В. Коцюбинский // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. – 2019. – Том 11. – № 2 (42). – С. 47-55.
15. **Lee, S.J.** et al. Supply and demand management system based on consumption pattern analysis and tariff for cost minimization // 2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). – IEEE, 2016. – P. 652-658.
16. **Furukakoi, M.** et al. Multi-objective optimal operation with demand management and voltage stability // 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). – IEEE, 2017. – P. 383-388.
17. **Benysek, G.** et al. Decentralized Active Demand Response (DADR) system for improvement of frequency stability in distribution network // *Electric Power Systems Research*. – 2016. – Vol. 134. – P. 80-87.
18. **Lin, C. M.** Design and implementation of a smart home energy saving system with active loading feature identification and power management / C.M. Lin, M.T. Chen // 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia). – IEEE, 2017. – P. 739-742.
19. **Стенников, В.А.** Активное участие потребителя в управлении своим энергоснабжением / В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, Д.В. Соколов, В.Б. Шелехова // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2017. – Т. 19. – № 11-12. – С. 88-100.
20. **Jordehi, A.R.** Optimisation of demand response in electric power systems, a review / A.R. Jordehi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2019. – Т. 103. – С. 308-319.
21. **Diestel, R.** Graph Theory / R. Diestel // Springer, 2005. – 410 P.

*Дата поступления
в редакцию: 02.02.2020*

E.A. Tretyakov¹, N.N. Malysheva²

MANAGING DEMAND FROM ACTIVE CONSUMERS IN SMART POWER SYSTEMS

Omsk State Transport University¹

Nizhnevartovsk state university²

Presentation of approaches to demand management by active consumers by creating a schedule for the use of power depending on time requires solving an optimization problem to maximize the power of connected controlled electric receivers of various types. Demand management model by active consumers, taking into account the following factors: load sensitivity for connecting a transformer substation to a change in consumer load; load priority; harmonized levels of load reduction with flexible control of productivity and power; an acceptable set of power consumers in accordance with the technological process, the network schedule, other logical conditions, the corresponding adjacency lists.

An algorithm has been developed for limiting power on the part of active consumers based on the widespread use of digital data processing technologies, modern technical means of measurement, control and switching of end consumers in real time. Solutions for the optimization problem - mixed integer programming - are performed using the branch and bound method.

Results: a developed method for managing needs in the normal use of intelligent energy systems, the hallmarks of which are: analysis of power consumption data and operating modes based on the use of modern technical means of measurement, control and switching of power receivers (advanced measurement infrastructure - AMI); the optimal load schedule is formed not on the basis of the predicted sets of power combinations of power consumers, but as a result of control of the inclusion limitation and a smooth change in the power of the controlled power consumers over time; in models of power consumption, the load is divided into controlled (undetectable and flexible power control) and uncontrolled, including random.

Conclusions: The presented research results are justified factors necessary for active consumers in the normal mode of intelligent energy systems and the possibilities of its practical implementation in an industrial enterprise with reference to the technological process.

Key words: digitalization, management, regulation, optimization, data analysis, real time, active consumers, electric power system, load schedule.