

## ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ / ECONOMICS

Научная статья

УДК [338.45 + 339.133]:621.31

<https://doi.org/10.35266/2949-3455-2024-4-1>



### Модель управления активными энергетическими комплексами в условиях интеграции с технологией управления спросом на электроэнергию

Анатолий Петрович Дзюба<sup>1✉</sup>, Александр Викторович Семиколонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский  
университет), Челябинск, Россия

<sup>1</sup>[dzyuba-a@yandex.ru](mailto:dzyuba-a@yandex.ru)<sup>✉</sup>

<sup>2</sup>[semikolenov83@yandex.ru](mailto:semikolenov83@yandex.ru)

**Аннотация.** Статья посвящена разработке модели управления активными энергетическими комплексами, действующими на промышленных предприятиях и управляемых на основе механизмов интеграции с технологией управления спросом на электроэнергию. В материалах проводится анализ механизмов ценообразования на поставку электроэнергии по всем сегментам стоимости электроэнергии: стоимость электрической энергии, стоимость электрической мощности, стоимость услуг по передаче электроэнергии, формируемых с учетом неравномерности графиков спроса на потребление электроэнергии. Разработаны структуры факторов, влияющих на неравномерность спроса на потребление электроэнергии на промышленном предприятии, и структуры факторов, действующих на работу системы распределенной генерации, работающей на промышленном предприятии. На основе проведенного исследования особенностей ценообразования на поставку электроэнергии для промышленных предприятий, особенностей функционирования систем распределенной генерации, внешних и внутренних факторов, влияющих на их работы, разработана модель управления активными энергетическими комплексами в условиях интеграции с технологией управления спросом на электроэнергию. Особенностью разработанной модели является анализ обращения электроэнергии в двух основных направлениях: направление внутреннего спроса потребления электроэнергии промышленным предприятием, направление выработки электроэнергии системой распределенной генерации. На основе данных, полученных в результате анализа двух основных направлений моделирования, проводится моделирование сценариев потребления электроэнергии предприятием и выработки электроэнергии системой распределенной генерации в рамках системы активного энергетического комплекса.

**Ключевые слова:** активные энергетические комплексы, управление спросом на электроэнергию, потребление электроэнергии, промышленная энергетика, рынок электроэнергии, система распределенной генерации, энерготарифы, энергоэффективность

**Для цитирования:** Дзюба А. П., Семиколонов А. В. Модель управления активными энергетическими комплексами в условиях интеграции с технологией управления спросом на электроэнергию // Вестник Сургутского государственного университета. 2024. Т. 12, № 4. С. 8–26. <https://doi.org/10.35266/2949-3455-2024-4-1>.

Original article

## Model of active energy complexes management in integration with electricity demand management technology

Anatoly P. Dzyuba<sup>1✉</sup>, Aleksandr V. Semikolenov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>1</sup>dzyuba-a@yandex.ru✉

<sup>2</sup>semikolenov83@yandex.ru

**Abstract.** The article focuses on developing a management model for active energy complexes. Industrial enterprises utilize these complexes, and their management integrates with demand response technology. The authors analyze the mechanisms of pricing for electricity supply for all segments of the electricity cost: the cost of electricity, the cost of electric capacity, the cost of electricity transmission services, formed taking into account the unevenness of demand schedules for electricity consumption. The structures of factors influencing the unevenness of demand for electricity consumption at an industrial enterprise and the structures of factors affecting the operation of the distributed generation system operating at an industrial enterprise have been developed. A management model for active energy complexes in the context of integration with the technology of demand management for electricity has been generated. This model is based on the features of pricing for electricity supply for industrial enterprises, the features of the functioning of distributed generation systems, external and internal factors influencing their work. A feature of the developed model is the analysis of electricity circulation in two main directions: the direction of internal demand for electricity consumption by an industrial enterprise, and the direction of electricity generation by a distributed generation system. Analyzing the two main directions, authors model scenarios of electricity consumption by the enterprise and electricity generation by the distributed generation system within the framework of the active energy complex system.

**Keywords:** active energy complexes, electricity demand management, electricity consumption, industrial energy, electricity market, distributed generation system, energy tariffs, energy efficiency

**For citation:** Dzyuba A. P., Semikolenov A. V. Model of active energy complexes management in integration with electricity demand management technology. *Surgut State University Journal*. 2024;12(4):8–26. <https://doi.org/10.35266/2949-3455-2024-4-1>.

### ВВЕДЕНИЕ

Отрасль электроэнергетики Российской Федерации за последние 15 лет претерпела существенные структурные и институциональные изменения, направленные на совершенствование управления отдельными элементами энергосистемы, повышения экономической эффективности функционирования отрасли, в том числе за счет внедрения механизмов оптового и розничного рынков электроэнергии, внедрения комплекса мер, направленных на повышение энергетической эффективности, обращение электрической энергии и смежных топливно-энергетических ресурсов. Среди современных механизмов, интенсивно внедряемых в практику деятельности крупных участников оптового и розничного рынка

электроэнергии – промышленных предприятий, присутствуют механизмы управления спросом на электроэнергию, реализуемые на базе ценозависимого регулирования графиками электропотребления [1, 2], и механизмы активных энергетических комплексов [3, 4]. Несмотря на то что больший интерес у мировых и отечественных исследователей вызывает использование технологии управления спросом [5–8], важнейшим направлением современных научных исследований является интеграция вышеописанных механизмов управления, которые объединены в рамках разработанной и представленной авторами модели управления активными энергетическими комплексами в условиях интеграции с технологией управления спросом на электроэнергию.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Форма графиков спроса на потребление электроэнергии промышленным предприятием характеризуется существенной неравномерностью, связанной с особенностью графиков работы основного и вспомогательного электропотребляющего оборудования, действующего на промышленных предприятиях [9]. На рис. 1 представлен пример почасового графика потребления электроэнергии промышленным предприятием за

календарный месяц. Как следует из рис. 1, спрос на потребление электроэнергии характеризуется циклическими подъемами и снижениями потребления электроэнергии в разрезе каждых суток, при этом форма внутрисуточного графика спроса характеризуется индивидуальными особенностями, связанными со спецификой деятельности каждого предприятия.

На рис. 2 представлены примеры почасовых графиков спроса на электроэнергию

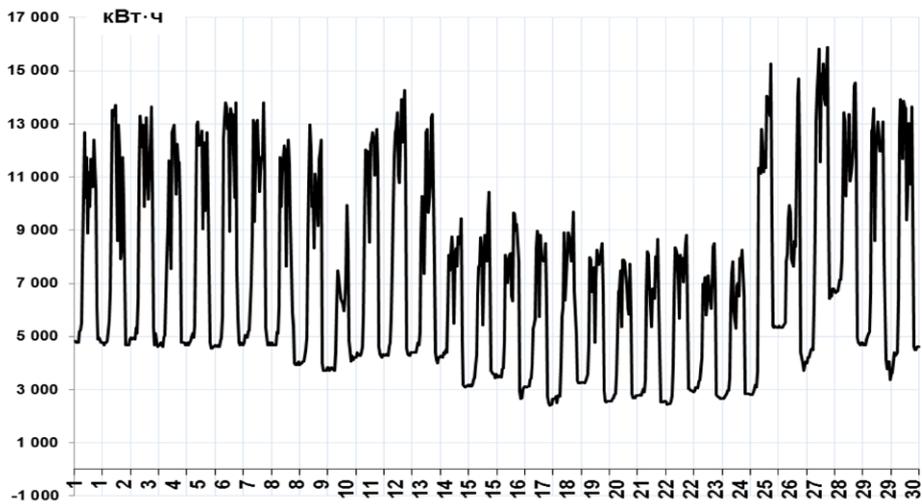


Рис. 1. Почасовой график потребления электроэнергии промышленным предприятием за календарный месяц

Примечание: составлено авторами на основе источника [10].

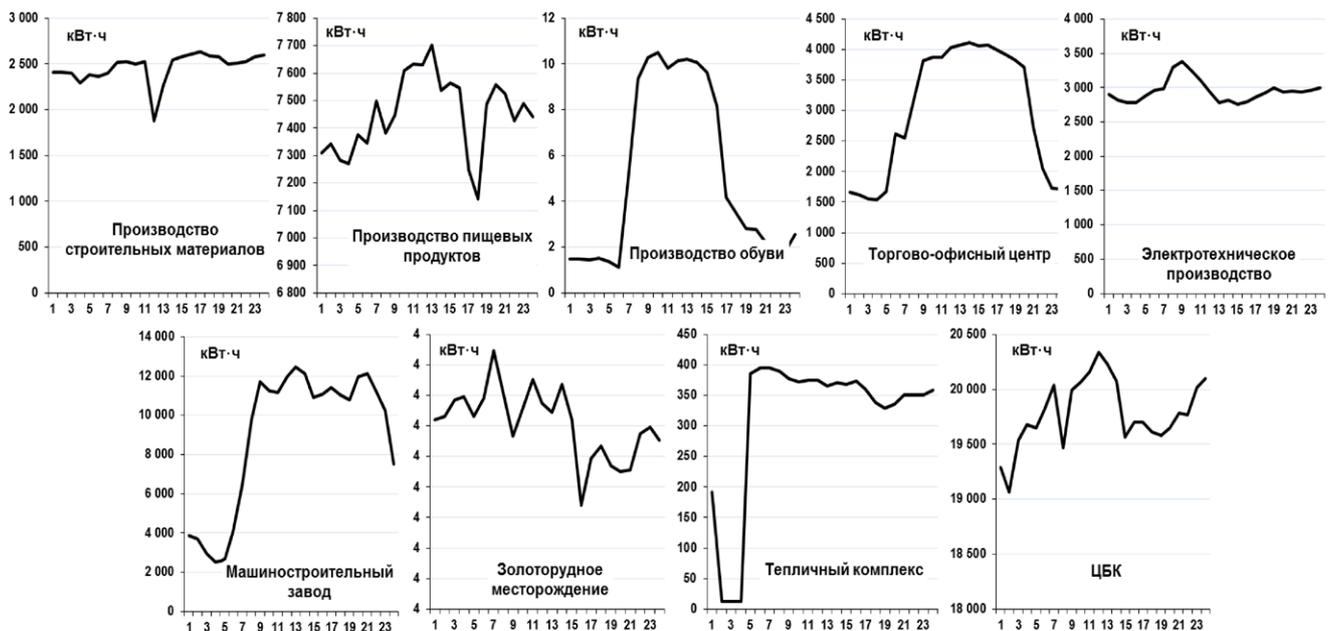


Рис. 2. Почасовые графики спроса на электроэнергию различных типов потребителей за типовые сутки

Примечание: составлено авторами на основе источников [3, 11, 12].

различных типов потребителей за типовые сутки. Как следует из рис. 2, в зависимости от специфики функционирования промышленного предприятия формы графиков спроса на потребление электроэнергии характеризуются индивидуальной спецификой, которая выражается в форме характера дневного пика, волатильности графика нагрузки, соотношения между дневным максимумом и ночным минимумом и т. д.

Особенности суточной формы графиков спроса различных типов промышленных предприятий связаны с особенностями электропотребляющего оборудования, формирующего спрос на электроэнергию, особенностями технологических процессов производства продукции, планов и графиков работы производственного оборудования на предприятиях [13]. На рис. 3 представлен пример графиков потребления электроэнергии и графики работы оборудования промышленного предприятия. Как следует из приведенного примера, в зависимости от режимов и времени работы того или иного оборудования,

действующего на промышленном предприятии, производится потребление электроэнергии из Единой энергетической системы с неравномерностью, формируемой работой производственного оборудования.

Неравномерность графиков работы и режимных параметров электропотребляющего оборудования на промышленных предприятиях связана с влиянием ряда факторов, а именно:

1. Производственные факторы – факторы, влияющие на изменение графиков электропотребления промышленных предприятий, связанные с графиками процессов производства продукции и графиками работы производственного оборудования на промышленном предприятии [14].

2. Режимные факторы – факторы, влияющие на изменение графиков электропотребления промышленных предприятий, связанные с регулированием режимов работы оборудования в рамках технологии производственных процессов каждой отдельной группы изделия.

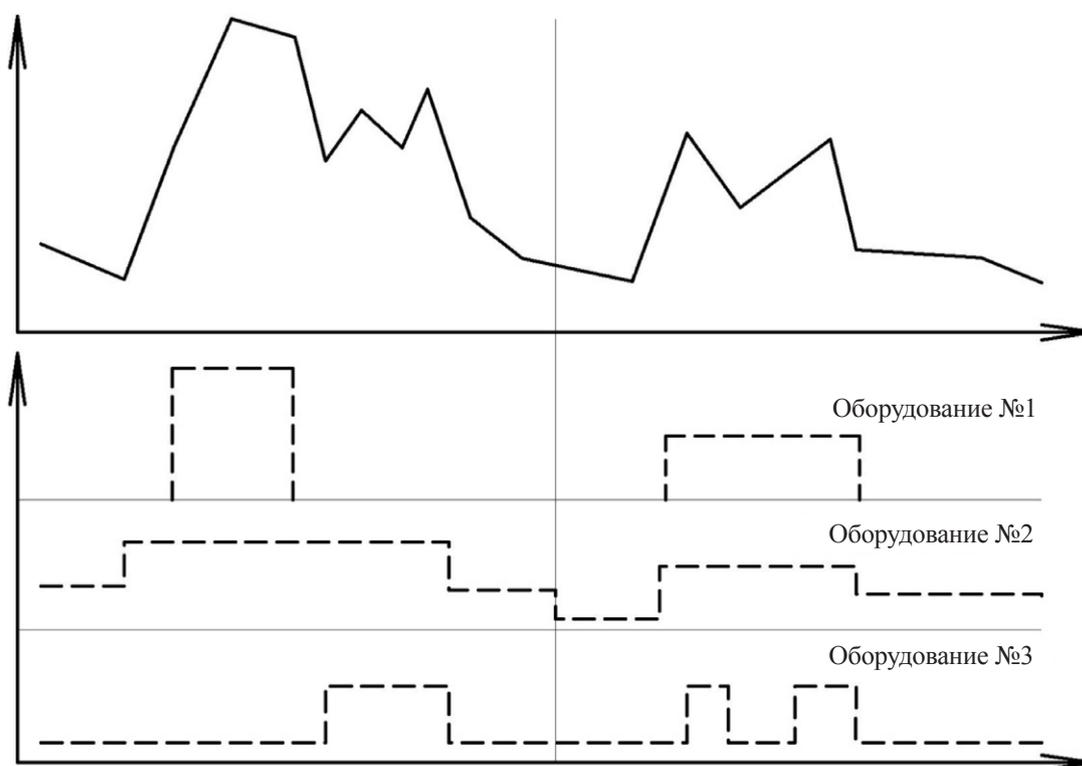


Рис. 3. Графики потребления электроэнергии и графики работы оборудования промышленного предприятия

Примечание: составлено авторами на основе источников [3, 11].

3. Метеорологические факторы – факторы, влияющие на изменение графиков электропотребления промышленных предприятий, связанные с влиянием изменения показателей окружающей среды, таких как температура воздуха, степень освещенности, интенсивность осадков и пр.

4. Социально-экономические факторы – факторы, влияющие на изменение графиков электропотребления промышленных предприятий, связанные с влиянием графиков работы предприятия, сменности работы производства, чередования выходных и рабочих дней.

При этом производственные и режимные факторы являются факторами прямыми, которые напрямую оказывают влияние на графики работы оборудования на предприятии, а метеорологические и социально-экономические факторы относятся к факторам косвенным, оказывающим опосредованное влияние на графики работы производственного и вспомогательного оборудования на промышленных предприятиях.

На рис. 4 представлена схема структуры влияния факторов на неравномерность спроса на потребление электроэнергии на промышленном предприятии.

Как следует из представленной схемы, производственные факторы напрямую воздействуют на характер графиков работы производственного оборудования предприятия, а режимные факторы напрямую воздействуют на характер режимов работы оборудования. Социально-экономические и метеорологические факторы воздействуют как на характер графиков работы, так и на характер режимов работы оборудования предприятия и по своему воздействию являются косвенными.

Действующие механизмы оптового и розничного рынков электроэнергии, действующие в России, предусматривают, во-первых, формирование конечной стоимости электроэнергии на основании стоимости отдельных сегментов, отражающих отдельный вид затрат на энергоснабжение, во-вторых, каждая составляющая стоимости отдельного сегмента формируется для каждого промышленного потребителя отдельно, на основании

индивидуального характера неравномерности графика спроса на потребление электроэнергии.

Стоимость закупаемой электрической энергии промышленными предприятиями России состоит из трех основных сегментов: стоимость электрической энергии, стоимость электрической мощности, стоимость услуг по передаче электроэнергии [15]. Также промышленные предприятия осуществляют оплату сбытовых надбавок гарантирующих поставщиков либо независимых энергосбытовых компаний, а также услуг инфраструктурных организаций оптового рынка (АО «АТС», АО «СО ЕЭС», ЗАО «ЦФР»). Однако, учитывая незначительную долю затрат на оплату таких услуг, а также что различные промышленные предприятия работают с разными поставщиками и имеют различные сбытовые надбавки, вопрос об управлении такими затратами был вынесен за рамки представленного исследования.

Сегмент «стоимость электрической энергии» отражает плату за удельную стоимость электроэнергии, вырабатываемой электростанциями энергосистемы [16]. Сегмент «стоимость электрической мощности» отражает плату потребителя электроэнергии за возможность неравномерного потребления электроэнергии из энергосистемы и увеличение графика электропотребления до максимально разрешенных значений [17]. Сегмент «стоимость услуги по передаче электроэнергии» отражает затраты энергосистемы на передачу и распределение вырабатываемой электроэнергии, в том числе и с учетом неравномерности спроса [18].

Сегмент стоимости электрической энергии рассчитывается по формуле (1).

$$S_{c_{э\text{э}}} = \sum [W_t \times P_t], \quad (1)$$

где  $W_t$  – почасовое потребление электроэнергии промышленного предприятия за исследуемый период (кВт·ч);

$P_t$  – цена на закупку сегмента электрической энергии, сформированная для промышленного предприятия (руб./кВт·ч).

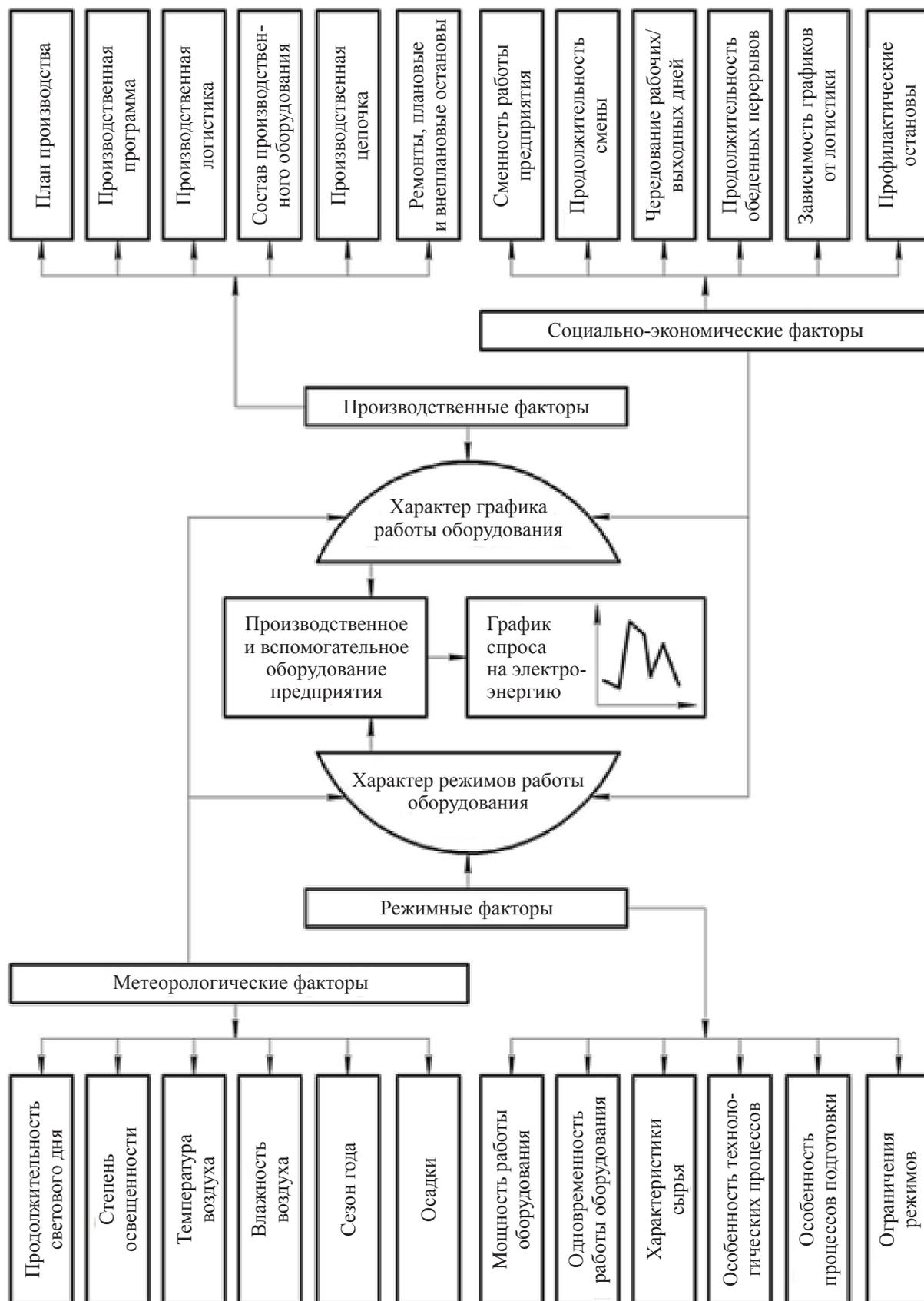


Рис. 4. Схема структуры влияния факторов на неравномерность спроса на потребление электроэнергии на промышленном предприятии

Примечание: составлено авторами на основе источника [3].

На рис. 5 представлен график примера почасовых цен на отпуск электрической энергии, действовавших на территории Тюменской области в ноябре 2021 г. Учитывая то, что цены на отпускаемую электрическую энергию характеризуются неравномерностью, повторяющей форму волатильности спроса на потребление электроэнергии, в дневной период суток стоимость электроэнергии, отпускаемой с оптового и розничного рынков электроэнергии, возрастает, а ночью, наоборот, снижается. Различия изменения цен в дневной и ночной период в некоторые сутки может достигать 55 %, что является значительным. Учитывая то, что доля сегмента стоимости электрической энергии в структуре общей стоимости закупок электроэнергии промышленных предприятий может достигать 40 %, различия цен в ночные и пиковые периоды суток может оказывать существенное влияние на общую стоимость электроэнергии, закупаемой промышленным предприятием.

Таким образом, при управлении суточной неравномерностью графика спроса на потребление электроэнергии промышленного предприятия можно достигать изменения стоимости сегмента закупаемой электрической энергии (2).

$$S_{c_{\text{ээ}}} = f(W_t). \quad (2)$$

Такое управление графиком спроса на потребление электроэнергии носит название «ценозависимое электропотребление» [3], представляющее собой управление неравномерностью графика почасового спроса на потребление электрической энергии промышленным предприятием из Единой энергетической системы в зависимости от ценовых сигналов энергорыночной среды по критериям минимизации стоимости закупок электроэнергии.

Ценозависимое потребление электроэнергии промышленными предприятиями также приводит к управлению спросом на потребление электрической энергии [19], что представляет собой инициативную форму экономического взаимодействия между субъектами электроэнергетики и потребителями электрической энергии, направленную на совместное выравнивание волатильности графиков спроса на потребление электроэнергии в масштабах Единой энергетической системы.

Реализация механизмов ценозависимого потребления электроэнергии позволяет получить эффект не только в виде снижения затрат на закупку электроэнергии каждого промышленного предприятия индивидуально, но и позволяет сокращать затраты Единой энергетической системы на обеспечение

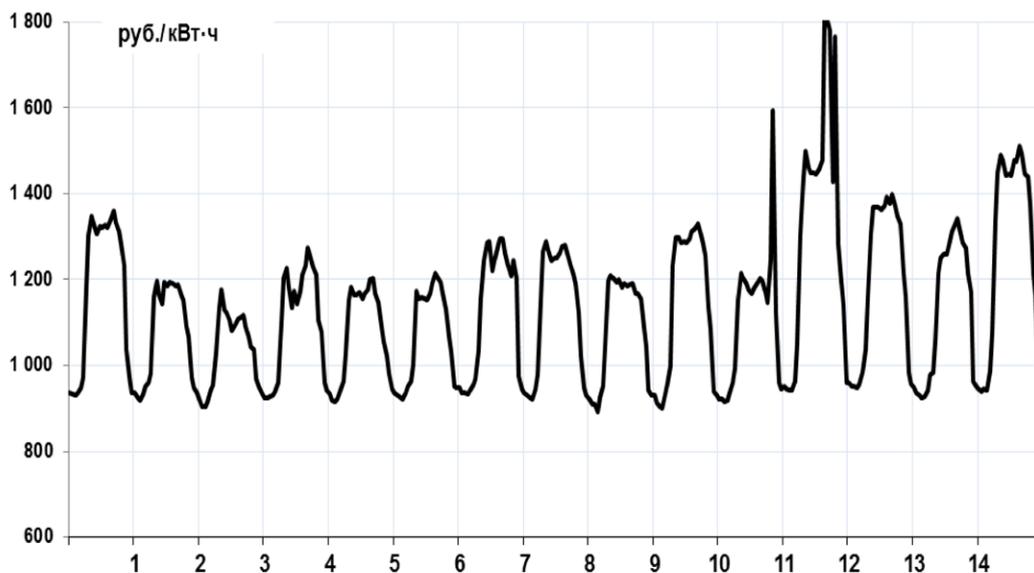


Рис. 5. Почасовые цены на отпуск электрической энергии, действовавшие на территории Тюменской области в ноябре 2021 г.

Примечание: составлено авторами на основе источника [10].

неравномерности спроса на электропотребление в энергосистеме, что также является значительным эффектом для электроэнергетики и экономики страны в целом.

Сегмент стоимости электрической мощности рассчитывается по формуле (3).

$$S_{c_{эм}} = T_{c_{эм},m} \times P_{эм,m}, \quad (3)$$

где  $T_{c_{эм},m}$  – величина мощности, принимаемая к расчету обязательств по покупке мощности промышленным предприятием в месяц  $m$  (кВт в месяц);

$P_{эм,m}$  – цена мощности, действующая для оплаты обязательств по покупке мощности промышленным предприятием в месяц  $m$  (руб./кВт в месяц);

Если  $P_{эм,m}$  для каждого расчетного месяца формируется на основе рыночного механизма ценообразования, то показатель  $T_{c_{эм},m}$  формируется на основе индивидуального графика спроса на потребление электроэнергии промышленным предприятием (4).

$$T_{c_{эм},m} = \overline{W_{t,m}} \ni T_{\text{пик\_регион\_СО}}, \quad (4)$$

где  $\overline{W_{t,m}}$  – среднее почасовое потребление электроэнергии промышленным предприятием за календарный месяц  $m$  (кВт);

$T_{\text{пик\_регион\_СО}}$  – час максимума региональной электроэнергетической системы региона в рабочие дни, выпавшие в периоды плановых часов пиковой нагрузки, определяемые АО «Системный оператор».

На рис. 6 представлен пример формирования величины  $\overline{W_{t,m}}$  для промышленного предприятия.

Как следует из примера, величина, принимаемая для расчета показателя  $\overline{W_{t,m}}$  для каждого суток, принимается в номер часа, в который сложился час максимума региональной электроэнергетической системы. При этом потребление электроэнергии в час максимума региональной энергосистемы промышленным предприятием может быть совершенно различным. Потребление в этот час может быть либо очень большим, либо очень маленьким, что существенно влияет на стоимость закупок электроэнергии по сегменту электрической мощности.

Таким образом, при управлении суточной неравномерностью графика спроса на потребление электроэнергии промышленным предприятием можно также достигать изменения стоимости сегмента закупаемой электрической мощности (5).

$$S_{c_{эм}} = f(W_t). \quad (5)$$

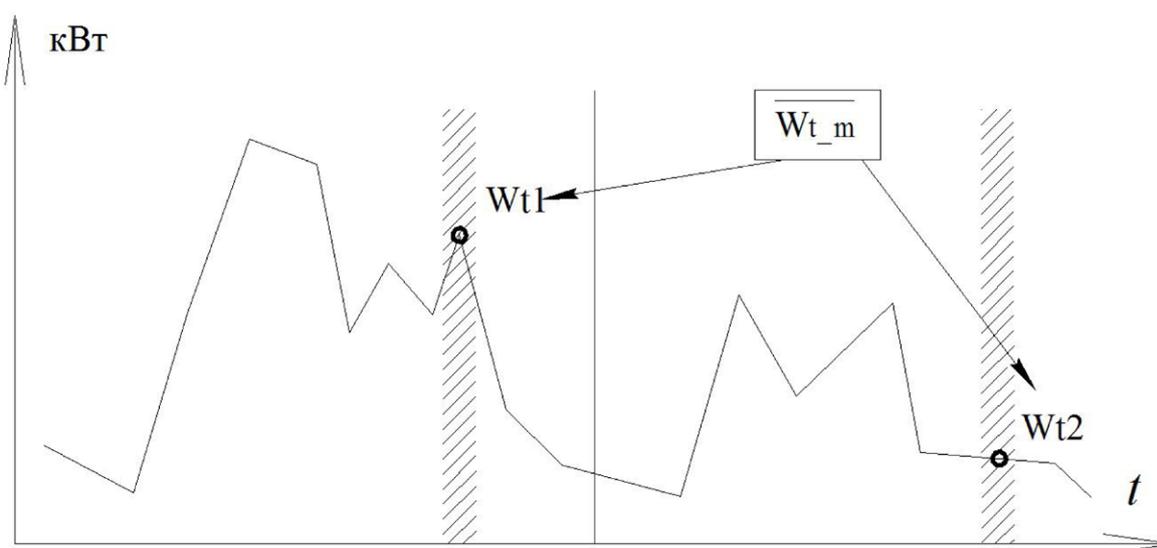


Рис. 6. Пример формирования величины  $\overline{W_{t,m}}$  для промышленного предприятия  
 Примечание: составлено авторами на основе источника [3].

В табл. 1 представлены номера часов максимума электроэнергетических систем некоторых регионов России за ноябрь 2021 г.

Как следует из табл. 1, несмотря на то что номера часов максимума электроэнергетической системы для разных регионов различны, но внутри каждого региона номера часов не различаются существенным размахом, что подчеркивает возможность выполнения их прогноза с достаточной степенью точности и, следовательно, высокой точностью ценозависимого управления электропотреблением по показателю сегмента стоимости электрической мощности.

Сегмент стоимости услуги по передаче электроэнергии для промышленных предприятий рассчитывается по формуле (6).

$$S_{c,п} = (T_{c,потери} \times \sum W_{t,m}) + (T_{c,сод} + \overline{W}_{п,m}), \quad (6)$$

где  $T_{c,потери}$  – ставка стоимости технологического расхода (потерь) в составе двухставочного тарифа на передачу электроэнергии (руб./кВт·ч);

$T_{c,сод}$  – ставка стоимости содержания электрических сетей в составе двухставочного тарифа на передачу электроэнергии (руб./кВт·ч);  
 $\sum W_{t,m}$  – месячное потребление электроэнергии промышленным предприятием (кВт·ч);

$\overline{W}_{п,m}$  – среднее почасовое потребление электроэнергии промышленным предприятием за календарный месяц  $m$  (кВт).

При этом из двух слагаемых формулы (3) составляющая  $T_{c,сод}$  является более значимой, а управление затратами по составляющей  $T_{c,сод}$  позволяет существенно сократить затраты на закупку электроэнергии по сегменту стоимости услуги по передаче. В зависимости от уровня расчетного напряжения,

Таблица 1

Номера часов максимума электроэнергетических систем некоторых регионов России за ноябрь 2021 г.

Дата	Кемеровская область	Красноярский край	Нижегородская область	Новосибирская область	Пермский край	Республика Башкортостан	Свердловская область	Республика Коми	Орловская область
01.11.2021	15	15	11	11	17	17	17	18	19
02.11.2021	15	14	11	15	17	17	17	19	19
03.11.2021	15	14	11	7	17	17	17	18	11
04.11.2022									
05.11.2022									
06.11.2023									
07.11.2023									
08.11.2021	15	15	11	8	17	17	17	18	11
09.11.2021	15	15	11	6	17	17	17	18	11
10.11.2021	15	6	10	7	17	17	17	18	11
11.11.2021	15	14	10	15	17	17	17	18	18
12.11.2021	15	15	10	8	17	17	16	10	11
13.11.2021									
14.11.2021									
15.11.2021	15	14	11	8	17	17	16	18	10
16.11.2021	14	15	11	15	17	9	17	19	10
17.11.2021	15	14	11	8	17	17	18	18	11
18.11.2021	15	14	10	8	16	17	17	18	11
19.11.2021	15	14	11	8	11	17	10	18	10
20.11.2021									
21.11.2021									
22.11.2021	15	15	11	8	16	17	16	18	11
23.11.2021	15	15	18	15	17	17	16	19	10
24.11.2021	15	15	10	7	17	17	16	18	11
25.11.2021	15	14	11	7	17	17	16	18	11
26.11.2021	15	14	10	7	16	17	10	18	11
27.11.2021									
28.11.2021									
29.11.2021	15	14	10	8	17	8	17	18	11
30.11.2021	15	14	11	7	16	17	17	18	11

Примечание: составлено авторами на основе источника [10].

по которому производится расчет стоимости услуги по передаче (НН, СН2, СН1, ВН), составляющая стоимости услуги по передаче электроэнергии в структуре тарифа может достигать 50–60 %.

На рис. 7 представлен пример формирования величины  $\overline{W_{п.м}}$  для промышленного предприятия. Как следует из примера, вне зависимости от внешних факторов на величину  $\overline{W_{п.м}}$  оказывает влияние исключительно лишь величина внутреннего спроса на электропотребление промышленным предприятием, которым предприятие может управлять.

Таким образом, при управлении суточной неравномерностью графика спроса на потребление электроэнергии промышленным предприятием можно также достигать изменения

стоимости сегмента стоимости услуг по передаче электроэнергии (7).

$$S_{с.п} = f(W_t). \quad (7)$$

В табл. 2 представлены интервалы периодов плановых часов пиковой нагрузки энергосистемы территорий первой и второй ценовой зоны на 1-е полугодие 2022 г.

Как следует из табл. 2, периоды плановых часов пиковой нагрузки утверждаются заблаговременно до начала календарного года и заранее известны промышленным предприятиям, что позволяет выполнять управление графиками спроса по показателям минимизации стоимости услуг по передаче электроэнергии [21, 22].

Таким образом, все составляющие стоимости электроэнергии, закупаемые промышленными

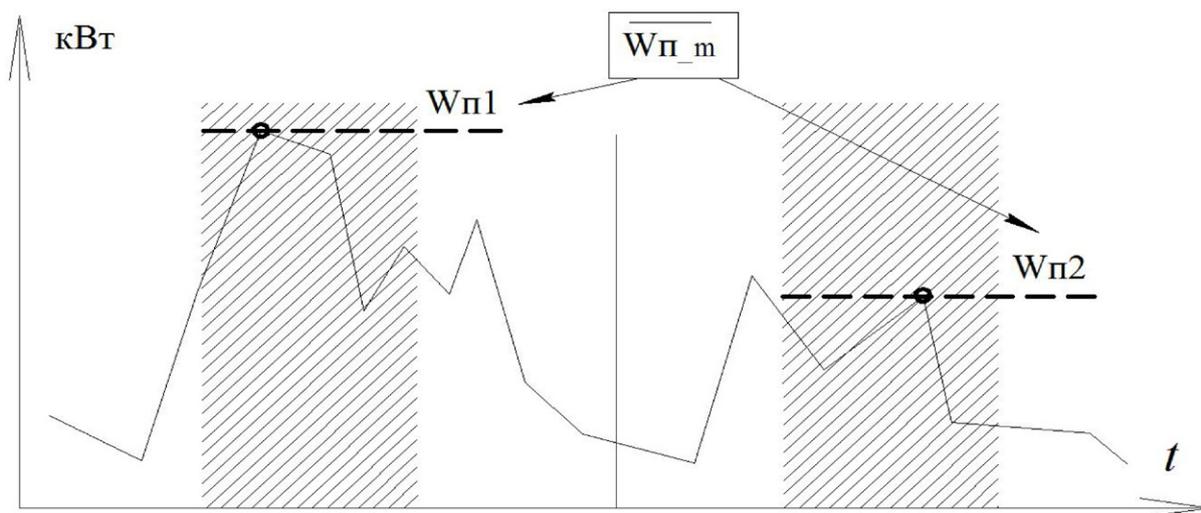


Рис. 7. Пример формирования величины  $\overline{W_{п.м}}$  для промышленного предприятия  
 Примечание: составлено авторами на основе источника [3].

Таблица 2

**Период плановых часов пиковой нагрузки энергосистемы территорий первой и второй ценовой зоны на 1-е полугодие 2022 г.**

	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
Для первой ценовой зоны	с 8-го по 21-й час	с 8-го по 13-й и с 17-го по 21-й час	с 8-го по 21-й час	с 8-го по 15-й и с 18-го по 21-й час	с 8-го по 15-й и с 20-го по 21-й час	с 8-го по 16-й и с 20-го по 21-й час
Для второй ценовой зоны	с 5-го по 8-й и с 11-го по 17-й час	с 5-го по 8-й и с 12-го по 17-й час	с 5-го по 8-й и с 13-го по 17-й час	с 5-го по 8-й и с 13-го по 17-й час	с 5-го по 8-й и с 13-го по 17-й час	с 5-го по 8-й и с 13-го по 17-й час

Примечание: составлено авторами на основе источника [20].

предприятиями на розничном и оптовом рынках электроэнергии, зависят от стоимости трех сегментов, а именно стоимость электрической энергии, стоимость электрической мощности, стоимость услуг по передаче электроэнергии, стоимость которых напрямую связана с характером собственных графиков электрических нагрузок предприятия (8).

$$S_c = S_{c_{\text{ээ}}} + S_{c_{\text{эм}}} + S_{c_{\text{п}}} = f(W_t), \quad (8)$$

где  $S_c$  – стоимость закупаемой электроэнергии промышленным предприятием (руб.).

Применительно к управлению затратами на электроэнергию в рамках активных энергетических комплексов разница между оптовым и розничным рынками электроэнергии по управлению сегментами стоимости электрической энергии, электрической мощности и услугами по передаче электроэнергии отсутствует. Это связано с рядом ключевых причин, а именно:

- применительно к сегменту стоимости электрической энергии цены на электроэнергию для промышленных потребителей аналогичны как для оптового, так и для розничного рынка. Во-первых, отдельные промышленные потребители не оказывают значительного влияния на цены и на закупку электроэнергии. Во-вторых, на розничный рынок транслируются такие же показатели почасовых цен, как закупаются гарантирующими поставщиками на оптовом рынке;

- применительно к сегменту стоимости электрической мощности все промышленные потребители, действующие как в рамках оптового, так и в рамках розничных рынков электроэнергии, оплачивают электрическую мощность по единым ценам, формируемым в рамках зон свободного перетока мощности. Также принцип определения величины обязательств по оплате мощности на оптовом и розничном рынках полностью аналогичен;

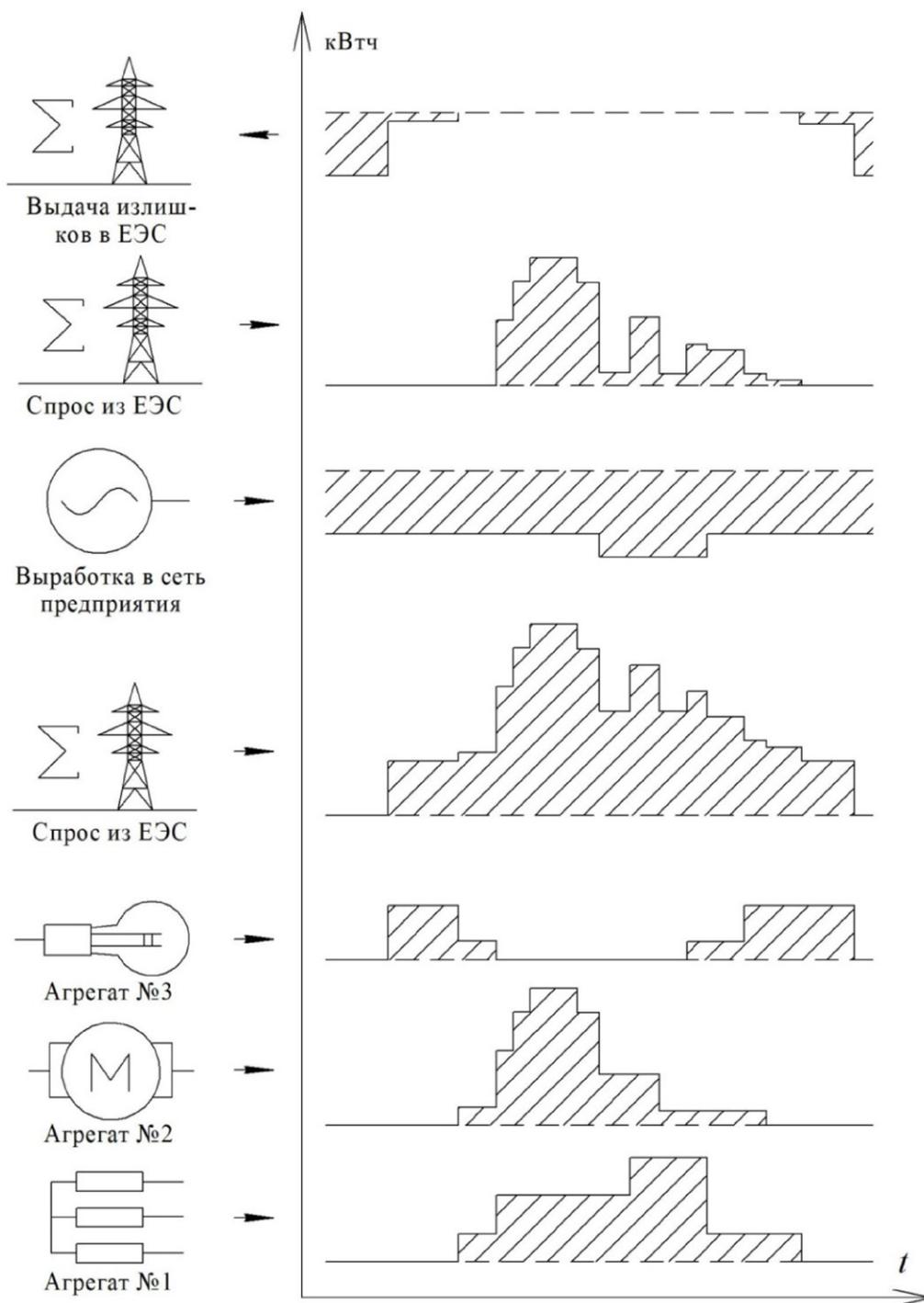
- применительно к сегменту стоимости услуг по передаче электроэнергии порядок его оплаты полностью идентичен для участников оптового и розничного рынков электроэнергии.

Таким образом, ценозависимое управление графиками электропотребления промышленных предприятий по показателям минимизации стоимости электроэнергии позволяет существенно снижать затраты на закупку электроэнергии из Единой энергетической системы.

Система распределенной генерации электрической энергии, действующая в составе промышленного предприятия, производит выработку электрической энергии во внутреннюю сеть промышленного предприятия, тем самым замещая объемы потребления предприятием электрической энергии из Единой энергетической системы на объемы выработки электроэнергии в сеть предприятия. Таким образом, управление графиком выработки электроэнергии в сеть промышленного предприятия позволяет управлять графиком спроса на потребление электроэнергии промышленным предприятием из Единой энергетической системы и тем самым управлять затратами на закупку электроэнергии по всем компонентам ее стоимости, а именно электрической энергии, электрической мощности, стоимости услуг по передаче электроэнергии.

На рис. 8 представлена схема выработки электроэнергии системой распределенной генерации в сеть промышленного предприятия, отражающая последовательность учета отдельных компонентов активного энергетического комплекса в условиях интеграции с механизмами управления спросом. Как следует из схемы, первичным элементом являются факторы, действующие на модель управления со стороны энергосистемы, под которые подстраиваются системы активных энергетических комплексов.

На рис. 9 представлена схема структуры влияния факторов на работу системы распределенной генерации, действующей на промышленном предприятии. Как следует из схемы, на работу системы распределенной генерации оказывают воздействие как внутренние, так и внешние факторы работы промышленного предприятия. К внутренним факторам относятся характеристики спроса на потребление электроэнергии промышленным предприятием, режим работы системы распределенной генерации



**Рис. 8. Схема выработки электроэнергии системой распределенной генерации в сеть промышленного предприятия**

*Примечание:* составлено авторами на основе источника [3].

электроэнергии. К внешним факторам относятся системные ограничения и возможности функционирования электроэнергетической системы промышленного предприятия, в том числе в части выработки электроэнергии в сеть. Также к косвенным факторам, влияющим на работу

системы распределенной генерации, относятся факторы ценовые.

Характеристики спроса на потребление электроэнергии промышленным предприятием как состав внутренних факторов, влияющих на работу системы распределенной генерации,

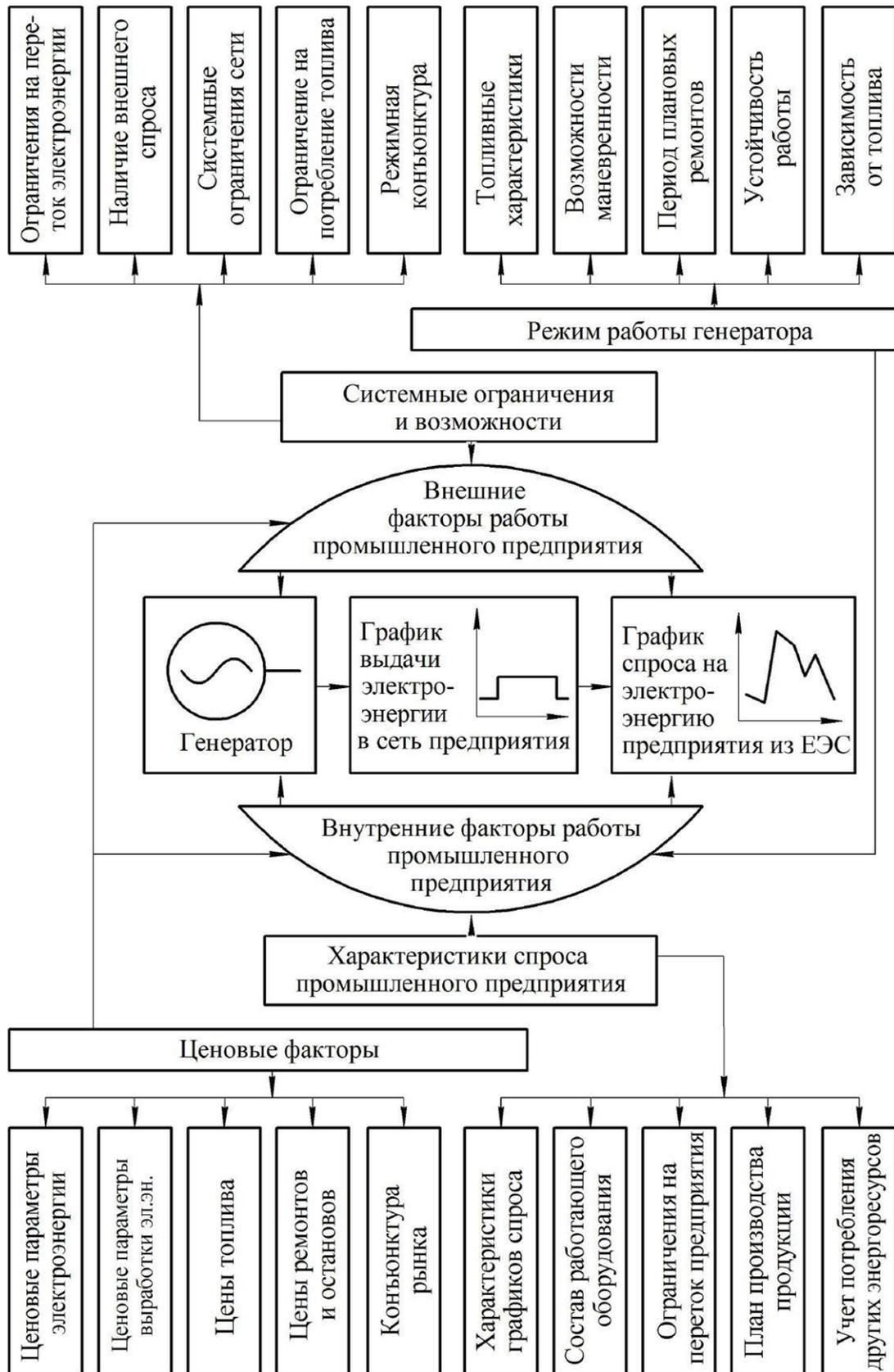


Рис. 9. Схема структуры влияния факторов на работу системы распределенной генерации, действующей на промышленном предприятии

Примечание: составлено авторами на основе источника [3].

выражается в особенностях внутренней неравномерности спроса на потребление электроэнергии промышленным предприятием, что вводит ограничения и возможности к выработке электроэнергии системой распределенной генерации в сеть промышленного предприятия и управлением графиком выработки. Режим работы системы распределенной генерации электроэнергии, состав внутренних факторов, влияющих на работу системы распределенной генерации, определяет режимы и возможности выработки электроэнергии системой распределенной генерации с учетом внутренних ограничений по технологии и маневренности управления работой генератора.

В качестве группы внешних факторов выступают системные ограничения и возможности функционирования электроэнергетической системы промышленного предприятия, которые выражаются в ограничениях возможностей перетока электроэнергии, топливных ограничениях, ограничениях поставок топлива и пр.

В качестве основных косвенных факторов, влияющих на работу системы распределенной генерации, выделены факторы ценовые, которые выражаются в ценах на производство электроэнергии системой распределенной генерации, ценах альтернативной стоимости закупок электроэнергии из энергосистемы, в том числе в зависимости от периода времени и от характера графика неравномерности спроса, ценах на топливо, ценах на ремонты системы распределенной генерации и пр.

#### **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

На основе проведенного исследования особенностей ценообразования на поставку электроэнергии для промышленных предприятий, особенностей функционирования систем распределенной генерации, внешних и внутренних факторов, влияющих на их работу, разработана модель управления активными энергетическими комплексами в условиях интеграции с технологией управления спросом на электроэнергию (рис. 10).

В рамках реализации модели проводится анализ обращения электроэнергии в двух основных направлениях: направление внутрен-

него спроса потребления электроэнергии промышленным предприятием, направление выработки электроэнергии системой распределенной генерации.

В направлении внутреннего спроса потребления электроэнергии промышленным предприятием производится анализ планов производства промышленного предприятия, графиков поставки сырья и работы оборудования, на основе которых выполняется прогноз планового почасового потребления электроэнергии промышленным предприятием. На основе планового почасового графика потребления электроэнергии производится прогноз параметров стоимости закупок электроэнергии по основным сегментам стоимости. На основе полученной плановой стоимости электроэнергии производится анализ возможностей оптимизации стоимости электроэнергии на основе ценозависимого управления графиками электропотребления. Производится моделирование различных вариантов изменения графиков работы производственного оборудования с учетом критериев минимизации стоимости электроэнергии.

В направлении выработки электроэнергии системой распределенной генерации на основе анализа почасовых планов выработки электроэнергии, договорных величин потребления газа, планов ремонтов и остановов оборудования производится планирование графиков выработки электроэнергии системой распределенной генерации в сеть промышленного предприятия. На основе плановых графиков выработки производится прогноз ценовых параметров производства электроэнергии системой распределенной генерации по основным сегментам стоимости. На основе полученных параметров стоимости выработки электроэнергии производится анализ возможностей оптимизации стоимости выработки и моделирование различных графиков выработки электроэнергии по критериям минимизации стоимости производства системой распределенной генерации для промышленного предприятия.

На основе данных, полученных в результате анализа двух основных направлений моделирования, проводится моделирование

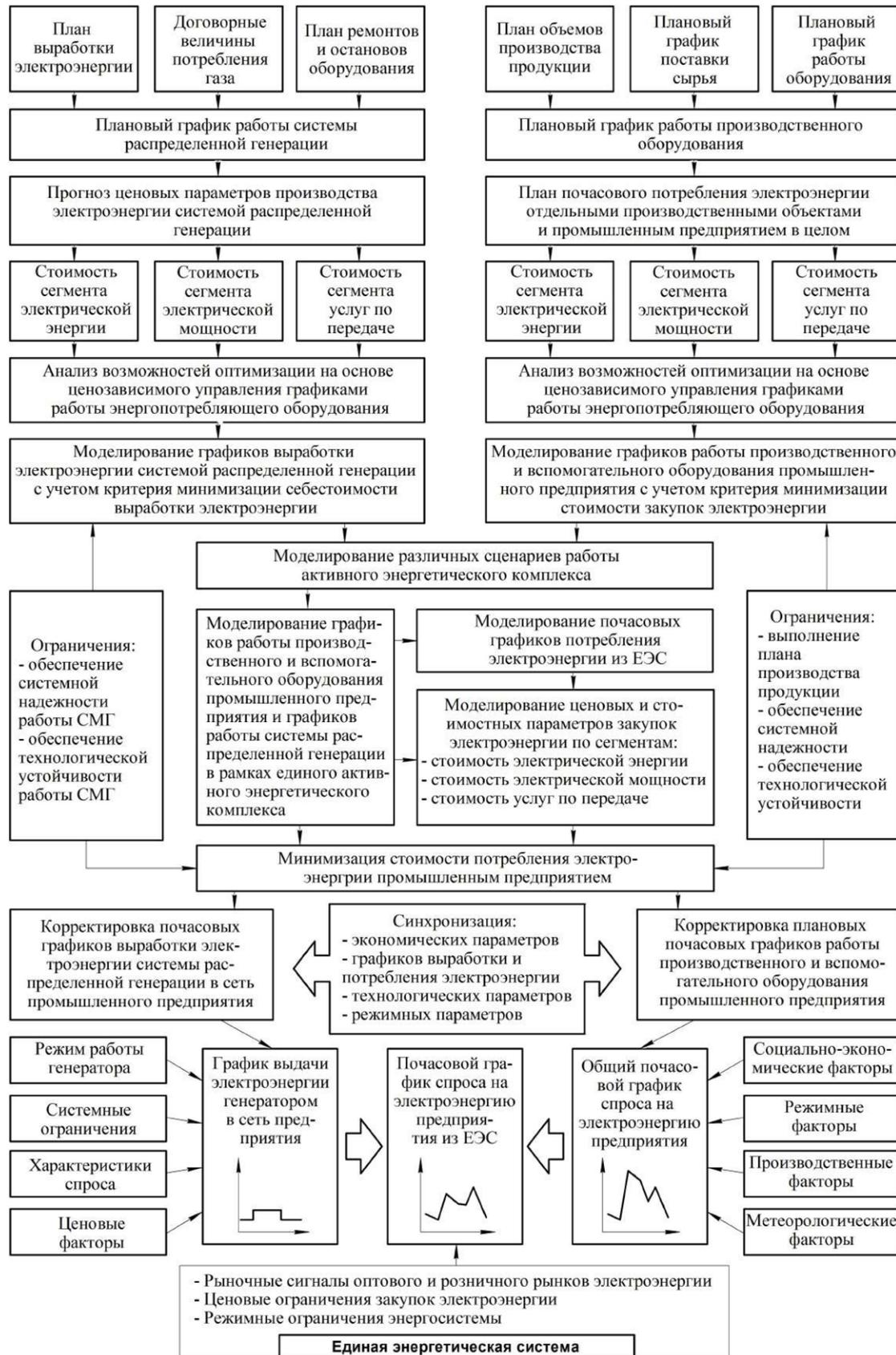


Рис. 10. Модель управления активными энергетическими комплексами в условиях интеграции с технологией управления спросом на электроэнергию  
Примечание: составлено авторами на основе источника [3].

сценариев потребления электроэнергии предприятием и выработки электроэнергии системой распределенной генерации в рамках системы активного энергетического комплекса. В рамках работы активного энергетического комплекса проводится моделирование графиков работы оборудования, моделирование ценозависимого управления почасовыми графиками потребления и выработки электроэнергии, моделирование ценовых параметров закупок электроэнергии при различных вариантах графиков спроса на электроэнергию по критериям минимизации потребления электроэнергии промышленным предприятием.

Моделирование производится с учетом существующих ограничений в виде необходимости выполнения плана производства продукции предприятием, обеспечения системной надежности работы предприятия и технологической устойчивости работы оборудования промышленного предприятия и системы распределенной генерации.

На основании полученных результатов производится корректировка плановых почасовых графиков работы производственного и вспомогательного оборудования на промышленном предприятии, планирование графиков почасовой выработки электроэнергии системой распределенной генерации. Производится синхронизация плановых параметров работы предприятия и системы распределенной генерации по экономическим параметрам, графикам потребления выработки электроэнергии, технологическим параметрам и режимным параметрам. Потребление электроэнергии, не покрытое выработкой системы распределенной генерации, происходит из Единой энергетической системы по условиям поставки электроэнергии с оптового либо розничного рынков электроэнергии, что учитывается при моделировании работы активного энергетического комплекса.

Таким образом, в рамках работы модели управления активными энергетическими комплексами в условиях интеграции с технологией управления спросом на электроэнергию производится анализ внутренних и внешних параметров работы промышленного предприятия и системы распределенной генерации,

анализ факторов в рамках единой системы активного энергетического комплекса с условием одновременного потребления электроэнергии промышленным предприятием из Единой энергетической системы по условиям оптового и розничного рынка электроэнергии. В рамках функционирования модели проводится планирование систем работы промышленного предприятия и распределенной генерации, прогнозирование спроса на потребление электроэнергии и параметров рынка электроэнергии, моделирование различных сценариев работы отдельных элементов системы и активного энергетического комплекса в целом.

Модель управления АЭК может применяться абсолютно всеми потребителями, субъектами оптового рынка электроэнергии, закупаящими электроэнергию как через независимую энергосбытовую компанию (далее – НЭСК), так и напрямую на оптовом рынке. Это объясняется следующими условиями: во-первых, при закупке электроэнергии через НЭСК последняя осуществляет закупку компонентов стоимости электроэнергии на оптовом рынке в соответствии с графиком нагрузки каждой отдельной группы точек поставки, во-вторых, оплата компонента услуг на передачу электроэнергии осуществляется по единым для всех механизмам, как при работе через НЭСК, так и при работе на розничном и оптовом рынках.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В качестве заключительных выводов можно констатировать следующее.

1. По результатам исследования форм почасовых графиков нагрузок на электропотребление промышленными предприятиями была выявлена неравномерность суточного спроса. Для промышленных предприятий неравномерность спроса связана с влиянием ряда ключевых факторов, таких как производственные, режимные, метеорологические, социально-экономические, действия которых в разной степени влияют на волатильность спроса. Разработанная авторская схема структуры влияния факторов на неравномерность спроса на потребление электроэнергии на промышленном предприятии

систематизирует действие различного рода факторов на неравномерность спроса на электропотребление и приращает знания в области управления графиками электропотребления промышленными предприятиями.

2. По результатам эмпирического исследования стоимости основных сегментов, на основе которых формируется стоимость закупок электрической энергии и мощности промышленными предприятиями России на оптовом и розничном рынках электроэнергии (а именно стоимость электрической энергии, стоимость электрической мощности, стоимость услуг по передаче электроэнергии), авторами сделаны выводы о возможности ценозависимого управления спросом на электроэнергию на основе всех сегментов. В первую очередь управление спросом на электроэнергию является наиболее эффективным по сегментам стоимости услуг по передаче электроэнергии при расчете по двухставочному тарифу, а также по сегменту стоимости электрической мощности.

3. Разработанная схема выработки электроэнергии системой распределенной генерации в сеть промышленного предприятия отражает последовательность учета отдельных компонентов активного энергетического комплекса в условиях интеграции с механизмами управления спросом. Как следует из схемы, первичным элементом являются факторы, действующие на модель управления со стороны энергосистемы, под которые подстраиваются системы активных энергетических комплексов.

4. Представленная авторская схема структуры влияния факторов на работу системы распределенной генерации, действующей на промышленном предприятии, позволяет

сделать вывод о том, что на работу системы распределенной генерации оказывают воздействие как внутренние, так и внешние факторы работы промышленного предприятия. К внутренним факторам относятся характеристики спроса на потребление электроэнергии промышленного предприятия, режим работы системы распределенной генерации электроэнергии. К внешним факторам относятся системные ограничения и возможности функционирования электроэнергетической системы промышленного предприятия, в том числе в части выработки электроэнергии в сеть. Также к косвенным факторам, влияющим на работу системы распределенной генерации, относятся факторы ценовые.

5. Разработанная модель управления активными энергетическими комплексами в условиях интеграции с технологией управления спросом на электроэнергию охватывает учет и анализ внутренних и внешних параметров работы промышленного предприятия и системы распределенной генерации, анализ факторов в рамках единой системы активного энергетического комплекса с условием одновременного потребления электроэнергии промышленным предприятием из Единой энергетической системы по условиям оптового и розничного рынков электроэнергии. В рамках функционирования модели проводится планирование систем работы промышленного предприятия и распределенной генерации, прогнозирование спроса на потребление электроэнергии и параметров рынка электроэнергии, моделирование различных сценариев работы отдельных элементов системы и активного энергетического комплекса в целом.

#### Список источников

1. Гительман Л. Д., Ратников Б. Е., Кожевников М. В. и др. Управление спросом на энергию: уникальная инновация для российской электроэнергетики : моногр. Екатеринбург, 2013. 120 с.
2. Петров В. Л., Кузнецов Н. М., Морозов И. Н. Управление спросом на электроэнергию в горно-промышленном секторе на основе интеллектуальных электроэнергетических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 2. С. 169–180. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_2\\_0\\_169](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_169).

#### References

1. Gitelman L. D., Ratnikov B. E., Kozhevnikov M. V. et al. Upravlenie sprosom na energiyu: unikalnaya innovatsiya dlya rossiyskoy elektroenergetiki. Monograph. Yekaterinburg; 2013. 120 p. (In Russ.).
2. Petrov V. L., Kuznetsov N. M., Morozov I. N. Electric energy demand management in mining industry using smart power grids. *Mining Informational Analytical Bulletin*. 2022;(2):169–180. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_2\\_0\\_169](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_2_0_169). (In Russ).
3. Dzyuba A. P., Semikolenov A. V. Upravlenie aktivnyimi energeticheskimi kompleksami promyshlennykh

3. Дзюба А. П., Семиколонов А. В. Управление активными энергетическими комплексами промышленных предприятий в условиях рынка электроэнергии (мощности) России : моногр. Челябинск, 2022. 148 с.
4. Дзюба А. П., Семиколонов А. В. Исследование мировых энергетических трендов, влияющих на развитие активных энергетических комплексов // Вестник Удмуртского университета. Серия «Экономика и право». 2023. Т. 33, № 1. С. 37–49. <https://doi.org/10.35634/2412-9593-2023-33-1-37-49>.
5. Ханаев В. В. Управление спросом на электроэнергию как дополнение к распределённой генерации // Энергетическая политика. 2020. № 4. С. 38–51.
6. Леснова А. В., Сташко В. И. Управление спросом на электроэнергию как способ экономии затрат // Интеллектуальная энергетика : сб. науч. ст. Барнаул, 2021. С. 295–297.
7. Райхлин С. М., Невская М. А., Виноградова В. В. и др. Управление спросом на электроэнергию как направление в развитии подходов к повышению энергоэффективности в России // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. 2022. № 12. С. 240–245.
8. Никишина М. В., Ивановский Д. А. Управление спросом на электроэнергию в России: текущее состояние и перспективы развития // Энергоэксперт. 2023. № 1. С. 52–56.
9. Журавков М. Л., Николаев А. В., Кычкин А. В. и др. Исследование инструментов цифровых трансформаций подземных горнодобывающих предприятий в аспекте управления спросом на электроэнергию // Уголь. 2023. № 9. С. 55–62. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-55-62>.
10. Администратор торговой системы. URL: <https://www.atsenergo.ru> (дата обращения: 24.03.2024).
11. Регионы России. Основные характеристики субъектов Российской Федерации. 2023 : стат. сб. / Росстат. М., 2023. 853 с.
12. World energy transitions outlook 2022. International Renewable Energy Agency (IRENA). 2022. URL: <https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2022> (дата обращения: 24.03.2024).
13. Роголёв Н. Д., Зубкова А. Г., Мастерова И. В. и др. Экономика энергетики. М. : МЭИ, 2005. 288 с.
14. Дзюба А. П., Семиколонов А. В. Региональные особенности волатильности спроса на электроэнергию в России // Наука ЮУрГУ. Секции экономических наук : материалы 75-й науч. конф. Челябинск : Изд. Центр ЮУрГУ, 2023. С. 31–39.
15. Дзюба А. П., Семиколонов А. В. Совершенствование управления энергоснабжением промышленных предприятий в условиях развития систем распределённой генерации // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. 2022. № 2. С. 49–63.
16. Dzyuba A. P., Semikolenov A. V. Management of active energy complexes in conditions of integration into the Russian industry. *Bulletin of the South Ural State University. Series Economics and Law*. 2023;33(1):37–49. <https://doi.org/10.35634/2412-9593-2023-33-1-37-49>. (In Russ.).
17. Khanaev V. V. The demand side management as an addition to the distributed generation. *Energy Policy*. 2020;(4):38–51. (In Russ.).
18. Lesnova A. V., Stashko V. I. Upravlenie sprosom na elektroenergiyu kak sposob ekonomii zatrat. In: *Collection of Scientific Articles "Intellektualnaya energetika"*. Barnaul; 2021. p. 295–297. (In Russ.).
19. Raikhlin S. M., Nevskaya M. A., Vinogradova V. V. et al. Power demand management as a direction in the development of approaches to improving energy efficiency in Russia. *Competitiveness in a global world: economics, science, technology*. 2022;(12):240–245. (In Russ.).
20. Nikishina M. V., Ivanovsky D. A. Upravlenie sprosom na elektroenergiyu v Rossii: tekushchee sostoyanie i perspektivy razvitiya. *EnergoEkspert*. 2023;(1):52–56. (In Russ.).
21. Zhuravkov M. L., Nikolaev A. V., Kychkin A. V. et al. Research of the digital transformation tools for the underground mining enterprises from an electricity demand response perspective. *Ugol'*. 2023;(9):55–62. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-9-55-62>. (In Russ.).
22. Administrator trgovoy sistemy. URL: <https://www.atsenergo.ru> (accessed: 24.03.2024). (In Russ.).
23. Regiony Rossii. Osnovnye kharakteristiki subektov Rossiyskoy Federatsii. Moscow: Rosstat; 2023. 853 p. (In Russ.).
24. World energy transitions outlook 2022. International Renewable Energy Agency (IRENA). 2022. URL: <https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2022> (accessed: 24.03.2024).
25. Rogalev N. D., Zubkova A. G., Masterova I. V. et al. *Ekonomika energitiki*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute; 2005. 288 p. (In Russ.).
26. Dzyuba A. P., Semikolenov A. V. Regionalnye osobennosti volatilnosti sprosa na elektroenergiyu v Rossii. In: *Proceedings of the 75th Scientific and Practical Conference Nauka YuUrGU. Sekcii ekonomicheskikh nauk*. Chelyabinsk: South Ural State University; 2023. p. 31–39. (In Russ.).
27. Dzyuba A. P., Semikolenov A. V. Improving the Management of Energy Supply to Industrial Enterprises in the Context of the Development of Distributed Generation Systems. *ESSUTM Bulletin*. 2022;(2): 49–63. (In Russ.).
28. Dzyuba A. P., Semikolenov A. V. Methodological approach to the management of active energy complexes in conditions of integration into the Russian industry. *Bulletin of the South Ural State University. Series Economics and Law*. 2023;33(1):37–49. <https://doi.org/10.35634/2412-9593-2023-33-1-37-49>. (In Russ.).

16. Дзюба А. П., Семиколонов А. В. Методический подход к управлению активными энергетическими комплексами в контексте интеграции в промышленность России // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Экономика и менеджмент». 2022. Т. 16, № 3. С. 66–81. <https://doi.org/10.14529/em220308>.
17. Гительман Л. Д., Кожевников М. В., Ратников Б. Е. Энергетический переход. Руководство для реалистов. М. : СОЛОН-пресс, 2023. 396 с.
18. Мастепанов А. М. Топливно-энергетический комплекс России на рубеже веков – состояние, проблемы и перспективы развития. 3-е изд., перераб. и доп. Новосибирск : Наука, 2010. 792 с.
19. Горнштейн В. М., Мирошниченко Б. П., Пономарев А. В. и др. Методы оптимизации режимов энергосистем. М. : Энергия. 1981. 336 с.
20. Системный оператор Единой энергетической системы. URL: <https://www.so-ups.ru/news/newonsite-view/news/20494/> (дата обращения: 24.03.2024).
21. Некрасов С. А. Снижение издержек на интеграцию возобновляемых источников электроэнергии в энергосистему – путь повышения доступности возобновляемой энергетики // Теплоэнергетика. 2021. № 8. С. 5–16.
22. Дзюбенко В. В. Развитие рынка систем хранения электроэнергии в России: предпосылки и основные драйверы // Энергоэксперт. 2022. № 1. С. 15–17.
- Economics and Management*. 2022;16(3):66–81. <https://doi.org/10.14529/em220308>. (In Russ.).
17. Gitelman L. D., Kozhevnikov M. V., Ratnikov B. E. Energy Transition. A Guide for Realists. Moscow: SOLON-Press; 2023. 396 p. (In Russ.).
18. Mastepanov A. M. Toplivno-energeticheskiy kompleks Rossii na rubezhe vekov – sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya. 3d ed. rev. ed. Novosibirsk: Nauka; 2010. 792 p. (In Russ.).
19. Gornshhteyn V. M., Miroshnichenko B. P., Ponomarev A. V. et al. Metody optimizatsii rezhimov energosistem. Moscow: Energiya; 1981. 336 p. (In Russ.).
20. Russian power system operator. URL: <https://www.so-ups.ru/news/newonsite-view/news/20494/> (accessed: 24.03.2024). (In Russ.).
21. Nekrasov S. A. Reducing Costs for Integration of Renewable Energy Sources: A Way to Making Renewable Energy More Accessible. *Teploenergetika*. 2021;(8):5–16. (In Russ.).
22. Dzyubenko V. V. Razvitie rynka sistem khraneniya elektroenergii v Rossii: predposylki i osnovnye drayvery. *Energoekspert*. 2022;(1):15–17. (In Russ.).

#### Информация об авторах

**А. П. Дзюба** – доктор экономических наук, профессор.  
**А. В. Семиколонов** – соискатель.

#### About the authors

**A. P. Dzyuba** – Doctor of Sciences (Economics), Professor.  
**A. V. Semikolenov** – Candidate.