

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ АКТИВНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ В КОНТЕКСТЕ ИНТЕГРАЦИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТЬ РОССИИ

А.П. Дзюба, *dzyuba-a@yandex.ru*

А.В. Семиколенов, *semikolenov83@yandex.ru*

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Статья посвящена разработке методического подхода к управлению активными энергетическими комплексами, действующими на промышленных предприятиях России. Особенностью активных энергетических комплексов является их работа в рамках единой системы управления совокупностью объектов распределенной генерации электроэнергии на промышленном предприятии, и объектов производственного и вспомогательного оборудования предприятия, потребляющих энергоресурсы из Единой энергетической системы и Единой системы газоснабжения. На основе исследования особенностей функционирования активных энергетических комплексов на промышленных предприятиях России, авторами выявлен и систематизирован перечень факторов, которые необходимо учитывать при управлении работой активных энергетических комплексов: ценовые факторы, энергорыночные, внешние режимные, внутренние организационные и пр. В статье идентифицированы особенности управляющих воздействий в зависимости от индивидуальных характеристик каждого объекта управления активного энергетического комплекса и разработана авторская классификация элементов, которые необходимо принять во внимание в процессе управления в разрезе функционального назначения объекта (производство или потребление электроэнергии и природного газа), и в разрезе среды обращения (электроэнергии и природного газа). Основным результатом исследования стала разработка методического подхода и модели поэтапного управления активными энергетическими комплексами промышленных предприятий, учитывающих ограничения в области управления работой активного энергетического комплекса со стороны промышленного предприятия, особенности взаимодействия со средой обращения электроэнергии и природного газа, особенности учета компонентов стоимости закупаемой электроэнергии и природного газа.

Ключевые слова: активные энергетические комплексы, управление спросом на электроэнергию, управление спросом на потребление природного газа, потребление электроэнергии, промышленная энергетика, рынок электроэнергии, рынок природного газа, энергоэффективность

Для цитирования: Дзюба А.П., Семиколенов А.В. Методический подход к управлению активными энергетическими комплексами в контексте интеграции в промышленность России // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 2022. Т. 16, № 3. С. 66–81. DOI: 10.14529/em220308

Original article
DOI: 10.14529/em220308

METHODOLOGICAL APPROACH TO THE MANAGEMENT OF ACTIVE ENERGY COMPLEXES IN CONDITIONS OF INTEGRATION INTO THE RUSSIAN INDUSTRY

A.P. Dzyuba, *dzyuba-a@yandex.ru*

A.V. Semikolenov, *semikolenov83@yandex.ru*

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article is devoted to the study of a methodological approach to managing active energy complexes functioning at industrial enterprises in Russia. The specific feature of active energy complexes is that they are operated within a unified system of managing all the objects of the distributed electricity

generation at an industrial enterprise, and the objects of the enterprise's production and auxiliary equipment consuming the energy resources from the Unified Energy System and a Unified Gas Supply System. Based on the study of the peculiarities of active energy complexes functioning at industrial enterprises in Russia, the authors have revealed and systematized a list of factors that should be taken into account when managing the operation of active energy complexes: price, energy market, external regime factors, and internal organizational factors, etc. In this paper, the features of the management actions have been identified depending on individual characteristics of each object of management of an active energy complex, and the authors have elaborated their original classification of the elements required for accounting in the process of managing as applied to the functional designation of an object (production or consumption of electric power and natural gas) and the handling environment (electric power and natural gas). The main result of the research is the development of a methodological approach to and a model of a stage-by-stage management of active energy complexes of industrial enterprises, which take into consideration the restrictions in the field of managing the operation of an active energy complex from the standpoint of an industrial enterprise, the specifics of interaction with the handling environment for electric power and natural gas, and the peculiarities of taking into account the pricing components of the purchased electric power and natural gas.

Keywords: active energy complexes, electricity demand management, natural gas demand management, electricity consumption, industrial energy, electricity market, natural gas market, energy efficiency

For citation: 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. Ser. Economics and Management*, 2022, vol. 16, no. 3, pp. 66–81. (In Russ.). DOI: 10.14529/em220308

Введение

Одним из ключевых элементов долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации является совершенствование функционирования отраслей топливно-энергетического комплекса и повышение энергетической эффективности во всех отраслях национальной экономики. В 2020 году Распоряжением Правительства РФ № 1523-р от 09.06.2020 г. была утверждена Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года, которая определяет основные стратегические направления и цели технологического, инновационного и экономического развития топливно-энергетического комплекса страны [1]. Ключевой отраслью топливно-энергетического комплекса России, как и во всех странах мира, является отрасль электроэнергетики, она обеспечивает практически все отрасли экономики, начиная от сектора ЖКХ и заканчивая отраслями тяжелой промышленности. Электроэнергетика тесно связана с остальными отраслями топливно-энергетического комплекса, такими как: газовая, угольная, нефтяная промышленность и пр. Одним из приоритетных направлений развития электроэнергетики России, закрепленных в Энергетической стратегии, обозначено развитие новых технологий распределенного производства электрической энергии, микрогенерации, управляемого потребления, виртуального агрегирования ресурсов. Как указано в Энергетической стратегии, системы распределенной генерации создают принципиально новые условия для развития конкурентного розничного рынка, построенного на базе автоматизированных локальных трейдинговых площадок по торговле электрической энергией.

Вопросу развития и использования технологий распределенной энергетики посвящено значительное количество зарубежных и отечественных научных исследований. В первую очередь, исследования в области распределенной энергетики направлены на изучение вопросов обеспечения надежности энергоснабжения всех групп потребителей электроэнергии и повышения качества электрической энергии. Среди отечественных работ, посвященных использованию систем распределенной энергетики для повышения надежности и качества энергоснабжения, следует выделить труды современных отечественных исследователей: Воропай Н.И., Кейко А.В., Клер А.М. и др. [2], Бык Ф.Л., Мышкина Л.С. [3], Папков Б.В., Осокин В.Л. [4], а также труды зарубежных ученых: Arteconi A., Brandoni C., Polonara F. [5], Lujano-Rojas J.M., Yusta J.M., Domínguez-Navarro J.A. [6], Ochoa L.F., Harrison G.P. [7], Galperova E. [8]. Подходы к оценке потенциального экономического эффекта от использования распределенной генерации, раскрыты в работах: Армашова-Тельника Г.С., Баталина Ф.А., Бобовича Т.А. [9], Кохтавшили Н.Т., Паняевой В.Д., Шаркова И.А. и др. [10], Sadek S.M., Omran W.A., Hassan M.A.M. et al. [11], Nikam V., Kalkhambkar V. [12]. Поскольку современные технологии возобновляемых источников энергии, в значительной степени, реализованы в виде объектов распределенной энергетики, значительное количество исследований посвящено рассмотрению особенностей использования ВИЭ как объектов распределенной генерации. Примерами таких исследований могут служить работы зарубежных авторов: Jin T., Yu Y., Elsayed E. [13], Meng W., Wang X. [14], Ahmad N.A., Byrd H. [15]. В России оценке перспектив и потенциальных

возможностей использования ВИЭ в рамках распределенной генерации посвящены труды (Бык Ф.Л., Илюшин П.В., Мышкина Л.С. [16], Васьков А.Г., Гармашук Э.Э. [17]).

Современная цифровизация всех сфер экономики, развитие информационных и коммуникационных технологий в топливно-энергетическом комплексе, безусловно, приводит к совершенствованию механизмов управления в отрасли электроэнергетики. Среди ключевых технологий, интенсивно развивающихся в последние годы, следует отметить: SmartGrid, Smart Meter, Internet of things и Blockchain. Тенденция внедрения информационных и коммуникационных технологий в ТЭК привела к возникновению значительного количества научных исследований в области информатизации распределенной энергетики. Следует выделить исследования в области интеграции информационных технологий в распределенную энергетику, которые принадлежат зарубежным ученым: Ahl A., Yarime M., Tanaka K., Sagawa D. [18], Hou J., Wang C., Luo S. [19], Sultanov M.M., Arakelyan E.K., Boldyrev I.A. et al. [20], Valdivia A.D., Balccl M.P. [21], Abdeltawab H.M., Mohamed Y.A.I. [22]. А также работы, выполненные отечественными исследователями: Болотовым П.В. [23], Воронцовой А.В. [24], Квашой Н.В., Бондарем Е.Г. [25]. Несмотря на значительное количество мировых и отечественных научных исследований в области использования распределенной энергетики, учитывая особенности энергосистемы России, а также изменения в отечественном законодательстве, направленные на расширение круга возможностей использования распределенной энергетики, сохраняется острая потребность в совершенствовании теоретической базы и практических разработок в области распределенной генерации.

Постановлением Правительства РФ № 320 от 21.03.2020 г. были внесены изменения в правила розничного рынка электрической энергии (мощности), связанные с нормативным регулированием условий создания, функционирования и развития активных энергетических комплексов [26]. Это обуславливает высокую актуальность научных исследований и разработок в этом новом для России направлении повышения энергетической эффективности отдельных предприятий и страны в целом.

Теория

Системы распределенной выработки электроэнергии, работающие на природном газе, в большинстве случаев устанавливаются в непосредственной близости от площадок крупных промышленных предприятий, либо на территориях таких предприятий. Как правило, для таких предприятий электрическая нагрузка является основной, а мощности и режимные параметры системы выработки электроэнергии проектируются с учетом особен-

ностей потребления электрической энергии и электрической мощности базового предприятия.

Существует ряд факторов, обуславливающих целесообразность размещения систем распределенной генерации в непосредственной близости от площадок потребителей электроэнергии:

- ✓ возможность реализации не только вырабатываемой электрической, но и тепловой энергии;
- ✓ расположение в непосредственной близости к распределительным газопроводам;
- ✓ низкие потери при непосредственной передаче до потребителя вырабатываемой электрической и тепловой энергии;
- ✓ возможность синхронизации режимов выработки и потребления электрической и тепловой энергии;
- ✓ отсутствие необходимости оплаты за услугу по передаче электроэнергии по региональным распределительным сетям электроснабжения;
- ✓ отсутствие обязательств по реализации вырабатываемой электроэнергии по правилам, действующим для субъектов оптового рынка электроэнергии (мощности);
- ✓ отсутствие необходимости диспетчерского сопровождения при управлении электростанцией;
- ✓ сокращение экологических выбросов при производстве электрической и тепловой энергии;
- ✓ возможность регулирования спроса на потребление электрической энергии и природного газа из Единой энергетической системы и Единой системы газоснабжения России.

Система распределенной генерации электроэнергии имеет непосредственную связь с энергопринимающими устройствами потребителя электрической энергии, что обуславливает работу потребителя и системы распределенной генерации в рамках единой системы управления. Также энергопринимающие устройства потребителя электроэнергии либо энергопринимающие устройства системы распределенной генерации имеют параллельное соединение с Единой энергетической системой, что определяет возможности и ограничения для управления системой активного энергетического комплекса.

Следует представить авторское видение сущности и содержания активного энергетического комплекса промышленного предприятия. Активный энергетический комплекс промышленного предприятия – это система управления, включающая промышленное предприятие и объект по производству электрической энергии с установленной генерирующей мощностью, не превышающей 25 МВт. Эта система управления имеет: 1) прямые электрические связи между объектом по производству электрической энергии и энергопринимающими устройствами промышленного потребителя, 2) только одну электрическую связь с Единой энергетической системой, 3) возможность одновременного регулирования и учета производства и

потребления электрической энергии (мощности), которые производятся в рамках единого сальдо-перетока. Закупка электроэнергии и природного газа производится с учетом особенностей ценообразования в современных энергорыночных условиях, а также с учетом существующих технологических ограничений величины разрешенной мощности потребления энергопринимающих устройств предприятия. Элементы активного энергетического комплекса синхронно управляются на основе интеллектуальных функционально-объединенных устройств регулирования и учета параметров производства и потребления электрической энергии (мощности).

Основным первичным топливом для выработки электроэнергии на системах распределенной генерации является природный газ, что отчасти объясняется его относительно низкой стоимостью и высокой степенью газификации отечественной промышленности. На рис. 1 представлена структура выработки электроэнергии из ископаемых топлив в некоторых странах мира в 2020 году. Как следует из диаграммы, при среднемировой доле потребления природного газа в структуре ископаемых источников энергии равной 34,4 %, данный показатель в России составляет более 75 %. При этом объемы потребления электроэнергии в России занимают 4 место в мире после США, Китая и Японии.

На рис. 2 проиллюстрирована стоимость природного газа по странам мира в 2020 году. Видно, что цены на отпуск природного газа в России более чем в 10 раз меньше аналогичных цен в странах Европы. Из этого следует, что в условиях высокой степени газификации промышленности России с учетом большой доли тепловых электростанций в структуре энергобаланса страны (ТЭЦ и ГРЭС) и сравнительно низкой стоимости отпускаемого природного газа, использование систем распределенной энергетики на основе технологий возобновляемых источников энергии в России зачастую является экономически нецелесообразным.

Современные научные исследования в области управления активными энергетическими комплексами находятся на начальном этапе появления и развития. Среди работ, посвященных функционированию активных энергетических комплексов в России, можно выделить работы Сизикова С.В. [27], Караницыной Е.В., Кочеткова М.Н., Бортникова М.А. [28], Проценко П.П., Лисовского В.В. [29]. При этом все исследования посвящены оценке актуальности внедрения активных энергетических комплексов в энергосистему России и особенностям их параллельной работы в составе ЕЭС. Зарубежные публикации, посвященные вопросам работы активных энергетических комплексов, представлены в трудах: Carvajal C.R., García-Muñiz A.S., Cuartas B.M. [30], Wang T., Guo J., Ai S., Cao J. [31].

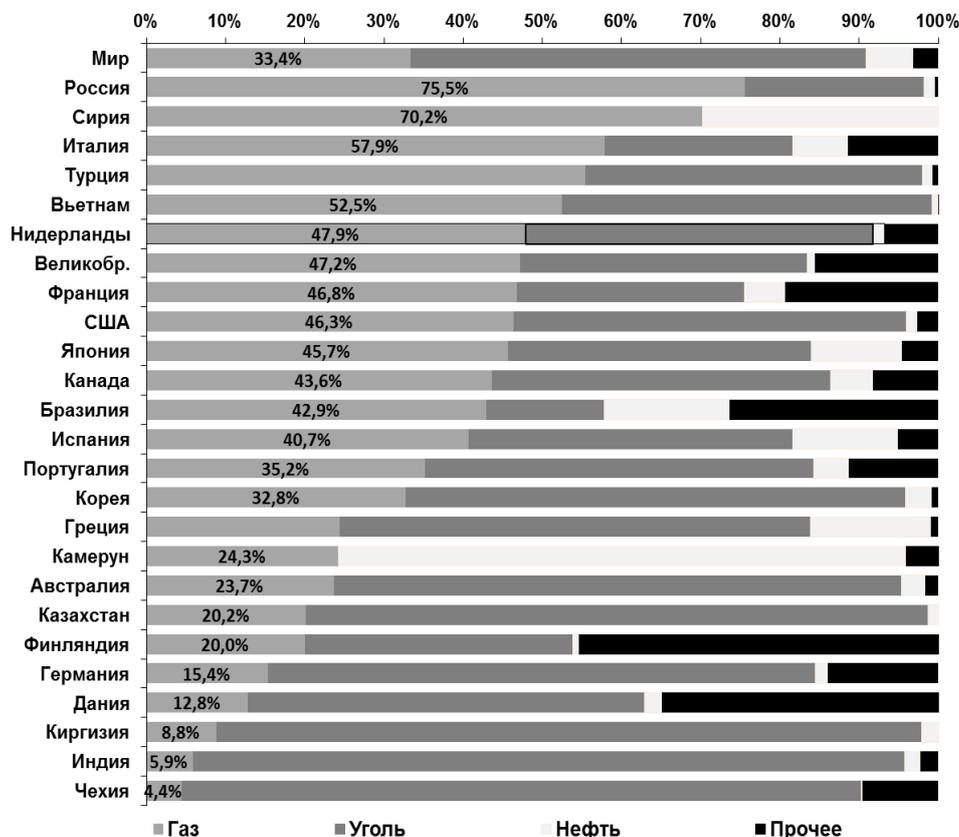


Рис. 1. Структура выработки электроэнергии из ископаемых топлив в некоторых странах мира в 2020 году [32, 33]

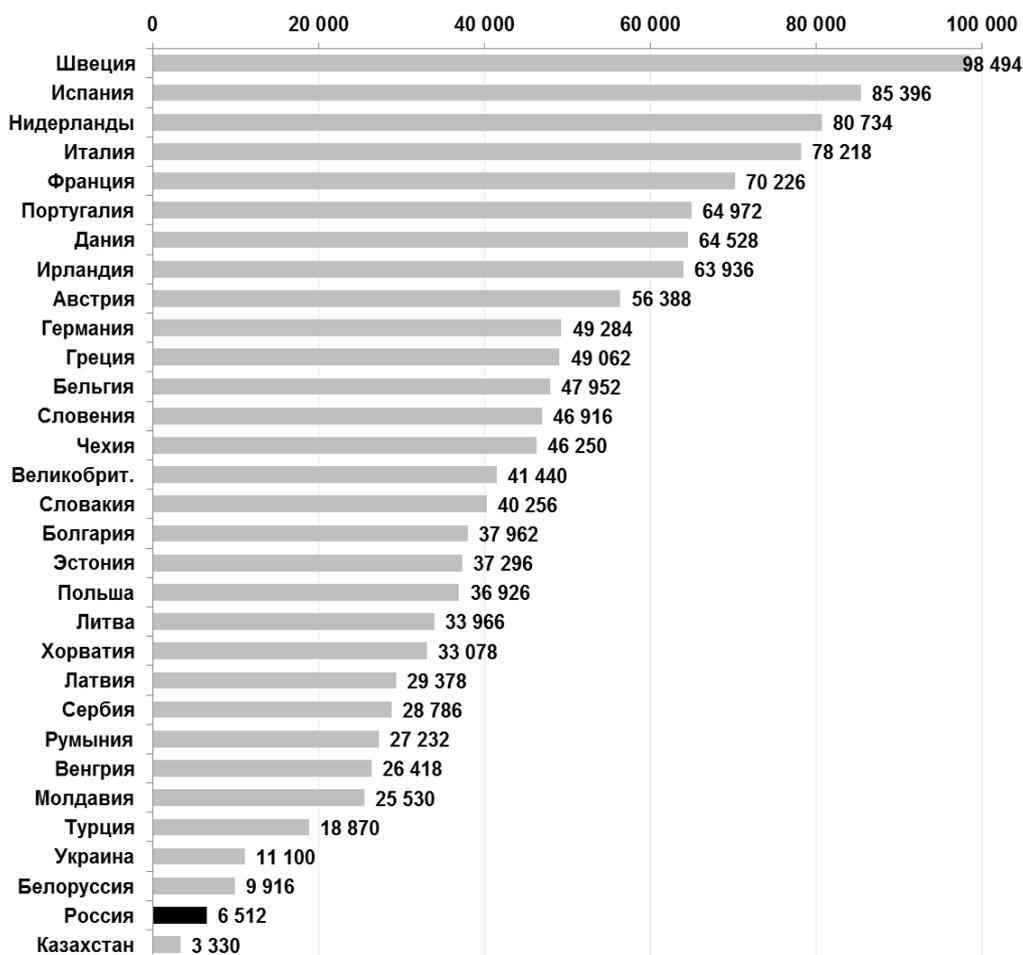


Рис. 2. Стоимость природного газа в странах мира в 2020 году (руб./тыс. куб. м) [34]

В большинстве случаев, если система распределенной генерации находится непосредственно на площадке промышленного предприятия, то ее технологическое присоединение производится к сетям газоснабжения этого же предприятия, и общее потребление природного газа промышленного предприятия в этом случае обеспечивает производственные нужды и нужды потребления системы малой распределенной генерации. Учитывая то, что промышленное предприятие осуществляет потребление природного газа на собственные производственные нужды из Единой системы газоснабжения, и это потребление увеличивается на объем потребления газа на выработку электроэнергии системой распределенной генерации, можно сделать вывод, что оборудование промышленного предприятия и система распределенной генерации действуют в рамках единой системы управления при потреблении природного газа. Тот факт, что устройства системы газопотребления промышленного предприятия либо системы распределенной генерации имеют параллельное соединение с Единой системой газоснабжения, опре-

деляет ограничения и возможности для управления системой активного энергетического комплекса.

Результат

На рис. 3 схематично представлена структура активного энергетического комплекса, реализованного на базе типового промышленного предприятия. Промышленное предприятие имеет потребителей электрической энергии и потребителей природного газа, использующих энергетические ресурсы как для основных производственных нужд, так и для вспомогательных нужд функционирования промышленного предприятия. Примером применения электрической энергии промышленным предприятием могут выступать системы мощных электроприводов станков, транспортеров, кранов, систем вентиляции, электрические печи, системы электроосвещения. Примером применения природного газа промышленным предприятием могут выступать водогрейные котельные, работающие на предприятиях, печи для нагревания заготовок, промышленные автоклавы, системы промышленной сушки.

Объект распределенной генерации также имеет генератор, вырабатывающий электрическую

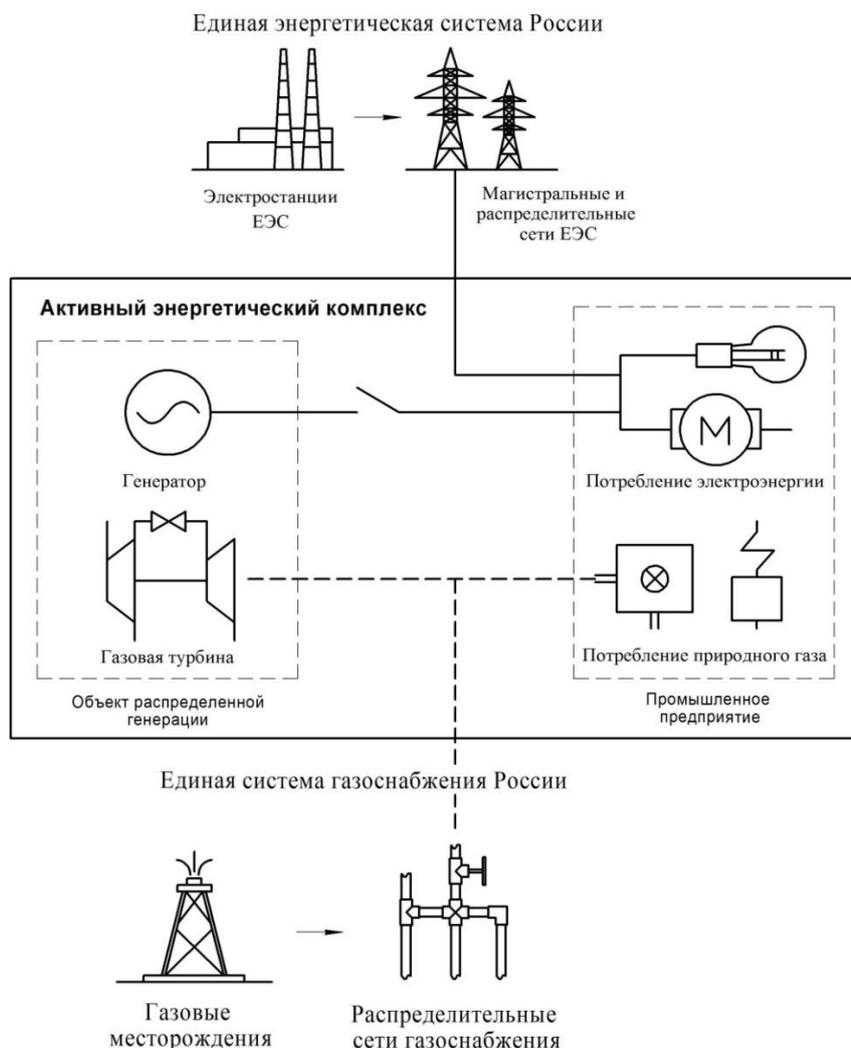


Рис. 3. Структура активного энергетического комплекса

энергию и газовую турбину, которая производит пар высокого давления для работы генератора. Газовая турбина подключена к системе газоснабжения промышленного предприятия и потребляет природный газ для работы генератора и выработки электрической энергии в электрическую сеть промышленного предприятия. Система электроснабжения и газоснабжения промышленного предприятия имеет технологическое соединение с Единой энергетической системой и Единой системой газоснабжения промышленного предприятия соответственно.

Помимо того, что режимы работы электропотребляющих и газопотребляющих устройств промышленного предприятия должны быть синхронизированы между собой не только по параметрам электропотребления (выработка электроэнергии генератором и потребление электроэнергии промышленным предприятием должны действовать в едином режиме), но и по параметрам потребления газа (потребление природного газа технологическими процессами промышленного предприятия и

системой распределенной генерации должны действовать в едином режиме) [35], задачу управления активным энергетическим комплексом еще больше усложняет то, что система электроснабжения и газоснабжения АЭК должна быть синхронизирована с Единой энергетической системой и Единой системой газоснабжения. Промышленное предприятие и АЭК, имея технологическое присоединение к Единой энергетической системе и Единой системе газоснабжения, работают параллельно в рамках единой технологической, режимной и экономической сред управления.

В условиях синхронизации работы АЭК с Единой энергетической системой и Единой системой газоснабжения, учитывая количество энергетических ресурсов, одновременно производимых и потребляемых АЭК в едином режиме работы оборудования, значительное количество факторов влияет на экономическую эффективность, технологическую устойчивость и надежность работы активного энергетического комплекса, что необходимо учитывать при управлении работой АЭК.

В первую очередь среди факторов, оказывающих влияние на процессы производства и потребления электроэнергии и потребления природного газа в рамках работы АЭК, необходимо учитывать особенности внешней и внутренней среды активного энергетического комплекса промышленного предприятия.

Внешняя среда АЭК – совокупность факторов и условий, оказывающих влияние на его функционирование. К внешней среде АЭК относятся принципы и нормы рынков электрической энергии и условий обращения природного газа, технологическая инфраструктура Единой энергетической системы и Единой системы газоснабжения, законодательные нормы, цены на рынках энергетического сырья, особенности потребителей и поставщиков электрической энергии, экологические ограничения и т. п.

Внутренняя среда АЭК – совокупность факторов, оказывающих влияние на его функционирование. К внутренней среде АЭК относятся: технологические возможности и ограничения системы производства и потребления электрической энергии, параметры потребления природного газа, возможности регулирования объемов потребления и выработки электрической энергии, возможности регулирования графиков процессов производства оборудования и т. п. на анализируемом промышленном предприятии [36].

В зависимости от типов управляемых графиков потребления энергетических ресурсов в рамках АЭК можно выделить следующие направления воздействий:

- ✓ управление графиком электропотребления;
- ✓ управление графиком потребления природного газа;
- ✓ комплексное управление электроэнергией и природным газом.

В зависимости от объекта управления, действующего в составе активного энергетического комплекса, можно выделить следующие направления:

- ✓ управление графиками работы системы распределенной генерации;
- ✓ управление графиками работы потребителя электрической энергии;
- ✓ комбинированное управление АЭК.

В зависимости от совокупности объектов управления, в процессе которого производится управление функционированием АЭК, можно рассматривать управление отдельными объектами или комплексное управление всей их совокупностью.

При управлении активным энергетическим комплексом промышленного предприятия необходимо учитывать особенности работы целого ряда рынков, таких как:

- ✓ оптовый рынок электроэнергии (мощности);
- ✓ розничный рынок электроэнергии (мощности);

✓ региональный рынок поставки природного газа;

✓ работа товарно-сырьевой биржи.

И учитывать все составляющие стоимости электроэнергии и природного газа, такие как:

✓ компонент стоимости электрической энергии;

✓ компонент стоимости электрической мощности;

✓ компонент стоимости услуги по передаче электроэнергии;

✓ стоимость лимитного природного газа;

✓ стоимость сверхлимитного природного газа.

На рис. 4 систематизированы элементы, которые необходимо учитывать в процессе управления активным энергетическим комплексом. Представленные элементы относятся как к среде производства электроэнергии системой распределенной генерации, так и к среде потребления электроэнергии и природного газа промышленным предприятием, и, одновременно, к среде обращения электроэнергии и среде обращения природного газа. В качестве элементов, требуемых к учету в процессе управления активным энергетическим комплексом, представлены как факторы, связанные со стоимостью закупок и реализации обрабатываемых энергоресурсов, так и факторы, связанные с особенностями изменения графиков спроса на энергопотребление с учетом возможных ограничений перетоков электроэнергии с внешней сетью электроснабжения и газоснабжения.

Таким образом, в процессе управления активными энергетическими комплексами существует значительное количество факторов, стимулирующих либо ограничивающих возможности управления.

В таблице агрегированы факторы, требуемые к учету в процессе управления активными энергетическими комплексами со стороны среды обращения электроэнергии и среды обращения природного газа. Факторы разделены на девять основных типов: ценовые, энергорыночные, факторы структуры графиков спроса, внешние режимные, внутренние технологические, внутренние организационные, факторы СМГ, факторы среды управления спросом, факторы взаимного влияния изменения спроса.

Ценовые факторы связаны с влиянием цен на потребление и отпуск энергоресурсов, энергорыночные связаны с особенностями механизмов ценообразования и энергорыночной конъюнктурой, факторы структуры графиков спроса связаны с особенностями индивидуальной неравномерности потребления электроэнергии и природного газа промышленным предприятием, внешние режимные – с системными ограничениями в энергосистеме. Внутренние технологические определяются

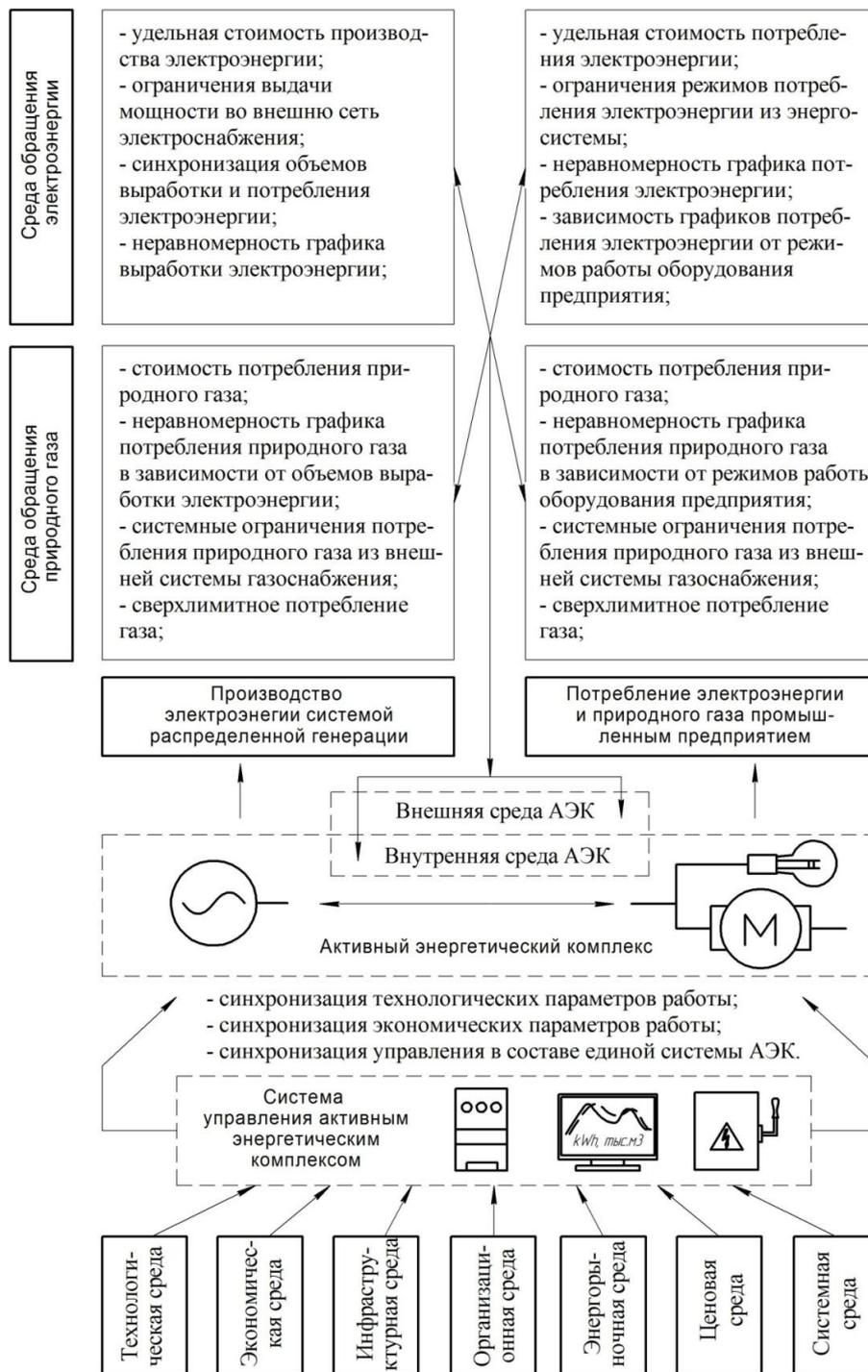


Рис. 4. Примеры элементов требуемых к учету в процессе управления активным энергетическим комплексом

Структура факторов, учитываемых в процессе управления активными энергетическими комплексами

№ п/п	Типы факторов	Среда обращения электрической энергии	Среда обращения природного газа
1	Ценовые факторы	– Динамические показатели цен на закупку различных компонентов стоимости электроэнергии	– Динамические показатели цен на закупку различных компонентов стоимости природного газа; – ценовые параметры сверхлимитного потребления газа
2	Энергорыночные факторы	– Механизмы ценообразования на закупку компонентов стоимости электроэнергии; – варианты выбора механизма ценообразования	– Механизмы ценообразования на закупку компонентов стоимости природного газа; – варианты выбора механизма ценообразования (вид рынка закупки газа)
3	Факторы структуры графиков спроса	– Особенности конфигурации графиков спроса на электроэнергию	– Особенности конфигурации графиков спроса на природный газ
4	Внешние режимные факторы	– Системные ограничения потребления электроэнергии из электрической сети; – системные ограничения выдачи электроэнергии во внешнюю сеть электроснабжения	– Системные ограничения потребления природного газа из системы газоснабжения; – режимы ограничения выборки газа в период введения системных ограничений
5	Внутренние технологические факторы	– Возможности режимов работы электропотребляющего оборудования	– Возможности режимов работы газопотребляющего оборудования
6	Внутренние организационные факторы	– Режимы работы промышленных предприятий; – чередование рабочих и выходных дней	– Режимы работы промышленных предприятий; – чередование рабочих и выходных дней
7	Факторы СМГ	– Особенности режимов выработки электроэнергии; – величина технологического минимума/максимума	– Особенности режимов потребления газа; – зависимость спроса на газ от выработки электроэнергии
8	Факторы среды управления спросом	– Параметры контрактов на участие в управлении спросом	– Изменение спроса на газ при регулировании электропотребляющего оборудования в процессе управления спросом
9	Факторы взаимного влияния изменения спроса	– Зависимость изменения графика электропотребления от регулирования режимов оборудования; – зависимость изменения режимов выработки электроэнергии от графиков спроса потребителя из энергосистемы	– Зависимость изменения режимов выработки природного газа от графиков выработки электроэнергии; – зависимость изменения графика потребления газа от регулирования режимов электропотребления предприятия

возможностями и ограничениями работы технологического оборудования промышленного предприятия и системы распределенной генерации, внутренние организационные – возможностями и ограничениями управления работой промышленного предприятия, факторы СМГ связаны с особенностями работы системы распределенной генерации, факторы среды управления спросом – с возможностями и ограничениями участия в механизме управления спросом на электроэнергию,

факторы взаимного влияния изменения спроса связаны с особенностями взаимного влияния на изменение спроса на электроэнергию и природный газ в процессе управления работой АЭК.

В зависимости от индивидуальных характеристик активного энергетического комплекса влияние представленного состава факторов будет значительно различаться. При этом при любой конфигурации АЭК наиболее значимыми факторами будут ценовые, энергорыночные, факторы струк-

туры графика спроса, внешние режимные и внутренние технологические.

Система управления АЭК в первую очередь должна быть направлена на управление графиками производственных процессов промышленного предприятия, влияющих на изменение графиков работы электропотребляющего и газопотребляющего оборудования, режимы работы которых напрямую влияют на изменение параметров спроса на потребление электроэнергии и природного газа

из энергосистемы. Ключевые направления корректирующих воздействий со стороны системы управления активного энергетического комплекса промышленного предприятия представлены на рис. 5.

Конфигурация почасовых графиков спроса на потребление электроэнергии и природного газа напрямую оказывает влияние на удельные цены и общую стоимость закупа электроэнергии и природного газа, потребляемого промышленным

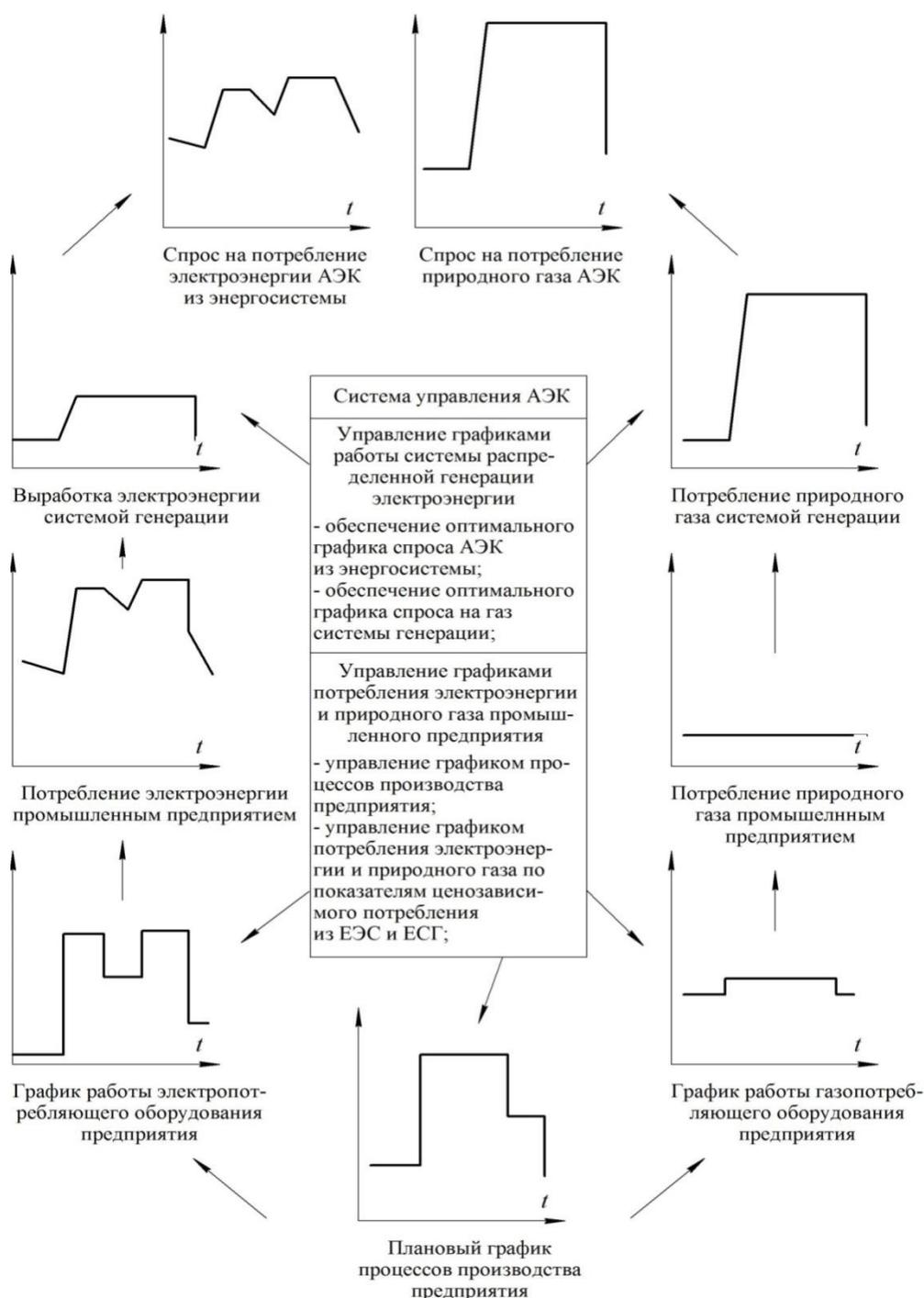


Рис. 5. Направления охвата системы управления активного энергетического комплекса промышленного предприятия

предприятием на оптовом и розничном рынках электроэнергии, региональном рынке природного газа и товарно-сырьевой бирже природного газа. График выработки электроэнергии системой распределенной генерации во внутреннюю электрическую сеть промышленного предприятия, а также график потребления природного газа системой распределенной генерации на нужды выработки электроэнергии коррелируются с внутренним спросом на природный газ промышленного предприятия. При этом, если выдача электроэнергии в сеть промышленного предприятия со стороны системы распределенной генерации снижает спрос на потребление электроэнергии из Единой энергетической системы, то потребление природного газа системой распределенной генерации, наоборот, увеличивает общий спрос на потребление природного газа системы активного энергетического комплекса.

В зависимости от характера конфигурации графика выдачи вырабатываемой электрической энергии системой распределенной генерации во внутреннюю сеть промышленного предприятия изменяется график спроса на потребление электроэнергии промышленного предприятия в частности, и системы активного энергетического комплекса в целом. Конфигурация графика спроса на потребление электроэнергии из Единой энергетической системы формирует удельную стоимость закупа электроэнергии по всем ее компонентам: стоимости электрической энергии, электрической мощности, услуги по передаче электроэнергии. Таким образом, при управлении графиком работы системы распределенной генерации по показателям стоимости закупа электроэнергии предоставляется возможность в широких диапазонах выполнять управление затратами на закуп электроэнергии в составе активного энергетического комплекса, минимизируя его.

При управлении графиком выработки электроэнергии системой распределенной генерации в составе активного энергетического комплекса также следует учитывать формирование спроса на потребление природного газа, так как учитывая условия закупа природного газа на региональном рынке и на товарно-сырьевой бирже, также возможно сокращение затрат на оплату природного газа в широких диапазонах управления графиком спроса на АЭК на природный газ.

На рис. 6 представлен предлагаемый авторский методический подход к управлению активными энергетическими комплексами, действующими на базе промышленных предприятий. Как следует из рисунка, целевой функцией реализации методического подхода является снижение затрат на потребление электроэнергии и природного газа промышленного предприятия.

Ограничениями управления активного энергетического комплекса выступают: сохранение

надежности работы оборудования промышленного предприятия и системы распределенной генерации, выполнение планов производства продукции промышленным предприятием, обеспечение качества технологических процессов промышленного предприятия и системы распределенной генерации. Для достижения целевой функции требуется выполнение условий синхронного снижения удельных затрат на производство электроэнергии системой распределенной генерации и удельных затрат на потребление электроэнергии, а также общих затрат на потребление природного газа.

При управлении затратами на закуп природного газа требуется управление затратами на газ при закупке как на региональном рынке, так и на товарно-сырьевой бирже. При покупке электроэнергии следует учитывать закуп электроэнергии как на оптовом, так и на розничном рынке электроэнергии по всем основным компонентам стоимости: стоимости электрической энергии, стоимости электрической мощности, стоимости услуги по передаче электроэнергии. Управление затратами по компонентам стоимости закупа электрической энергии и природного газа активного энергетического комплекса производится комплексно на основе системного одновременного управления графиком производства электроэнергии системой распределенной генерации, которая выдается во внутреннюю сеть промышленного предприятия, управления графиком потребления электроэнергии промышленного предприятия из Единой энергетической системы, управления графиком потребления природного газа системой распределенной генерации и газопотребляющим оборудованием промышленного предприятия, что обеспечивает управление совокупным потреблением электроэнергии и потреблением природного газа активным энергетическим комплексом в целом.

В рамках реализации модели управления активным энергетическим комплексом промышленного предприятия требуется планирование объемов потребления электроэнергии промышленного предприятия, объемов выработки электроэнергии системой распределенной генерации, потребления природного газа промышленным предприятием и системой распределенной генерации, прогнозирование ценовых параметров рынков электроэнергии и природного газа, планирование режимов работы энергопотребляющего оборудования промышленного предприятия и системы распределенной генерации, анализ взаимного влияния изменения графиков потребления электроэнергии и природного газа активным энергетическим комплексом.

Таким образом, в рамках настоящего исследования были идентифицированы особенности функционирования активных энергетических комплексов промышленных предприятий в рыночных условиях РФ и предложен методический подход к управлению АЭК, ключевой зада-

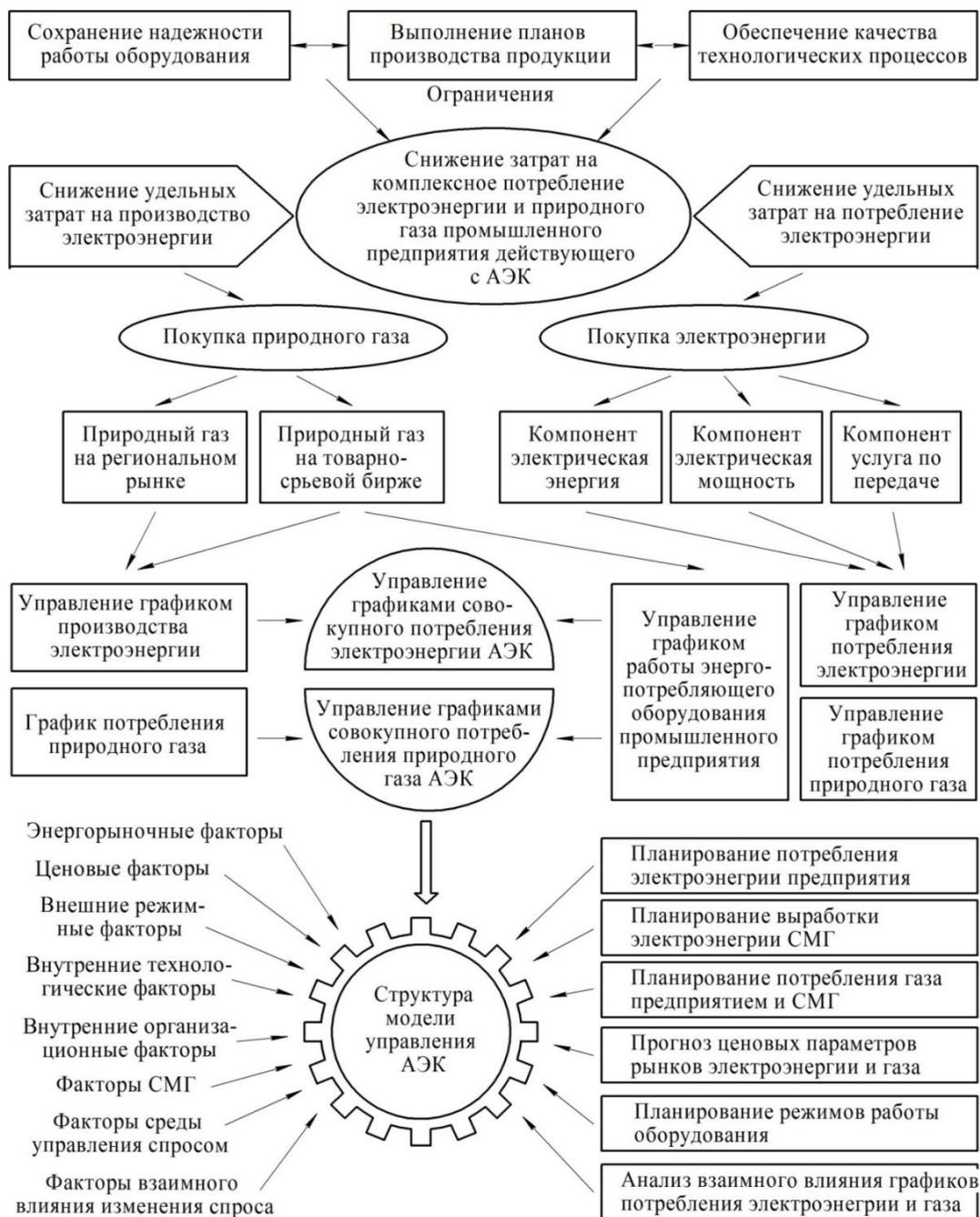


Рис. 6. Методический подход к управлению активными энергетическими комплексами промышленного предприятия

чей которого является сокращение совокупных затрат на энергоснабжение промышленных предприятий и повышение их общей энергетической эффективности.

Для реализации методического подхода к управлению активным энергетическим комплексом промышленного предприятия требуется раз-

работка экономико-математической модели управления активными энергетическими комплексами промышленных предприятий в условиях интеграции с технологией управления спросом на потребление электроэнергии и природного газа, что нам представляется перспективным направлением будущих исследований.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года / Утверждена Распоряжением Правительства РФ № 1523-р от 09.06.2020 г. URL: <https://cloud.consultant.ru/>
2. Воропай Н.И., Кейко А.В., Клер А.М., Стенников В.А. Технико-экономические проблемы использования нетрадиционной энергетики // Проблемы нетрадиционной энергетики: мат-лы науч. сессии През. СО РАН, 13.12.2005. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. С. 32–54.
3. Бык Ф.Л., Мышкина Л.С. Надежность объектов распределенной энергетики // Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14. № 1. С. 45–51.
4. Папков Б.В., Осокин В.Л. Особенности оценки структурной надежности систем с объектами распределенной генерации // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2020. № 2. С. 75–84.
5. Arteconi A., Brandoni C., Polonara F. Distributed generation and trigeneration: energy saving opportunities in Italian supermarket sector // Applied Thermal Engineering. 2009. Т. 29. № 8-9. С. 1735–1743.
6. Lujano-Rojas J.M., Yusta J.M., Domínguez-Navarro J.A. Mitigating energy system vulnerability by implementing a microgrid with a distributed management algorithm // Energies. 2019. Т. 12. № 4. С. 616.
7. Ochoa L.F., Harrison G.P. Minimizing energy losses: optimal accommodation and smart operation of renewable distributed generation // IEEE Transactions on Power Systems. 2011. Т. 26. № 1. С. 198–205.
8. Galperova E. A methodological approach to assessing the possible effect of distributed generation expansion on regional energy supply systems // Energy Systems Research. 2021. Т. 4. № 2 (14). С. 64–69.
9. Армашова-Тельник Г.С., Баталин Ф.А., Бобович Т.А. Способы снижения затрат на электроснабжение предприятий с помощью технологий распределенной энергетики // Актуальные проблемы экономики и управления. 2019. № 1 (21). С. 15–17.
10. Кохтавшили Н.Т., Паняева В.Д., Шарков И.А., Зимин А.М. Оценка экономической эффективности использования распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии на примере региона Российской Федерации // Аллея науки. 2020. Т. 1. № 8 (47). С. 418–422.
11. Sadek S.M., Omran W.A., Hassan M.A.M., Talaat H.E.A. Adaptive robust energy management for isolated microgrids considering reactive power capabilities of distributed energy resources and reactive power costs // Electric Power Systems Research. 2021. Т. 199. С. 107375.
12. Nikam V., Kalkhambkar V. A review on control strategies for microgrids with distributed energy resources, energy storage systems, and electric vehicles // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2021. Т. 31. № 1. С. e12607.
13. Jin T., Yu Y., Elsayed E. Reliability and quality control for distributed wind/solar energy integration: a multi-criteria approach // IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers). 2015. Т. 47. № 10. С. 1122–1138.
14. Meng W., Wang X. Distributed energy management in smart grid with wind power and temporally coupled constraints // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. Т. 64. № 8. С. 6052–6062.
15. Ahmad N.A., Byrd H. Empowering distributed solar PV energy for Malaysian rural housing: towards energy security and equitability of rural communities // International Journal of Renewable Energy Development. 2013. Т. 2. № 1. С. 59–68.
16. Бык Ф.Л., Илюшин П.В., Мышкина Л.С. Особенности и перспективы развития распределенной энергетики в России // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 6. С. 78–87.
17. Васьков А.Г., Гармашук Э.Э. Тенденции развития распределенной генерации. Нетрадиционные источники электроэнергии // Интернаука. 2020. № 26-2 (155). С. 9–10.
18. Ahl A., Yarime M., Tanaka K., Sagawa D. Review of blockchain-based distributed energy: implications for institutional development // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Т. 107. С. 200–211.
19. Hou J., Wang C., Luo S. How to improve the competitiveness of distributed energy resources in China with blockchain technology // Technological Forecasting and Social Change. 2020. Т. 151. С. 119744.
20. Sultanov M.M., Arakelyan E.K., Boldyrev I.A., Lunenko V.S., Menshikov P.D. Digital twins application in control systems for distributed generation of heat and electric energy // Archives of Thermodynamics. 2021. Т. 42. № 4. С. 89–101.
21. Valdivia A.D., Balcells M.P. Connecting the grids: a review of blockchain governance in distributed energy transitions // Energy Research and Social Science. 2022. Т. 84. С. 102383.
22. Abdeltawab H.M., Mohamed Y.A.I. Distributed battery energy storage co-operation for renewable energy sources integration // Energies. 2020. Т. 13. № 20. С. 5517.
23. Болотов П.В. Применение технологии блокчейн в распределенной генерации на основе возобновляемых источников энергии // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. 2021. № 7. С. 35–40.
24. Воронцов А.В. Оценка перспектив развития распределенной генерации России в рамках развития энергетики России // Вестник университета. 2014. № 14. С. 115–120.
25. Кваша Н.В., Бондарь Е.Г. Распределенная и цифровая энергетика как инновационные элементы четвертого энергоперехода // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2021. Т. 14. № 6. С. 67–77.

26. Постановление Правительства РФ от 21.03.2020 г. № 320. Изменения, которые вносятся в акты правительства Российской Федерации по вопросам функционирования активных энергетических комплексов. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_348358
27. Сизиков С.В. Активные энергетические комплексы как новый формат отношений на розничных рынках // Главный энергетик. 2022. № 1. С. 52–54.
28. Каранина Е.В., Кочетков М.Н., Бортников М.А. Создание активных энергетических комплексов в ТЭСЭР: формирование нового субъекта рынка энергетики и оценка экономических (коммерческих) эффектов от его внедрения // Вестник Академии. 2020. № 2. С. 74–85.
29. Проценко П.П., Лисовский В.В. Интеграция распределенной генерации в ЕЭС России в составе активных энергетических комплексов // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2021. № 93. С. 79–82.
30. Carvajal C.R., García-Muñiz A.S., Cuartas B.M. Assessing socioeconomic impacts of integrating distributed energy resources in electricity markets through input-output models // Energies. 2019. Т. 12. № 23. С. 4486.
31. Wang T., Guo J., Ai S., Cao J. RBT: a distributed reputation system for blockchain-based peer-to-peer energy trading with fairness consideration // Applied Energy. 2021. Т. 295. С. 117056.
32. World energy balances 2020 IEA. Report of International Energy Agency. 732 p. URL: <http://data.iea.org>.
33. Дзюба А.П. Электроэнергетика как фактор развития экономики России // Вестник Удмуртского университета. Серия экономика и право. 2020. № 2. С. 191–199.
34. Statistical Review of World Energy / Материалы официального интернет-сайта «British Petroleum». URL: <https://www.bp.com/>
35. Дзюба А.П., Семиколенов А.В. Актуальность применения активных энергетических комплексов в промышленности России // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2021. № 9 (201). С. 31–40. DOI: 10.33285/1999-6942-2021-9(201)-31-40
36. Дзюба А.П., Соловьева И.А. Управление спросом на энергоресурсы в глобальном экономическом пространстве. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. 260 с.

References

1. *Energeticheskaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2035 goda. Utverzhdena Rasporyazheniem Pravitel'stva RF № 1523-r ot 09.06.2020 g* [Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035 / Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 1523-p as of 06/09/2020]. URL: <https://cloud.consultant.ru/>
2. Voropaj N.I., Kejko A.V., Kler A.M., Stennikov V.A. Technical and economic problems of using non-traditional energy. *Problemy netradicionnoj energetiki* [Problems of non-traditional energy. Materials of the scientific session of the Presidium of the SB RAS]. Novosibirsk, 2006, pp. 32–54. (In Russ.)
3. Byk F.L., Myshkina L.S. Reliability of objects of distributed energy generation. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki* [Reliability and safety of energy generation], 2021, vol. 14, no. 1, pp. 45–51. (In Russ.)
4. Papkov B.V., Osokin V.L. Features of assessing the structural reliability of systems with distributed generation facilities. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika* [Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Energy Sector], 2020, no. 2, pp. 75–84. (In Russ.)
5. Arteconi A., Brandoni C., Polonara F. Distributed generation and trigeneration: energy saving opportunities in Italian supermarket sector. *Applied Thermal Engineering*, 2009, vol. 29, no. 8-9, pp. 1735–1743.
6. Lujano-Rojas J.M., Yusta J.M., Domínguez-Navarro J.A. Mitigating energy system vulnerability by implementing a microgrid with a distributed management algorithm. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 4, p. 616.
7. Ochoa L.F., Harrison G.P. Minimizing energy losses: optimal accommodation and smart operation of renewable distributed generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 198–205.
8. Galperova E. A methodological approach to assessing the possible effect of distributed generation expansion on regional energy supply systems. *Energy Systems Research*, 2021, vol. 4, no. 2 (14), pp. 64–69.
9. Armashova-Tel'nik G.S., Batalin F.A., Bobovich T.A. Ways to reduce the cost of electricity supply to enterprises using distributed energy generation technologies. *Aktual'nye problemy ekonomiki i upravleniya* [Relevant Problems of Economics and Management], 2019, no. 1 (21), pp. 15–17. (In Russ.)
10. Kohtavshili N.T., Panyaeva V.D., Sharkov I.A., Zimin A.M. Evaluation of the economic efficiency of the use of distributed generation based on renewable energy sources on the example of a region of the Russian Federation. *Alleya nauki* [Alley of Science], 2020, vol. 1, no. 8 (47), pp. 418–422. (In Russ.)
11. Sadek S.M., Omran W.A., Hassan M.A.M., Talaat H.E.A. Adaptive robust energy management for isolated microgrids considering reactive power capabilities of distributed energy resources and reactive power costs. *Electric Power Systems Research*, 2021, vol. 199. S. 107375.

12. Nikam V., Kalkhambkar V. A review on control strategies for microgrids with distributed energy resources, energy storage systems, and electric vehicles. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, vol. 31, no. 1, p. e12607.
13. Jin T., Yu Y., Elsayed E. Reliability and quality control for distributed wind/solar energy integration: a multi-criteria approach. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 2015, vol. 47, no. 10, pp. 1122–1138.
14. Meng W., Wang X. Distributed energy management in smart grid with wind power and temporally coupled constraints. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, vol. 64, no. 8, pp. 6052–6062.
15. Ahmad N.A., Byrd H. Empowering distributed solar PV energy for Malaysian rural housing: towards energy security and equitability of rural communities. *International Journal of Renewable Energy Development*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 59–68.
16. Byk F.L., Ilyushin P.V., Myshkina L.S. Features and prospects for the development of distributed energy generation in Russia. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika*, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 78–87. (In Russ.)
17. Vas'kov A.G., Garmashuk E.E. Trends in the development of distributed generation. Non-traditional sources of electricity. *Internauka*, 2020, no. 26-2 (155), pp. 9–10. (In Russ.)
18. Ahl A., Yarime M., Tanaka K., Sagawa D. Review of blockchain-based distributed energy: implications for institutional development *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 107, pp. 200–211.
19. Hou J., Wang C., Luo S. How to improve the competitiveness of distributed energy resources in China with blockchain technology. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, vol. 151, p. 119744.
20. Sultanov M.M., Arakelyan E.K., Boldyrev I.A., Lunenko V.S., Menshikov P.D. Digital twins application in control systems for distributed generation of heat and electric energy. *Archives of Thermodynamics*, 2021, vol. 42, no. 4, pp. 89–101.
21. Valdivia A.D., Balcell M.P. Connecting the grids: a review of blockchain governance in distributed energy transitions. *Energy Research and Social Science*, 2022, vol. 84, pp. 102383.
22. Abdeltawab H.M., Mohamed Y.A.I. Distributed battery energy storage co-operation for renewable energy sources integration. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 20, P. 5517.
23. Bolotov P.V. Application of blockchain technology in distributed generation based on renewable energy sources. *KIP i avtomatika: obsluzhivanie i remont* [Instrumentation and Automation: Maintenance and Repair], 2021, no. 7, pp. 35–40. (In Russ.)
24. Voroncov A.V. Evaluation of prospects for the development of distributed generation in Russia within the framework of the development of the Russian energy sector. *Vestnik universiteta* [Bulletin of the University], 2014, no. 14, pp. 115–120. (In Russ.)
25. Kvasha N.V., Bondar' E.G. Distributed and digital energy as innovative elements of the fourth energy transition. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politeknicheskogo universiteta. Ekonomicheskie nauki* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics], 2021, vol. 14, no. 6, pp. 67–77. (In Russ.)
26. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 21.03.2020g. №320. Izmeneniya, kotorye vnosyatsya v akty pravitel'stva rossijskoj federacii po voprosam funkcionirovaniya aktivnyh energeticheskikh kompleksov* [Decree of the Government of the Russian Federation No. 320 as of March 21, 2020. Changes that are made to the acts of the government of the Russian Federation on the functioning of active energy complexes]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_348358
27. Sizikov S.V. Active energy complexes as a new format of relations in retail markets. *Glavnyj energetik* [Chief Power Engineer], 2022, no. 1, pp. 52–54. (In Russ.)
28. Karanina E.V., Kochetkov M.N., Bortnikov M.A. Creation of active energy complexes in the Priority Social and Economic Development Area: the formation of a new subject of the energy market and the assessment of economic (commercial) effects from its implementation. *Vestnik Akademii* [Bulletin of the Academy], 2020, no. 2, pp. 74–85. (In Russ.)
29. Procenko P.P., Lisovskij V.V. Integration of distributed generation in the Unified Energy System of Russia as part of active energy complexes. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i ekonomicheskie nauki* [Bulletin of Amur State University. Series: Natural and Economic Sciences], 2021, no. 93, pp. 79–82. (In Russ.)
30. Carvajal C.R., García-Muñiz A.S., Cuartas B.M. Assessing socioeconomic impacts of integrating distributed energy resources in electricity markets through input-output models. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 23, p. 4486.
31. Wang T., Guo J., Ai S., Cao J. RBT: a distributed reputation system for blockchain-based peer-to-peer energy trading with fairness consideration. *Applied Energy*, 2021, vol. 295, p. 117056.
32. World energy balances 2020 IEA. Report of International Energy Agency. 732 p. URL: <http://data.iaea.org>

33. Dzyuba A.P. Power industry as a factor in the development of the Russian economy. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya ekonomika i pravo* [Bulletin of the Udmurt University. Economics and Law Series], 2020, no. 2, pp. 191–199. (In Russ.)

34. *Statistical Review of World Energy*. URL: <https://www.bp.com/>

35. Dzyuba A.P., Semikolenov A.V. The relevance of the use of active energy complexes in the Russian industry. *Problemy ekonomiki i upravleniya neftegazovym kompleksom* [Problems of economics and management of oil and gas complex], 2021, no. 9 (201), pp. 31–40. (In Russ.) DOI: 10.33285/1999-6942-2021-9(201)-31-40

36. Dzyuba A.P., Solov'eva I.A. *Upravlenie sprosom na energoresursy v global'nom ekonomicheskom prostranstve* [Energy Demand Management in the Global Economic Space]. Chelyabinsk, 2021. 260 p.

Информация об авторах

Дзюба Анатолий Петрович, старший научный сотрудник кафедры «Экономика и финансы» ВШЭУ, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, dzyuba-a@yandex.ru

Семиколонов Александр Викторович, соискатель кафедры «Экономика и финансы» ВШЭУ, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, semikolenov83@yandex.ru

Information about the authors

Anatoly P. Dzyuba, Senior Researcher of the Department of Economics and Finance of the School of Economics and Management, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, dzyuba-a@yandex.ru

Alexander V. Semikolenov, postgraduate student of the Department of Economics and Finance of the School of Economics and Management, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, semikolenov83@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 01.07.2022

The article was submitted 01.07.2022