ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Научная статья Энергетика

Определение индекса технического состояния энергокомплексов производственных объектов в системе поддержки принятия решений по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры газовой отрасли

А.А.Шаповало[1]✉, **В.К.Аверьянов**[2], **Ю.В.Сербин**[2]
[1] *ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, Россия*
[2] *АО «Газпром промгаз», Санкт-Петербург, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Шаповало А.А., Аверьянов В.К., Сербин Ю.В. Определение индекса технического состояния энергокомплексов производственных объектов в системе поддержки принятия решений по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры газовой отрасли // Записки Горного института. 2025. Т. 276. Вып. 1. С. 115-128. EDN FDIGKL

Аннотация
Изменения условий хозяйствования предприятий газовой отрасли и нормативной базы создания и эксплуатации объектов энергетики требуют развития энергетической инфраструктуры производственных объектов. Многообразие и большое количество существующих объектов энергетики, а также применение риск-ориентированного подхода к управлению газовой отраслью приводят к необходимости создания систем поддержки принятия решений по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры производственных объектов в масштабе отрасли. Цель исследования – разработка комплекса математических моделей определения индекса технического состояния энергокомплексов производственных объектов, используемого для подготовки структурированной информации в рамках создания системы поддержки принятия решений по стратегическому развитию системы, позволит принять решение о минимально необходимом объеме и сроках реконструкции энергетической инфраструктуры производственного объекта в современных условиях при ограничениях на финансирование реконструкции. Решение подобной многокритериальной задачи потребовало: обоснования множества допустимых альтернатив решения, оценки рисков при принятии конкретных решений, разработки системы и математических зависимостей оценки критериальных показателей, составляющих индекса технического состояния с учетом предпочтений и решающих правил, а также правил определения весомости составляющих оценки в величине интегрального показателя. На основе разработанных математических моделей сформулирован алгоритм определения индекса технического состояния одиночного энергокомплекса производственного объекта, являющийся составной частью обобщенного алгоритма применения математического обеспечения системы поддержки принятия решений по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры предприятий газовой отрасли.

Ключевые слова
объекты энергетики; газовая отрасль; система поддержки принятия решений; математическое обеспечение; индекс технического состояния; риск-ориентированный подход

Поступила: 16.10.2024 ***Принята: 28.01.2025*** ***Онлайн: 25.06.2025*** ***Опубликована: 29.12.2025***

Введение

Обеспечение высокого уровня конкурентоспособности в условиях динамичного изменения условий хозяйствования предприятий газовой отрасли [1, 2] невозможно без улучшения комплексных бизнес-процессов, включая выработку оптимальных решений по развитию энергетической инфраструктуры производственных объектов[1], в условиях применения риск-ориентированного подхода (РОП) к управлению в отрасли, предполагающего рамочные ограничения в финансировании различного рода программ.

С использованием известных детерминированных подходов сложно принять обоснованное решение по составлению сбалансированных перечней мероприятий комплексных целевых

[1] СТО Газпром 2-2.3-141-2007. Энергохозяйство ОАО «Газпром». Термины и определения.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

программ реконструкции и технического перевооружения энергетических объектов для совокупности различных производственных объектов (ПрОб) газовой отрасли с большим числом энергетических систем различного профиля. Действенным средством помощи в процессе принятия решений по развитию иерархически сложных производственных комплексов является применение систем поддержки принятия решений (СППР) [3-5].

Структурирование информации о техническом уровне и состоянии анализируемых объектов энергетики, в том числе с использованием разработанных методов анализа [6, 7], выполняемое в рамках научно обоснованной системы поддержки принятия решений, позволяет улучшить бизнес-процесс принятия комплексного решения по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры предприятий газовой отрасли.

СППР по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры базируется на математическом обеспечении, позволяющем количественно определить весь спектр значимых показателей и критериев, оценивающих объекты энергетики на текущий момент и в перспективе, в том числе с применением различных вариантов технических решений по их реконструкции с учетом положений принятой Концепции развития энергоснабжения производственных объектов газовой отрасли [6].

Оценка предприятий газовой отрасли в настоящее время складывается из оценок отдельных производственных объектов с обеспечивающими их функционирование системами электроснабжения, теплоснабжения, водоснабжения и водоотведения, а также системами промышленной вентиляции и кондиционирования воздуха, которые предложено [6] рассматривать в виде единых энергетических комплексов (ЭК). Состояние и технический уровень энергокомплексов, а также их соответствие заданным требованиям авторы [7, 8] предлагают оценивать путем определения индекса технического состояния (ИТС). Представляется актуальной разработка математических моделей и алгоритмов определения индекса технического состояния ЭК ПрОб, позволяющих обеспечить информационную поддержку в рамках СППР по управлению стратегическим развитием энергетической инфраструктуры с учетом недопущения снижения уровня конкурентоспособности предприятий отрасли, связанного с появлением неоправданных рисков из-за несоответствия технического уровня и состояния производственных объектов изменившимся требованиям в условиях применения РОП к управлению в газовой отрасли.

Методы

Функционирование энергетической инфраструктуры производственных объектов в условиях применения РОП к управлению их развитием приводит к необходимости учета целого ряда рисков [9, 10], среди которых для ЭК ПрОб газовой отрасли наиболее значимыми являются:

• рыночные риски газовой отрасли, вызывающие изменение объемов добычи, хранения, переработки и товарно-транспортной работы, а также необходимость диверсификации товарной продукции, что изменяет требования к энергетике ПрОб по номенклатуре и объемам вырабатываемых (передаваемых) объектами энергетики энергоресурсов;

• экологические риски, приводящие к необходимости компенсации причиненного ущерба окружающей среде и затратам на доведение технических решений ЭК ПрОб до вновь заданных экологических требований;

• производственно-технические риски, связанные с ростом потенциального ущерба из-за вероятных отказов энергетического оборудования, вызванных различными причинами, включая повышенный физический износ, некачественное выполнение технического обслуживания, текущего и капитального ремонтов (ТО, ТР и КР) оборудования, а также совершения ошибок оперативным персоналом.

Задачей математического обеспечения определения ИТС ЭК ПрОб является подготовка структурированной информации для принятия решения о минимально необходимом объеме и сроках реконструкции энергетической инфраструктуры с целью обеспечения эффективного функционирования производственного объекта в современных условиях при ограничениях на финансирование реконструкции в условиях применения РОП.

Анализ источников [11-13 и др.] показал, что математические модели и алгоритмы в настоящее время активно и успешно используются для решения ряда задач систем поддержки принятия решений различного назначения. Вместе с тем, в литературе приводятся, как правило, только отдельные фрагменты разработки СППР [12-14], либо рассматриваются общие вопросы их использования [15-17].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Описание математического обеспечения для определения ИТС ЭК ПрОб в условиях действия ограничений, вносимых применением РОП к управлению развитием газовой отрасли, в литературе в настоящее время отсутствует, поэтому требуется его разработка.

Математическое обеспечение СППР по управлению стратегическим развитием энергетической инфраструктуры применительно к оценке ИТС ЭК одиночного ПрОб

Комплекс технологических задач, решаемых предприятиями газовой отрасли, определяет состав производственных объектов и соответствующий ему состав энергетических объектов, позволяющих решать эти задачи. Необходима оценка соответствия решаемым технологическим задачам следующих иерархий энергокомплексов:

• отдельного производственного объекта (установки комплексной подготовки газа, компрессорной станции, газораспределительной станции и пр.);

• группы объектов добычи, объектов транспортировки углеводородного сырья или продуктов переработки по магистральным газопроводам (газоконденсатного месторождения, магистрального газопровода, газоперерабатывающего завода);

• группы объектов отдельного предприятия газовой отрасли и газовой отрасли в целом.

Базовой ячейкой разрабатываемого комплекса математических моделей и алгоритмов СППР по управлению развитием энергетической инфраструктуры предприятий отрасли является математическое обеспечение, предназначенное для оценки ИТС ЭК отдельного ПрОб. Структура ЭК отдельного ПрОб приведена в статье [7], их показатели в дальнейшем используются для определения характеристик энергокомплексов групп ПрОб.

Требования к разрабатываемому комплексу математических моделей

С учетом перечня предлагаемых к решению задач [7], принято следующее:

• математические модели создаются для определения ИТС ЭК типовых ПрОб добычи, хранения, транспортировки природного газа. Оценка показателей энергетической инфраструктуры уникальных производственных объектов обеспечивается за счет дополнительной адаптации базового математического обеспечения к условиям конкретных объектов;

• оцениваемые энергетические комплексы на момент создания полностью соответствовали требованиям действующих нормативных документов и обеспечивали функционирование без ограничений производственного объекта, т.е. ИТС имел максимальное значение, равное единице;

• технические решения систем, входящих в состав ЭК ПрОб, оцениваются одновременно по комплексному критерию технологической результативности и безопасности и комплексному критерию экономической эффективности [6, 18];

• составляющие, входящие в ИТС ЭК ПрОб, определяются при использовании минимально необходимого количества доступных исходных данных;

• оценка величин показателей существующих ЭК выполняется с учетом срока их эксплуатации;

• математические модели и алгоритм их применения способствуют выявлению критичных изменений требований к энергетической инфраструктуре со стороны ПрОб и выбору минимально достаточного организационно-технического решения для их достижения;

• математические модели определения отдельных составляющих ИТС и самого ИТС обеспечивают сравнимость одноименных показателей при оценке ЭК ПрОб различного типа и позволять формировать тренды показателей при изменении сценарных условий, что способствует принятию обоснованных решений при формировании перечней мероприятий по развитию ЭК в условиях РОП к управлению в отрасли;

• тренды величин показателей, критериев и ИТС ЭК ПрОб определяются на весь период коммерческого использования рассматриваемой энергетической инфраструктуры;

• математическое обеспечение оценки ИТС ЭК ПрОб позволяет оценивать риски от несоответствия существующих объектов энергетической инфраструктуры изменившимся требованиям по обеспечению функционирования производственного объекта в новых условиях, а также способствовать принятию вариантов реконструкции и нового строительства объектов энергетической инфраструктуры, соответствующих этим рискам.

Определение величины ИТС ЭК ПрОб с целью принятия решения о необходимости совершенствования энергокомплекса в современных условиях (после изменения требований к энергоснабжению или условий хозяйствования) является многокритериальной задачей, которую можно представить следующим кортежем [19]:

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

$$< t, X, R, A, F, G, D >,$$

где t – тип задачи (1 – разработка и создание ЭК, оценивается соответствие показателям технического задания, 2 – эксплуатация ЭК, оценивается соответствие изменившимся требованиям к ЭК в процессе эксплуатации); X – множество допустимых альтернатив решения задачи развития ЭК (от полной реконструкции до совершенствования отдельной установки с целью улучшения отдельного критериального показателя); R – множество критериев, составляющих оценки ИТС ЭК; A – множество шкал оценки критериев, применимых для различных этапов жизненного цикла ЭК; F – отображение множества допустимых альтернатив на множестве оценок рисков при принятии конкретных решений по развитию ЭК; G – система предпочтений лица, принимающего решение (ЛПР), использующая предпочтения для различных периодов жизненного цикла ЭК; D – решающее правило, отражающее систему предпочтений ЛПР для ЭК различных типов ПрОб.

Далее рассмотрим вариант поддержки принятия решений на этапе эксплуатации ЭК ПрОб.

Перечень рисков, напрямую связанных с изменениями требований к энергоснабжению [9, 20, 21], позволил определить минимально достаточный перечень оцениваемых комплексных показателей ЭК ПрОб:

• возможность обеспечения определенного количества и качества энергоресурсов, количества и качества очистки воды и стоков во всех заданных режимах функционирования объекта;

• оценка надежности работы оборудования, входящего в состав ЭК, связана с обеспечением требуемых объемов и сроков поставки продукции предприятий газовой отрасли потребителям;

• оценка экологической, конструкционной, электро-, пожаро- и взрывобезопасности энергокомплексов, а также энергоэффективности реализуемых ими технологических процессов, экономичности создания и эксплуатации, связана с обеспечением требований к ПрОб с точки зрения безопасности и эффективности его функционирования.

В соответствии с принятой Концепцией развития энергоснабжения производственных объектов газовой отрасли [6, 22] и действующими нормативными документами[2], оценку энергетических комплексов каждого конкретного производственного объекта предлагается выполнять следующим образом.

1. Определяются показатели пяти систем, входящих в ЭК ПрОб, по семи комплексным технико-экономическим критериям.

• Системы, входящие в ЭК ПрОб: электроснабжения (СЭС, i = 1); теплоснабжения (СТС, i = 2); водоснабжения (СВС, i = 3); водоотведения (СВО, i = 4); промышленной вентиляции и кондиционирования воздуха производственных и административно-бытовых зданий и сооружений (СВиКВ, i = 5).

• Комплексные критерии: обеспеченность количеством энергоресурсов (j = 1); качество энергоресурсов (j = 2); надежность оборудования (j = 3); безопасность эксплуатации ЭК (j = 4); энергоэффективность функционирования (j = 5); совершенство эксплуатации ЭК (j = 6); затраты на создание и эксплуатацию (j = 7).

2. Определяются технико-экономические показатели, критерии и ИТС для ЭК ПрОб в целом.

Описание математического обеспечения для определения ИТС ЭК ПрОб выполняется по принципу «система, входящая в ЭК-показатель» с присвоением всем величинам соответствующих индексов – R_{ij} для отдельных систем энергоснабжения и $R_{ЭК}$ для ЭК ПрОб в целом.

Математические модели определения ИТС ЭК производственных объектов

Исходные данные для расчета показателей, составляющих ИТС ЭК ПрОб. Вопросам моделирования отдельных свойств энергетического оборудования и систем энергоснабжения посвящены работы [22-24 и др.], особенности применения моделей в СППР различного типа рассмотрены в [25]. Для выполнения расчетов по приведенным в анализируемых источниках моделям требуется использование большого количества исходной информации, поиск которой требует существенных трудозатрат, особенно с учетом разнообразия технических решений существующих и проектируемых энергетических объектов.

В рассматриваемом подходе для снижения затрат времени на сбор исходных данных и разработку математического обеспечения сравнительной оценки состояния ЭК ПрОб авторами [6]

[2] СТО Газпром 18000.1-002-2020. Идентификация опасностей и управление рисками в области производственной безопасности.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

предлагается выявлять наиболее типичные сочетания технических решений входящих в их состав СЭС, СТС, СВС, СВО и СВиКВ с характерными наборами энергетического оборудования.

Результаты разработки математических моделей показали возможность выполнения сравнительных оценок отдельных показателей и оценки ИТС ЭК ПрОб в части решения задач по управлению стратегическим развитием ЭК предприятий газовой отрасли с использованием доступного для руководителей служб эксплуатации ПрОб блока исходной информации без привлечения сторонних специалистов высокой квалификации.

Определение величин комплексных технико-экономических показателей систем, входящих в ЭК ПрОб. Основным назначением разработанных математических моделей является оценка величин показателей ЭК конкретных ПрОб для определения соответствия изменившимся требованиям. В условиях существенной неопределенности исходной информации по всей совокупности оборудования энергетических объектов, входящих в состав ЭК, оценки выполняются в сравнении с «базовым» (проектным) состоянием по одинаковым для всех объектов энергетики газовой отрасли косвенным признакам, характеризующим состояние и технический уровень технических решений СЭС, СТС, СВС, СВО и СВиКВ.

Математические модели оценки величин отдельных показателей разделены на две группы: требующие расчетов по математическим зависимостям и требующие выставления балла соответствия по правилам.

К первой группе относятся модели определения следующих критериев: обеспеченность количеством энергоресурсов R_{i1}, надежность энергооборудования ЭК R_{i3}, затраты на создание и эксплуатацию ЭК R_{i7}.

Критерий обеспеченности количеством энергоресурсов определяется отношением максимально возможного количества энергоресурса (электрической или тепловой энергии), подачи исходной воды, воздуха, отведения и очистки стоков по отношению к соответствующему требуемому количеству (на примере СЭС):

$$R_{i1} = \frac{P_{1\,\text{возм}}}{P_{1\,\text{треб}}},$$

где $P_{1\,\text{возм}}$ – суммарная максимально возможная мощность источников электроэнергии для анализируемого уровня напряжения с учетом максимального коэффициента их загрузки и обеспечения заданной надежности, кВт; $P_{1\,\text{треб}} = P_{\text{год max}}$ – максимальная проектная или максимальная фактическая электрическая мощность для анализируемого уровня напряжения за период последних 5 лет, кВт.

Критерий определяется для энергетических ресурсов и рабочих сред необходимой номенклатуры: электрической энергии с различными уровнями напряжения переменного и постоянного тока; тепловой энергии в виде пара и теплоносителя для отопления и горячего водоснабжения производства, на хозяйственно-бытовые нужды и т.п.

Расчет критерия выполняется для совместимых по времени самого энергоемкого режима работы производственного объекта, самого неблагоприятного режима компенсации микроклимата (для систем теплоснабжения, СВиКВ), максимального потребления исходной воды и очистки максимального количества стоков всех видов при питании от основных и резервных источников энергоресурсов и воды.

Критерий надежности оборудования ЭК R_{i3} определяется путем анализа схемно-технического решения системы энергоснабжения. При отсутствии статистической информации по отказам надежность оборудования косвенно определяется величиной относительного срока службы (отношением фактического срока службы $T_{\text{ф}}$ энергетического оборудования к назначенному сроку службы $T_{\text{н}}$): $R_{i3} = T_{\text{ф}} / T_{\text{н}} <=> 1$.

При величине критерия надежности оборудования ниже единицы оборудование эксплуатируется в пределах срока службы и соответствует проектному значению. При увеличении срока нахождения энергетического объекта в эксплуатации более назначенного срока службы величина относительного времени нахождения его в эксплуатации становится больше единицы, что приводит к снижению величины среднего времени наработки до отказа наименее надежного элемента в

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

соответствии с распределением Вейбулла[3] и снижением надежности системы по отношению к проектной.

Величина критерия R_{i3} определяется для всех систем, входящих в ЭК по группам потребителей энергоресурсов и воды, отводу и очистке стоков.

Критерий затрат на создание и эксплуатацию R_{i7} определяется в соответствии с общепринятыми правилами, включая расчет капитальных вложений в строительство (реконструкцию) на основе калькуляции или сметной документации для отдельных подсистем, систем и ЭК в целом; затрат на эксплуатацию подсистем, систем и ЭК ПрОб (приобретение топлива, энергетических ресурсов и воды, плата за сброс очищенных с различным качеством стоков; издержки на текущее обслуживание, текущий и капитальный ремонты ТО, ТР и КР; ущербы от отказа энергетического оборудования),

$$R_{i7\text{созд-реконстр}} = \text{КВ}_{\text{создание } i} + \sum\left(\text{КВ}_{\text{реконстр.}ik}\right),$$

$$R_{i7\text{экспл}} = \sum\left(\text{З}_{\text{экспл.}in}\right),$$

где $\text{КВ}_{\text{создание } i}$ – капитальные вложения в создание системы, млн руб.; $\text{КВ}_{\text{реконстр.}ik}$ – капитальные вложения в *k*-ю реконструкцию системы за жизненный цикл (ЖЦ), млн руб.; $\text{З}_{\text{экспл.}in}$ – затраты на ведение режима (включая затраты на приобретение энергоресурсов, штрафы и пени из-за несоответствия ЭК требованиям нормативных документов, ущербы от возможных отказов оборудования ЭК), ТО, ТР и КР за *n*-й год эксплуатации ЭК в течение ЖЦ, млн руб. за год.

Отличием расчетов величин, составляющих критерий R_{i7}, по разработанным моделям от общепринятых является определение эксплуатационных затрат и ущербов от отказа энергетического оборудования в зависимости от срока службы ЭК ПрОб. При нахождении ЭК за пределами назначенного срока службы затраты на эксплуатацию увеличиваются. Увеличение определяется совместно статистическими расчетными и экспертными методами.

Ко второй группе (применительно к этапу апробации разработанного математического обеспечения СППР) отнесены все остальные комплексные критерии, определяемые по следующим правилам.

Критерий качества энергоресурсов R_{i2} определяет соответствие качества всех видов энергоресурсов R_{i2l}, вырабатываемых (передаваемых) всеми подсистемами, системами всем группам потребителей. Определяется на основании замеров параметров энергоресурсов на входе потребителя: $R_{i2} = f\,(R_{i21}, R_{i22}, \ldots, R_{i2l})$.

Критерий безопасности эксплуатации R_{i4} определяет соответствие всех энергетических объектов, входящих в ЭК ПрОб, требованиям нормативных документов по следующим составляющим: конструкционной, пожаро- и взрывобезопасности, электробезопасности, безопасности по требованиям котлонадзора и экологической безопасности. Величины составляющих критерия безопасности R_{i4l} определяются актами проверки требований безопасности с разделением на системы и виды безопасности: $R_{i4} = f\,(R_{i41}, R_{i42}, \ldots, R_{i4l})$.

Критерий энергоэффективности функционирования R_{i5} определяет соответствие объектов энергетики, входящих в ЭК ПрОб, требованиям нормативных документов по следующим составляющим: удельное потребление всех видов энергоресурсов, потери всех видов энергоресурсов при функционировании энергетических объектов во всех режимах. Величины составляющих критерия энергоэффективности R_{i5l} определяются по результатам энергообследования ЭК составом внедренных систем автоматизации с целью энергосбережения: $R_{i5} = f\,(R_{i51}, R_{i52}, \ldots, R_{i5l})$.

Критерий совершенства эксплуатации R_{i6} определяет эффективность ведения режима систем энергоснабжения, выполнения работ по ТО, ТР и КР оборудования всех энергетических объектов, входящих в состав ЭК ПрОб, в зависимости от уровня интеграции ЭК в системы автоматизации объекта и предприятия: $R_{i6} = f\,(R_{i61}, R_{i62})$.

Балл соответствия по перечисленным критериям выставляется экспертами по заранее определенным правилам.

[3] ГОСТ Р 50779.27-2017. Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Правила для выставления балла соответствия (на примере критерия безопасности эксплуатации): 5 – нет актов по нарушениям видов безопасности; 4 – не норма по несущественному параметру; 3 – не норма по существенному параметру; 2 – не норма по ряду существенных параметров; 1 – имеется предписание о приостановке эксплуатации системы.

Приведенные модели позволяют численно определить величины критериев отдельных систем, входящих в ЭК, в единицах и баллах соответствия.

В дальнейшем, после накопления достаточной статистической информации по объектам оценки, предполагается совершенствовать наполнение составляющих ИТС и математические модели для их оценки, а также более полно интегрировать модели оценки в автоматизированную систему определения ИТС ЭК ПрОб с целью минимизации человеческого фактора.

Обеспечение сравнимости оценок критериальных показателей ЭК различных типов. Сравнимость величин, составляющих ИТС, предлагается обеспечить следующим методом:

• Выполняется интерпретация для каждого показателя, входящего в ИТС, при этом определяется, какое из значений конкретного показателя (наибольшее или наименьшее) является лучшим с точки зрения обеспечения максимума величины ИТС ЭК.

• Определяется база нормирования (лучшие значения показателей $R_{j\,\text{баз}}$) для оценки одноименных показателей всех систем и составляющих комплексных показателей, участвующих в сравнении.

• Выполняется нормирование расчетных величин отдельных показателей или критериев:

для случая, когда наилучшее значение показателя максимально,

$$r_j = \frac{R_j}{R_{\text{баз}}},$$

для случая, когда наилучшее значение показателя минимально,

$$r_j = \frac{R_{\text{баз}}}{R_j}.$$

В результате нормирования величины всех показателей и критериев оказываются в интервале 0…1, наибольшее значение нормированного показателя или критерия означает наилучшее состояние ЭК с точки зрения обеспечения максимума величины ИТС оцениваемой подсистемы, системы или ЭК по данному показателю (критерию).

• Величины нормированных показателей (критериев) для всех оцениваемых систем ПрОб сводятся в матрицы одинаковой размерности. В случае отсутствия в составе конкретного ЭК определенного типа одной из систем или подсистем (например, отсутствие системы водоснабжения в составе энергокомплекса вдоль трассовых потребителей или отсутствие среднего уровня напряжения в СЭС, или отсутствие выработки пара на котельной в СТС) соответствующие элементы матрицы заполняются единицами. Таким образом исключается влияние этих показателей на величину интегральной оценки при свертке показателей.

• Выполняется свертка составляющих для определения комплексных критериев по каждой из систем, входящих в ЭК, и для определения величины ИТС ЭК ПрОб. Свертка производится с использованием сепарабельного свертывания при геометрическом усреднении. Подобный способ свертки отдельных свойств позволяет получать максимальное значение интегрального показателя (критерия) в случае наилучшего сочетания оценок отдельных свойств с учетом их весомости (значимости), при этом величина критерия с учетом его значимости тем больше, чем выше вес критерия в составе интегральной оценки [26, 27]. Отсутствующие для конкретных систем свойства со значением «1» не изменяют величины критерия, а сама величина критерия или ИТС после свертки находится в пределах интервала 0…1.

При определении величин коэффициентов весомости составляющих комплексных критериев, входящих в интегральный показатель ИТС ЭК ПрОб, могут использоваться различные методы. Наиболее часто применяемыми являются экспертные, статистические, предельных и номинальных значений, а также различные стоимостные методы [28-30].

Перечисленные методы определения весомости отдельных показателей (критериев) имеют свои достоинства и недостатки. Полученные значения весомостей должны позволять получить

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

адекватные для решаемой задачи результаты – формировать оптимальный перечень мероприятий для достижения минимально достаточного уровня отдельных показателей и ИТС ЭК ПрОб в условиях минимизации затрат на проведение оценки индекса технического состояния.

В рамках разработанного математического обеспечения и в соответствии с полученным трехуровневым «деревом свойств» ЭК ПрОб (рис.1) требуется определить весомости критериев для трех уровней.

Уровень 3. Весомость отдельных *l*-х составляющих в рамках величины конкретного комплексного критерия $K_{в1jl}$ (например, составляющие критерия количества электрической энергии СЭС по уровням напряжения и видам тока, или надежность функционирования источников и СВО,

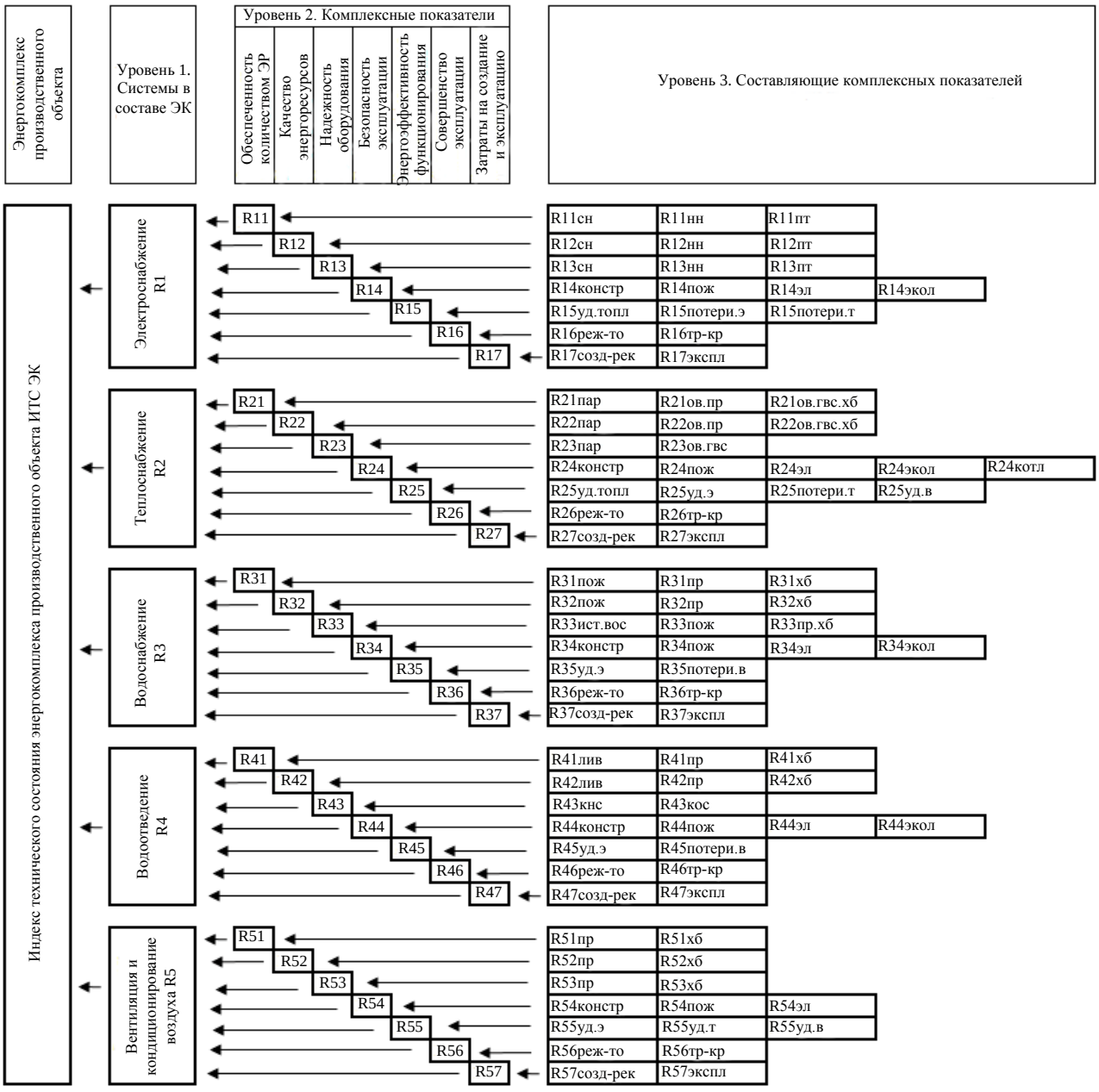


Рис.1. «Дерево свойств» для оценки показателей энергокомплекса производственного объекта

сн / нн / пт – среднее /низкое напряжение / напряжение постоянного тока; пар / ов.пр / ов.гвс.хб – пар / тепло на отопление и вентиляцию для производства / тепло и горячее водоснабжения на хозяйственно-бытовые нужды; пож / пр / хб – противопожарное / производственное / хозяйственно-бытовое водоснабжение; лив / пр / хб – водоотведение ливневых / производственных / хозяйственно-бытовых стоков; пр / хб – производственная / хозяйственно-бытовая вентиляция и кондиционирование воздуха; кос / вос / кнс – канализационные очистные сооружения / водоочистные сооружения / канализационные насосные станции; констр / пож / эл / экол / котл – конструкционная безопасность / пожаро-взрывобезопасность / экологическая безопасность / электробезопасность / безопасность по требованиям котлонадзора; уд.топл / уд.э / уд.т / уд.в – удельное потребление топлива, электроэнергии, тепла, воды; потери.э / т / в – потери электроэнергии / тепла / воды; то / тр-кр – техническое обслуживание / текущий и капитальный ремонт; созд-рек / экспл – создание и реконструкция / эксплуатация

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

составляющих систем водоснабжения для нужд пожаротушения или производства и хозяйственно-бытовых нужд). Весомость отдельных составляющих $K_{в1jl}$ может быть определена экспертами. Экспертная группа состоит из шести и более экспертов высокой квалификации с наивысшим уровнем информированности об объекте оценки и высоким уровнем адаптации к источникам информации [29, 31, 32].

Проведенные в рамках апробации разработанного математического обеспечения оценки показали, что значимость составляющих в рамках комплексного критерия, как правило, указывается экспертами как одинаковая. Поэтому на настоящем этапе составляющие комплексных критериев учитываются с одинаковой весомостью:

$$K_{в1\,jl} = 1/l_j,$$

где l_j – количество составляющих в составе j-го комплексного показателя; сумма весов отдельных составляющих комплексного показателя в этом случае равна 1.

Уровень 2. Весомость комплексных критериев в составе интегрального показателя ИТС отдельной системы, входящей в ЭК, и ИТС энергетического комплекса в целом. Определение величин весомости критериев в составе ИТС требует привлечения экспертной группы, поскольку предполагает учет изменений условий хозяйствования предприятий газовой отрасли или другой сложно формализуемой информации. Такая оценка проводится в темпе изменения условий хозяйствования (например, один раз в год перед формированием целевых комплексных программ развития энергоснабжения), ее результаты $K_{в1j}$ применяются при оценке показателей ЭК ПрОб всех типов. Эксперты наивысшей квалификации для каждого j-го комплексного критерия выставляют балл от 1 до 10.

Сходимость оценок в пределах экспертной группы определяется методами математической статистики путем вычисления коэффициента конкордации [26]:

$$W = \frac{12C}{m^2(n^3 - n)},$$

где C – сумма квадратов отклонений сумм баллов по каждому параметру оценки от средней суммы баллов; m – количество экспертов; n – количество параметров оценки.

При значениях коэффициента конкордации более 0,5 сходимость мнений экспертов считается достаточной, для ее повышения выполняют повторные туры оценки после дополнительного повышения уровня информированности экспертов [29].

После получения достаточной сходимости мнений экспертов величины выставленных баллов нормируются с использованием правила 4. В качестве базового значения принимается сумма выставленных баллов по всем семи критериальным показателям.

Уровень 1. Весомость отдельных систем (СЭС, СТС, СВС, СВО, СВиКВ) $K_{в2i}$ в составе интегрального показателя ИТС ЭК. Величины весомостей указанного типа могут быть определены путем проведения экспертных оценок [33]. Применение для этой цели метода ранжирования, основанного на анализе количества и значимости связей между отдельными системами в структуре ЭК в зависимости от типа производственного объекта по методу Фишберна [34-36], представляется более предпочтительным.

Состав систем, подсистем и структура связей в ЭК ПрОб определены нормативными документами газовой отрасли и соответствуют типу производственного объекта, их значимость авторы предлагают определять сравнительной оценкой ущерба, который может получиться в случае отказа оборудования каждой из систем с использованием следующего способа шкалирования: 1 – нет ущерба (связь информационная); 2 – отказ системы приводит к отказу одной из систем ЭК и не приводит к прекращению технологического процесса на ПрОб; 3 – отказ системы приводит к отказу ЭК в целом и нарушению технологического процесса производственного объекта.

Общий вес отдельной системы определяется перемножением количества ее связей с другими системами ЭК на балл оценки ущерба при ее отказе. Полученная оценка весомости нормируется с использованием правила 4. В качестве базового значения принимается сумма полученных весов всех пяти систем.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Определение комплексных критериев и интегрального показателя ИТС ЭК производственного объекта. Свертка составляющих, входящих в отдельные комплексные критерии, и комплексных критериев в пределах отдельных систем ЭК ПрОб выполняется с выражениями

$$R_{ij} = \prod_{1}^{lj} r_{ijl}^{K_{в1jl}};$$

$$R_i = R_{ИТС\,i} \prod_{1}^{j} r_{ij}^{K_{в1j}},$$

где r_{ijl} – нормированное значение l-й составляющей j-го комплексного критерия для i-й системы ЭК ПрОб; r_{ij} – нормированное значение j-го комплексного критерия для i-й системы ЭК ПрОб; $K_{в1jl}, K_{в1j}$ – коэффициенты весомости отдельных l-х составляющих j-го комплексного критерия конкретного типа и самого j-го комплексного показателя в ИТС системы, входящей в ЭК ПрОб.

Свертка комплексных критериев отдельных систем ЭК ПрОб в интегральный показатель ИТС ЭК ПрОб выполняется в соответствии с выражением

$$ИТС_{ЭК} = R_{ЭК} = \prod_{1}^{i} r_i^{K_{в2i}},$$

где r_i – нормированное значение комплексного критерия для i-й системы ЭК ПрОб; $K_{в2i}$ – коэффициент весомости (значимость) i-й системы в составе ЭК ПрОб.

В результате применения комплексной оценки с учетом «дерева свойств» и весомости отдельных составляющих в комплексных критериях и интегральном показателе получена рангово-экспертная функция, позволяющая определить отклонение величины ИТС конкретного объекта от максимально достижимого значения при возможности выявления направления, которое в наибольшей мере влияет на улучшение величины ИТС энергокомплекса.

Алгоритм применения математических моделей определения ИТС одиночного ЭК в СППР. На основе предложенного комплекса математических моделей разработан алгоритм подготовки информации для построения трендов критериальных показателей и ИТС отдельных систем и ЭК на анализируемый период (рис.2). Продолжительность периода выбирается различной (например, может соответствовать назначенному сроку службы энергетического оборудования конкретного типа).

Сравнение расчетных и требуемых величин критериев на современном этапе позволяет выявлять несоответствия по всем значимым для энергетического оборудования параметрам с указанием величины рассогласования и периода возникновения критичного несоответствия. Величины критических несоответствий параметров ЭК связаны с возникновением производственно-технических и экологических рисков. Риски выражаются в денежном эквиваленте (например, невозможность выполнения производственной задачи в полном объеме и связанный с этим ущерб, издержки от отказов оборудования, от штрафов и пени, на приобретение дополнительных энергоресурсов).

Устранение несоответствия параметров ЭК связано с его реконструкцией. Для конкретного типа производственного объекта из общего перечня, содержащего 69 перспективных технических решений совершенствования энергетических объектов, изложенных в Концепции развития энергоснабжения [6], выбираются технические решения, позволяющие улучшить ту составляющую требований к энергоснабжению, которая не соответствует новым условиям.

Для каждого из выбранных вариантов технических решений определяются критериальные показатели реконструированного энергокомплекса, затраты на реконструкцию с возможными временными сценариями ее выполнения, строятся соответствующие тренды для всего анализируемого периода и формируются рекомендации по доведению показателей ЭК до минимально достаточного уровня требований.

Анализ расчетных трендов ИТС и его составляющих позволяет определить целесообразные направления и комплекс мероприятий по достижению требуемого уровня ИТС и отдельных составляющих в каждый конкретный период жизненного цикла производственного объекта.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

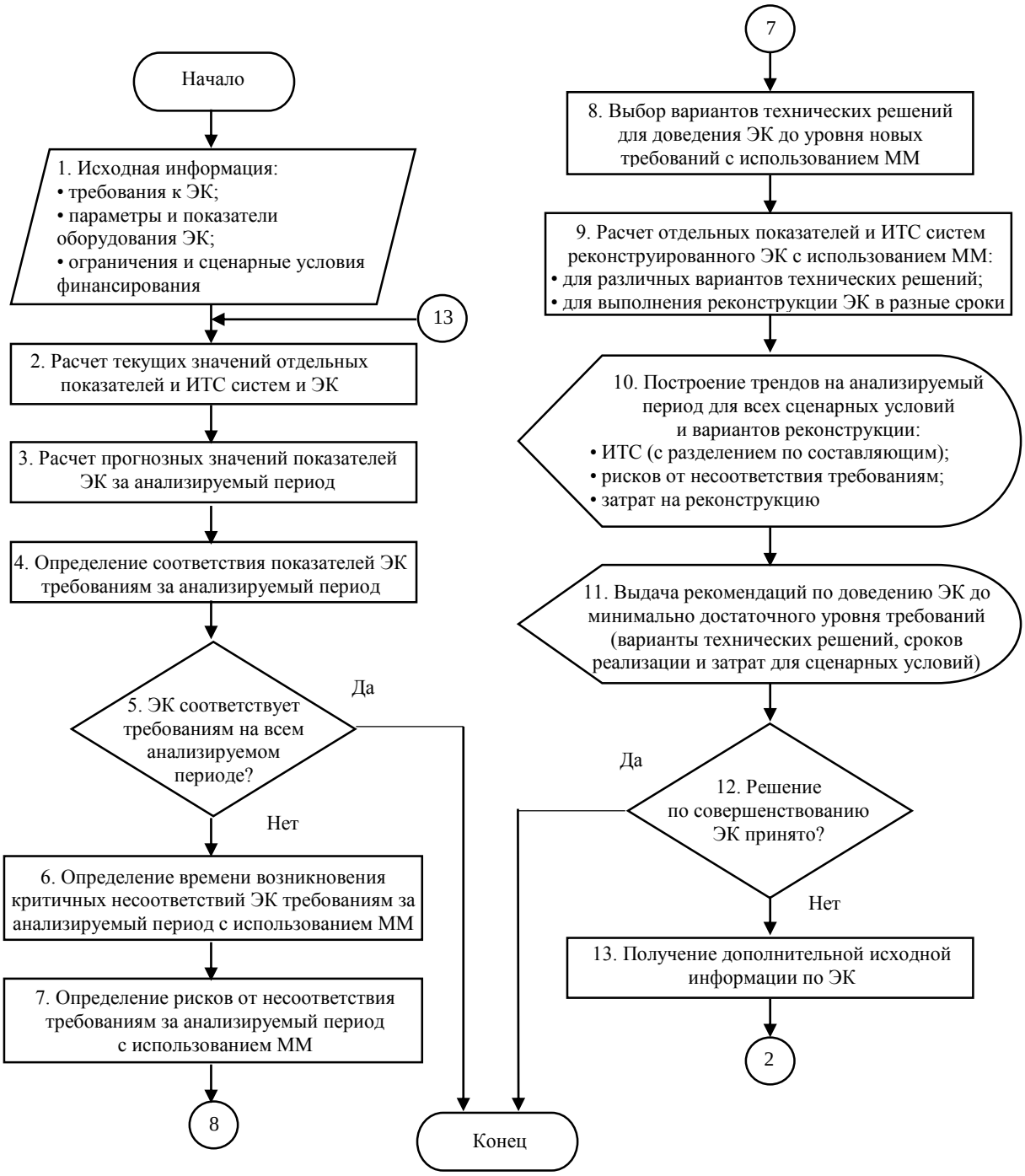


Рис.2. Укрупненный алгоритм применения комплекса математических моделей (ММ) для определения ИТС одиночного ЭК

В качестве примера на рис.3 приведены результаты расчета составляющих ИТС, выполненные с использованием разработанных моделей при условиях: роста нагрузки на СЭС на 20 % на пятом году реализации Программы развития, вызванного увеличением подачи природного газа потребителю, и повышения требований по энергоэффективности оборудования ЭК на 20 % на десятом году, связанного с вводом в действие новых нормативных документов.

Тренды составляющих ИТС показали следующее:

• надежность оборудования ЭК ниже требуемой (0,95 отн.ед.), начиная с первого года;

• обеспеченность количеством энергоресурсов становится ниже требуемой (1,2 отн.ед.), начиная с пятого года;

• энергоэффективность энергокомплекса становится ниже требуемой (4 отн.ед.), начиная с десятого года.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

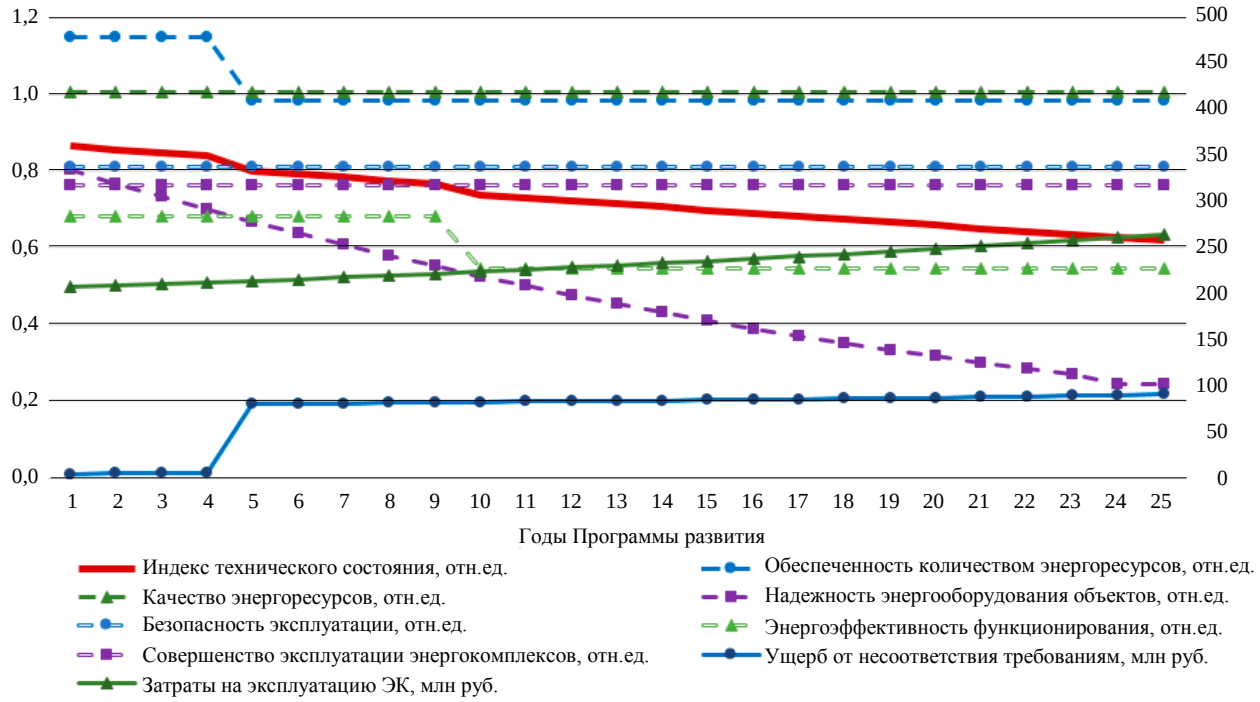


Рис.3. Характеристика ИТС и показателей ЭК компрессорной станции

Суммарные затраты на эксплуатацию ЭК нарастающим итогом (с учетом потенциальных ущербов от отказов оборудования и рисков недопоставки товарной продукции) начинают превышать величину капитальных вложений в создание ЭК (проектные) на девятом году реализации Программы развития.

Результаты

Разработанные комплекс математических моделей и алгоритм являются основой системы поддержки принятия решений по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры как составляющей методологии управления развитием энергетики производственных объектов газовой отрасли.

Математическое обеспечение позволяет численно определить интегральный показатель ИТС существующих энергетических комплексов и его составляющие на всем периоде жизненного цикла ПрОб, а также оценить изменение составляющих ИТС для случаев реализации различных вариантов реконструкции объектов энергетики производственных объектов.

Комплекс математических моделей и алгоритм их применения учитывают особенности, накладываемые условиями эксплуатации существующих ПрОб при ограничениях, вносимых применением РОП в управление развитием предприятий газовой отрасли.

Заключение

Значительные изменения условий хозяйствования и применение РОП в управление газовой отраслью требуют создания системы поддержки принятия решений по стратегическому развитию энергетической инфраструктуры ПрОб, основой которой является комплекс математических моделей определения индекса технического состояния одиночного энергокомплекса.

Определение величины ИТС ЭК ПрОб с целью принятия решения о необходимости совершенствования энергокомплекса в современных условиях является многокритериальной задачей, решение которой предложено выполнять с использованием кортежа, учитывающего: тип задачи, допустимые альтернативы ее решения с учетом множества оценок рисков при принятии конкретных решений, критерии, составляющие оценку ИТС с учетом системы предпочтений и решающих правил лица, принимающего решение.

В рамках исследования определены цели, задачи и математические зависимости определения ИТС ЭК ПрОб для подготовки структурированной информации при принятии решения о минимально необходимом объеме и сроках реконструкции энергетической инфраструктуры в современных условиях при ограничениях на финансирование реконструкции в условиях применения РОП.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Математические модели для определения отдельных составляющих ИТС в рамках предложенного подхода предполагают использование доступного для руководителей служб эксплуатации блока исходных данных.

В предлагаемом подходе к оценке ИТС ЭК ПрОб разработан комбинированный экспертно-аналитический способ определения весомости отдельных составляющих комплексных критериальных показателей, значимости самих критериальных показателей, определяющих величину ИТС для отдельных систем энергоснабжения, и весов отдельных систем энергоснабжения в составе энергокомплекса.

Разработанный укрупненный алгоритм применения математических моделей для определения ИТС одиночного ЭК предполагает определение соответствия показателей существующих ЭК или ЭК ПрОб после их реконструкции новым требованиям на всем анализируемом периоде, оценку рисков от несоответствия показателей ЭК новым требованиям, а также комплекс процедур для построения трендов показателей и соответствующих им затрат на реконструкцию и величин рисков для принятия обоснованного решения по стратегическому развитию ЭК ПрОб.

В дальнейшем целесообразно продолжить исследования в направлении определения ИТС ЭК группы производственных объектов, формирования требования к энергокомплексам на основе информации об изменении условий хозяйствования предприятий газовой отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Семикашев В.В., Гайворонская М.С.* Анализ состояния и перспектив развития российской газовой отрасли до и после 2022 г. // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2022. Т. 20. С. 108-127. DOI: 10.47711/2076-318-2022-108-127

2. *Ларионова Е.И., Чинаева Т.И., Шпаковская Е.П.* Анализ развития нефтегазового сектора в современных условиях // Статистика и экономика. 2019. Т. 16. № 6. С. 29-36. DOI: 10.21686/2500-3925-2019-6-29-36

3. *Дармилова Ж.Д., Дармилов Э.И., Кривенко Н.И.* Особенности принятия управленческих решений в нефтегазовой отрасли // Научный вестник Южного института менеджмента. 2019. № 4. С. 36-42. DOI: 10.31775/2305-3100-2019-4-36-42

4. *Zhang Yu-mei.* Mathematical Modeling of Attribute Encryption of Big Data Based on Data Redundancy Technology // Computer Simulation. 2021. Iss. 5. P. 418-422.

5. *Dastres R., Soori M.* Advances in Web-Based Decision Support Systems // International Journal of Engineering and Future Technology. 2022. Vol. 19. Iss. 1. P. 1-15.

6. *Маркелов В.А., Бронников А.Н., Шаповало А.А. и др.* Концепция развития энергетики производственных объектов в условиях динамичного изменения условий хозяйствования предприятий газовой отрасли // Газовая промышленность. 2023. Спецвыпуск № 3 (853). С. 8-11.

7. *Шаповало А.А.* Методология управления развитием энергетики производственных объектов газовой отрасли // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16378. С. 181-190.

8. *Poiss G., Vitolina S., Marks J.* Development of Indicators for Technical Condition Indexing of Power Transformers // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. 2018. Vol. 3. № 1. P. 148-154. DOI: 10.25046/aj030118

9. *Nyenno I., Selivanova N., Korolenko N. et al.* The energy policy risk management system model: theories and practices // Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal. 2020. Vol. 23. Iss. 4. P. 33-48. DOI: 10.33223/epj/127699

10. *Londoño A.A., Velásquez J.D.* Risk Management in Electricity Markets: Dominant Topics and Research Trends // Risks. 2023. Vol. 11. Iss. 7. № 116. DOI: 10.3390/risks11070116

11. *Imanbayev K., Sinchev B., Sibanbayeva S. et al.* Analysis and mathematical modeling of big data processing // Peer-to-Peer Networking and Applications. 2021. Vol. 14. Iss. 5. P. 2626-2634. DOI: 10.1007/s12083-020-00978-3

12. *Сагитова Л.А.* Алгоритм системы поддержки принятия решений о повышении эффективности регионального энергетического комплекса // Инфокоммуникационные технологии. 2021. Т. 19. № 2. С. 256-262.

13. *Drożdż W., Vovk Y., Widera K. et al.* Sustainability assessment of the energy generation systems // Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics. 2023. Vol. 8. № 2. P. 249-258. DOI: 10.14254/jsdtl.2023.8-2.19

14. *Тиханычев О.В.* Постановка задачи обеспечения автоматизации полного цикла поддержки принятия решения // Прикладная информатика. 2021. Т. 16. № 6 (96). С. 103-112. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-6-103-112

15. *Балашова И.В., Терещенко Т.А.* Системы поддержки принятия решений // The scientific heritage. 2021. № 79. С. 3-7. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-79-4-3-7

16. *Самойленко В.С., Федотова А.Ю.* Архитектура интеллектуальной системы поддержки принятия решений // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 8 (146). DOI: 10.60797/IRJ.2024.146.10

17. *Саяпин О.В., Тиханычев О.В., Безвесильная А.А., Чискидов С.В.* Об одной тенденции развития алгоритмов, реализуемых в системах поддержки принятия решений // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36. № 3. С. 388-397. DOI: 10.15827/0236-235X.142.388-397

18. *Стуров А.Ю., Кувшинов М.С.* Подход к оценке экономической эффективности информационно-управляющих систем // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Экономика и менеджмент». 2020. Т. 14. № 3. С. 108-116. DOI: 10.14529/em200312

19. *Рожко О.Н., Шихалев А.М.* Оценка вариантов размещения логистических объектов на территории региона методом многокритериальной оптимизации (на примере Республики Татарстан) // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2017. Т. 10. № 6. С. 153-169. DOI: 10.15838/esc/2017.6.54.10

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

20. *Камчатова Е.Ю.* Управление рисками генерирующих энергокомпаний // Вестник университета. 2018. № 2. С. 50-56. DOI: 10.26425/1816-4277-2018-2-50-56

21. *Рахмани Д.* Основные подходы к оценке эффективности применения методологии анализа и управления рисками в энергетической компании // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 9. С. 46-55 (in English). DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-9-46-55

22. *Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В., Майоров Г.С.* Разработка онтологий для автоматизации вычислительных процессов при проектировании трубопроводных систем в энергетике // Онтология проектирования. 2023. Т. 13. № 4 (50). С. 548-561. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-548-561

23. *Шклярский Я.Э., Замятина Е.Н., Замятин Е.О.* Оценка энергетической эффективности электротехнического комплекса // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 3. С. 339-347.

24. *Токарев И.С.* Формирование отраслевой методики расчета параметров системы накопления электроэнергии для объектов газовой промышленности // Записки Горного института. 2025. Т. 272. № 16516. С. 171-180.

25. *Fernando J.G., Baldelovar M.* Decision Support System: Overview, Different Types and Elements // Technoarete Transactions on Intelligent Data Mining and Knowledge Discovery. 2022. Vol. 2. Iss. 2. P. 13-18. DOI: 10.36647/TTIDMKD/02.02.A003

26. *Кендэл М.* Ранговые корреляции. М.: Статистика, 1975. 214 с.

27. *Ganggang Xu, Chong Zhao, Abdollah Jalilian et al.* Nonparametric estimation of the pair correlation function of replicated inhomogeneous point processes // Electronic Journal of Statistics. 2020. Vol. 14. Iss. 2. P. 3730-3765. DOI: 10.1214/20-EJS1755

28. *Клюев Р.В., Моргоева А.Д., Гаврина О.А. и др.* Прогнозирование планового потребления электроэнергии для объединенной энергосистемы с помощью машинного обучения // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 392-402.

29. *Коробов В.Б.* Теория и практика экспертных методов. М.: ИНФРА-М, 2021. 281 с. DOI: 10.12737/monography_5caee0067f1835.43206494

30. *Ильюшин Ю.В., Афанасьева О.В.* Разработка Scada-модели компрессорной станции магистрального газопровода // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 686-693. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.686

31. *Boiko Y.* Methods of forming an expert assessment of the criteria of an information system for managing projects and programs // Technology transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions. 2018. P. 9-11. DOI: 10.21303/2585-6847.2018.00766

32. *Серебрякова Е.А.* Методы экспертного оценивания строительных проектов по качественным критериям // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. Т. 11. № 4. 12 с. DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.007

33. *Коробов В.Б., Тутыгин А.Г., Лохов А.С.* Рангово-экспертная функция отклонений для классификации сложных объектов // Проблемы управления. 2023. № 6. С. 56-65. DOI: 10.25728/pu.2023.6.5

34. *Сигал А.В.* Использование последовательностей Фишберна для адекватного моделирования по выборочным данным // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 4. С. 50-60. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.4.50.60

35. *Fishburn P.C.* Independence in Utility Theory with Whole Product Sets // Operations Research. 1965. Vol. 13. № 1. P. 28-45. DOI: 10.1287/opre.13.1.28

36. *Saaty T.L.* Creative Thinking, Problem Solving and Decision Making. Pittsburgh: RWS Publications, 2001. 267 p.

***Авторы*: Анатолий Антонович Шаповало,** *канд. техн. наук, начальник управления* (*ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, Россия*), *An19660106@yandex.ru*, **Владимир Константинович Аверьянов,** *д-р техн. наук, профессор, советник генерального директора* (*АО «Газпром промгаз», Санкт-Петербург, Россия*), **Юрий Владимирович Сербин,** *д-р техн. наук, главный научный сотрудник* (*АО «Газпром промгаз», Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0