

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.873+621.311

DOI: 10.17212/2782-2001-2025-3-7-24

Модель живучести топливно-энергетического комплекса России*

Н.М. БЕРЕСНЕВА^{1,2,a}, А.В. ЕДЕЛЕВ^{1,b}, В.И. ЗОРКАЛЬЦЕВ^{3,c}

¹ 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук

² 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, ИрГУПС – ISTU

³ 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, Байкальский государственный университет

^a beresneva@isem.irk.ru ^b flower@isem.irk.ru ^c vizork@mail.ru

В статье описана математическая модель, разработанная и используемая для решения задач обеспечения живучести топливно-энергетического комплекса России при крупномасштабных возмущениях. С помощью этой модели анализируются последствия падения производительности объектов и систем энергетики при реализации крупномасштабных возмущений, обосновываются мероприятия по восстановлению топливно- и энергоснабжения потребителей для сложившихся экстремальных условий функционирования энергетики страны. Источниками рассматриваемых возмущений могут быть природные, социально-экономические, технические факторы, внешнеэкономические, внешнеполитические и диверсионно-военные воздействия. Модель является развитием ранее созданных инструментов для управления топливно-энергетическим комплексом страны в нештатных ситуациях. Целью статьи является освещение методологических аспектов данной модельно-программной разработки, в том числе специфики организации вычислительных экспериментов с использованием модели. Выделена ключевая особенность исследований живучести топливно-энергетического комплекса – взаимосвязь систем энергетики и их объектов на внутриотраслевом и межотраслевом уровнях. Приводятся примеры механизмов компенсации последствий реализации нештатных ситуаций.

В статье дается математическое описание многопериодной территориально распределенной модели управления функционированием ТЭК, предназначенной для выбора рациональных вариантов энергообеспечения предприятий и населения при крупномасштабных возмущениях. Модель основывается на агрегированном представлении объектов систем энергетики (кроме газовой), на использовании возможностей маневрирования межрегиональными и межотраслевыми потоками энергоресурсов, на использовании, при необходимости, ограничений в поставках энергоресурсов отдельным категориям потребителей. Газовая отрасль в модели представлена

* Статья получена 25 декабря 2024 г.

Финансовая поддержка исследований: проект государственного задания № FWEU-2021-0003 (регистрационный номер AAAA-A21-121012090014-5).

детализированной схемой Единой системы газоснабжения России. Механизмы обеспечения живучести топливно-энергетического комплекса России представлены краткосрочными и долгосрочными мероприятиями по созданию запасов топлива, резервированию мощностей, использованию возможных вариантов взаимозаменяемости энергоресурсов.

Ключевые слова: топливно-энергетический комплекс, системы энергетики, живучесть, модель топливно-энергетического комплекса, нештатные ситуации, мероприятия по повышению живучести, надежность топливо- и энергоснабжения, вычислительный эксперимент

ВВЕДЕНИЕ

Энергетика является важной составляющей экономической инфраструктуры. Она призвана обеспечивать стабильное функционирование материального производства и транспорта страны, нормальную жизнедеятельность населения. Особо важное значение имеет устойчивое энергоснабжение для России в силу суровых природно-климатических условий нашей страны.

В России энергетика представлена топливно-энергетическим комплексом (ТЭК) страны, интегрированными в него системами энергетики: электроэнергетической системой, системами газоснабжения и нефтеснабжения, включающими добычу и транспорт нефти, производство и транспорт нефтепродуктов, системы снабжения твердым топливом (прежде всего углеснабжения), а также локальными системами теплоснабжения отдельных населенных пунктов и предприятий. Эти отраслевые системы энергетики имеют устойчивые и сильные производственные связи, обусловленные взаимозависимостью процессов их функционирования, взаимозаменяемостью различных видов энергоресурсов. Системы энергетики являются иерархическими структурами. Элементы нижнего уровня каждой такой системы (энергетические объекты, технологические процессы) взаимодействуют между собой по производству, переработке и потреблению разных видов энергоресурсов. При этом наблюдается синергетический эффект, когда система в целом обладает принципиально новыми функциональными свойствами, отличными от свойств формирующих ее элементов [1]. Системы энергетики различаются:

- видами (физическим состоянием) добываемых, перерабатываемых, транспортируемых и потребляемых энергоресурсов (твердые, жидкие, газообразные виды топлива, электроэнергия, теплоэнергия);
- сложностью используемых технологических процессов;
- возможностью создания запасов, наличием средств аккумуляции энергии;
- возможностью создания и содержания резервов мощностей;
- различной скоростью и условиями восстановления нормальных режимов работы при нештатных ситуациях.

Ключевым фактором обеспечения стабильного функционирования ТЭК является его живучесть, под которой понимается адаптационная способность систем энергетики противостоять крупномасштабным возмущениям, не допуская каскадного развития нештатных ситуаций. Свойство живучести связано со способностью ТЭК восстановления за кратчайшее время своей производительности в исходном или приближенном к нему объеме [2, 3] после проявления нештатной ситуации.

Нештатные ситуации могут иметь природный (стихийные бедствия, аномальные природные явления, в том числе похолодания или экстремальные потепления в отдельных регионах), социально-экономический, техногенный характер. Источником крупных штатных ситуаций могут быть диверсионные, внешнеполитические, внешнеэкономические воздействия, военные действия [3–5], техногенные аварии.

Возможный в данных случаях даже временный выход из строя отдельных объектов ТЭК может приводить к серьезным социально-экономическим последствиям. Например, мощности отдельных транспортных объектов (газопроводов, нефтепроводов, продуктопроводов, железнодорожных магистралей) составляют десятки миллионов тонн условного топлива в год. Выход их из строя на несколько дней означает ограничение возможностей транспортировки топлива по данному направлению на десятки и даже сотни тысяч тонн. Для компенсации этого требуется располагать значительными резервами и запасами топлива, мощностями для альтернативных вариантов транспортировки.

В целях снижения затрат и из-за ограниченности ресурсов развитие ТЭК в СССР шло по пути концентрации производства и роста единичных мощностей. Это привело к повышенной уязвимости энергообеспечения регионов страны при аварийных ситуациях, при отключениях отдельных предприятий и объектов.

Перечисленные штатные ситуации могут проявляться во взаимодействии, одновременно в нескольких системах энергетики, иногда в виде так называемых межотраслевых системных аварий. При межотраслевой системной аварии возникновение штатных ситуаций в одной из систем может привести к повышению нагрузок сверх допустимого уровня на другие системы (а также к снижению производственных возможностей других систем), как следствие, к возникновению штатных ситуаций в этих системах. Другим видом системных аварий являются аварийные ситуации из-за особенностей управления ими. Системные аварии обоих указанных типов нередко проявляются в разных странах, и каждый такой случай нуждается в специальном изучении для выработки превентивных мер по их предупреждению и обеспечению живучести ТЭК в случае их проявлений.

Для России особое значение имеют суровые климатические условия. Отопительный период в центральных и северных регионах страны длится 7–9 месяцев в году. Даже в относительно теплых южных российских регионах этот период составляет около 6 месяцев [4]. Большую роль для нашей страны всегда имели разрабатываемые и реализуемые в летний период мероприятия по подготовке к зиме (на уровне страны в целом, регионов, населенных пунктов, отраслей и предприятий). С 90-х годов прошлого века внимание органов государственной власти к задачам подготовки к зиме ослабло. Это чревато потенциальными экономическими и социальными потерями, пока не реализовавшимися из-за происходящего с конца 80-х годов потепления климата и произошедшего в 90-е годы резкого сокращения объемов производственного потребления энергоресурсов. Сейчас, несмотря на некоторый избыток энергоресурсов в стране (в том числе из-за сокращения экспорта), всё более отчетливо начинает проявляться уязвимость процессов энергоснабжения от возмущающих воздействий. Это делает актуальными

разработки по созданию математических моделей для управления функционированием ТЭК в условиях крупномасштабных возмущений.

Живучесть ТЭК может достигаться за счет:

- создания и поддержания рациональных объемов резервов производственных мощностей и запасов энергоресурсов, их рационального размещения и обоснованного использования в течение года;
- использования возможностей взаимозаменяемости отдельных видов энергоресурсов в производстве и потреблении;
- видового разнообразия его объектов; например, в электро- и теплоэнергетике за счет рационального сочетания топливных (тепловые и дизельные электростанции, котельные) и нетопливных (гидроэлектростанции, атомные, ветровые, солнечные, гидроаккумулирующие, геотермальные станции) источников генерации;
- пространственной распределенности, приводящей к деконцентрации производства, как следствие, к увеличению числа параллельно функционирующих объектов;
- локальной автономности – наличия в ТЭК автономных сбалансированных подсистем, групп объектов;
- использования специальных механизмов управления процессами энергоснабжения при возникновении нештатных ситуаций.

Поведенческая составляющая живучести может быть представлена тремя этапами реакции систем энергетики на влияние нештатных ситуаций [5].

1. Период деградации, когда система сначала пытается поглотить возмущение, а затем противодействует ему. Для этого отрезка времени в исследованиях живучести оценивается глобальная уязвимость (анализируется падение системной производительности относительно исходного уровня), определяются «узкие места», критически важные элементы системы (объекты, выход из строя которых способен привести к серьезным нарушениям энергоснабжения потребителей).

2. Период приспособления системы к нештатным условиям функционирования. На этом этапе допускается ввод превентивных мероприятий по повышению живучести (заложенных механизмов резервирования и диверсификации).

3. Период восстановления системы, в рамках которого предполагается ввод долгосрочных мероприятий по повышению живучести, подключение средств обеспечения живучести из других регионов и из других отраслей энергетики. В идеале это должно привести к переходу системы в новое стабильное состояние.

В исследованиях живучести можно выделить три класса задач, для решения которых разрабатываются модели управления ТЭК в условиях крупномасштабных возмущений.

1. Задача выбора наилучших вариантов управления процессами энергоснабжения отдельных регионов и страны в целом. Для этих целей использовался, в частности, первый вариант модели функционирования ТЭК страны [4] в кризисной ситуации. Эта модель использовалась зимой 1982–1983 гг., когда из-за наступившего похолодания и нехватки котельно-печного топлива пришлось остановить в СССР более тысячи предприятий – потребителей топлива, а также оперативно решать задачи массового перераспределения

поставок топлива между регионами страны и конкретными группами потребителей.

2. Задача выявления и анализа «узких мест» ТЭК страны, сбои в работе которых могут иметь наиболее сильные негативные последствия. Указанный первый вариант модели, созданный в СЭИ СО АН СССР в 1970-е годы, использовался в аппарате Совета министров СССР для выявления регионов, производственных и транспортных мощностей, выход из строя которых приводит к крупным негативным последствиям, к ограничениям в энергоснабжении (остановке) важных объектов и систем.

3. Задача определения рационального состава мероприятий по повышению живучести ТЭК страны. Эта задача выполняется для любых возможных негативных ситуаций. Для таких случаев обосновываются мероприятия по обеспечению живучести ТЭК, проводится их «стоимостная оценка». При «стоимостной оценке» мероприятий учитывается условная оценка «ущербов» от ограничений потребителей различных категорий. Оценки ущербов формируют последовательности ограничений в энергоресурсах различных категорий потребителей при нехватке энергоресурсов. Оценка мероприятий также включает сравнительный анализ требуемых капитальных и текущих затрат на их реализацию.

В настоящее время сложилась необходимость активизации использования моделей живучести ТЭК, появилась особая актуальность развития инструментов для управления процессами энергоснабжения в условиях крупномасштабных возмущений.

1. ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ И АНАЛИЗА ЖИВУЧЕСТИ ТЭК ПРИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Исследования живучести ТЭК носят сценарный характер, проводятся на базе оптимизационной территориально-производственной модели функционирования ТЭК. В данной статье ограничимся рассмотрением модели, разработанной для решения первых двух указанных выше классов задач – выработка предложений по обеспечению живучести ТЭК в реальных, конкретных ситуациях и анализ гипотетически возможных ситуаций. На базе этой модели ведется разработка моделей и программно-вычислительного комплекса для определения рационального состава средств повышения живучести ТЭК.

С точки зрения организации вычислений исследование живучести ТЭК включает следующие этапы.

1. Этап задания и проработки сценариев экстремального функционирования ТЭК. Сценарии исследования формируются по взаимосвязанным временным периодам. При переходе с одного периода на другой обязательно учитываются изменения технологических характеристик отраслевых объектов (в том числе изменения объема доступных запасов топлива). Сценарии исследований создаются для наиболее представительных нештатных ситуаций. В случае моделирования нештатных ситуаций задаются отключения или снижение производительности потенциально важных для ТЭК объектов. При моделировании мероприятий по повышению живучести активизируются заложенные в модели механизмы резервирования топлива и мощностей, возможности диверсификации энергоресурсов. Рассматриваются мероприятия

для нештатных ситуаций. Такой подход к формированию сценариев экстремального функционирования ТЭК позволяет реализовать задачу выбора наилучших вариантов управления энергоснабжением при возникновении крупномасштабных возмущений.

Выбор объектов воздействия в сценариях экстремального функционирования ТЭК зависит от реализованной в модели территориально-производственной структуры ТЭК, а также от поставленных задач исследований. Отраслевой состав моделей ТЭК традиционно представлен топливными отраслями, электро- и теплоэнергетикой. Каждая из этих отраслей в различных моделях ТЭК может быть представлена различными типами электростанций как отраслевых объектов, различным составом технологических характеристик (запасы топлива и т. д.) и различной степенью детализации этих объектов (в рамках принятой территориальной структуры модели. Территориальная структура каждой модели имеет свой территориальный разрез (может быть представлена субъектами РФ, экономическими районами, федеральными округами), включает территории сопредельных государств (экспортеры и импортеры энергоресурсов). Задачи исследования регламентируют выбор возмущаемых объектов, изменения их технологических возможностей, схемы анализа результатов оптимизационных расчетов.

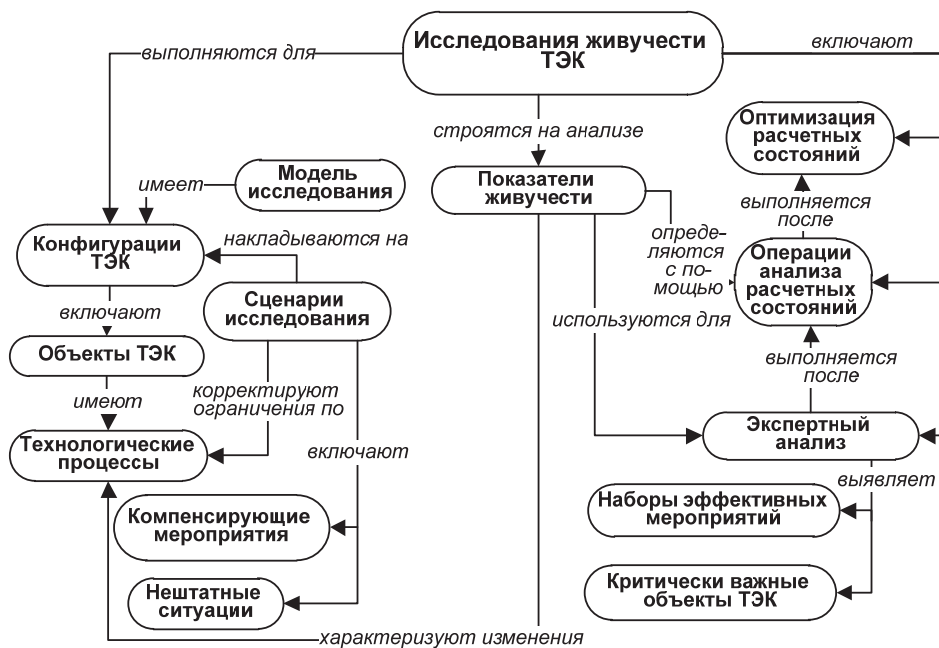
2. Этап расчета сценариев экстремального функционирования ТЭК. На этом этапе по сформированным сценариям экстремального функционирования ТЭК создаются и оптимизируются соответствующие расчетные состояния. По результатам расчетов проводится предварительный анализ каждого расчетного состояния – определяются показатели живучести, оценивающие последствия крупномасштабных возмущений для каждого временного периода. Показатели живучести – оценки изменений технологий модели исследования (как правило, складывающиеся у различных категорий потребителей дефициты энергоресурсов), чувствительных к изменениям в расчетной территориально-производственной структуре ТЭК. Реализация данного этапа зависит от инструментальной поддержки проводимых вычислительных экспериментов, что обеспечивается высокопроизводительными вычислениями.

3. Этап анализа и интерпретации результатов расчета на модели сценариев экстремального функционирования ТЭК. На этом этапе проводится анализ последствий нештатных ситуаций и мероприятий по повышению живучести. Такой анализ может проводиться по стране в целом либо по отдельным территориям и территориальным объединениям, а также по отдельным показателям живучести либо по их совокупности.

Анализ изменений энергоснабжения территориальных объединений может дополняться анализом складывающейся ситуации на отдельных территориях. На основе результатов этого анализа экспертно определяются наиболее критичные нештатные ситуации и комбинации эффективных мероприятий для конкретных территорий или по системам в целом. При необходимости делается вывод о формировании новых расчетных условий с последующим повторным выполнением этапов 1–3. Характерная черта всех процессов данного этапа – сложность анализа и принятия решений из-за временного фактора исследований (нштатные условия функционирования ТЭК могут моделироваться в различные моменты времени, в различных комбинациях, с различной силой реализации).

Приведенная этапность выполнения вычислительных экспериментов сначала реализуется для проработки сценариев нештатных ситуаций с целью выявления наиболее представительных экстремальных условий функционирования ТЭК, затем – для работы со сценариями реализации мероприятий. При работе со сценариями нештатных ситуаций оценивается уязвимость отраслевых систем, определяются критически важные энергетические объекты, при работе со сценариями компенсирующих мероприятий – приоритетные мероприятия и их комбинации.

Ключевые элементы исследований живучести, основные моменты их взаимодействия представлены на рисунке. Здесь выделена модель исследования, для которой формируются расчетные конфигурации (расчетные схемы территориально-производственной структуры ТЭК) по заданным сценариям экстремального функционирования ТЭК. Для каждой рассматриваемой расчетной конфигурации создается множество состояний, рассчитываемых на применяемом решателе. Далее для каждого расчетного состояния (блок операций анализа расчетных состояний) определяются показатели живучести, которые потом используются в рамках экспертного анализа результатов расчета.



Компоненты исследований живучести ТЭК

Components of fuel and energy complex resilience studies

Центральным элементом представленной схемы исследований живучести ТЭК является многопериодная территориально-производственная модель живучести ТЭК. Эта модель и предшествующие ей разработки рассмотрены в следующих разделах статьи.

2. ИСТОРИЯ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛЕЙ ЖИВУЧЕСТИ ТЭК

Разработки математических моделей управления функционированием топливно-энергетическим комплексом страны при крупномасштабных возмущениях были начаты в Сибирском энергетическом институте (ныне Институт систем энергетики) СО АН СССР в 70-х годах прошлого века по инициативе и под научным руководством академиков Ю.Н. Руденко. Первые варианты модели были реализованы группой сотрудников Сибирского энергетического института СО АН СССР (ныне ИСЭМ СО РАН) в конце 70-х годов. В группу разработчиков модели входили В.И. Зоркальцев, Н.И. Пяткова, В.П. Оленкевич, Т.В. Ушакова, Р.Б. Фаттахов, Г.Н. Парфенова, В.В. Шевелев. Комплекс сервисных программ для формирования модели и интерпретации результатов на ЭВМ БЭСМ-6 и ЭВМ ЕС осуществляли Г.Н. Волошин и Г.Н. Антонов. Модель разрабатывалась по заданию аппарата Совета министров СССР. В качестве базовых расчетных средств использовались имевшиеся программы решения задач линейного программирования на ЭВМ БЭСМ 6 и ЕС.

Исходный вариант модели был предназначен для решения двух типов задач. Одна из них – выбор вариантов энергообеспечения предприятий и населения страны в условиях крупномасштабных возмущений. В частности, эта модель использовалась при анализе вариантов энергообеспечения потребителей в условиях возникшего дефицита котельно-печного топлива в холодную зиму 1982–1983 годов. Вторая цель создания модели – определение узких мест в ТЭК СССР, воздействие на которые может приводить к наиболее тяжелым последствиям для экономики и населения. Вариантные исследования потенциально узких мест выполнялись в ИСЭМ СО РАН. Первые варианты моделей, разработанных для исследования проблем живучести ТЭК СССР, представлены в [3–5]. Эта разработка осуществлялась одновременно с исследованиями под руководством Ю.Н. Руденко проблем надежности энергоснабжения при текущем планировании и оперативном управлении энергоснабжением народного хозяйства, что включало разработку и использование математических методов и моделей для анализа и регулирования сезонных и случайных отклонений в производстве, потреблении, транспортировке запасов энергоресурсов. Эти разработки привели, в частности, к разработке нормативов на запасы котельно-печного топлива, по которым в 80-х годах проводилось отслеживание и оперативное управление эксплуатационными запасами топлива в стране сотрудниками аппарата Совета министров СССР, отвечающими за функционирование топливно-энергетического комплекса.

В конце 70-х годов был введен и стал активно использоваться термин «живучесть ТЭК» в качестве особого аспекта научных разработок по проблеме надежности энергоснабжения. По тематике «живучесть систем энергетики» (в том числе в целях определения круга проблем, охватываемых этой тематикой) в 70-х годах было организовано специальное заседание Всесоюзного семинара «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», проводившегося под руководством Ю.Н. Руденко. Было принято решение включать в эту тематику круг вопросов, покрывающих возможные причины, последствия крупномасштабных возмущений различной природы, каскадные и системные аварии в системах энергообеспечения, мероприятия по адаптации и противодействию им.

В первоначальных вариантах модели живучести ТЭК выделялось 18 экономических районов СССР как отдельные территориальные единицы. В конце 70-х годов была сделана попытка создать модель с выделением в качестве территориальных единиц отдельных областей и автономных республик СССР. Одной из проблем в реализации такой модели была ее большая размерность, для которой не были приспособлены располагаемые программы решения задач линейного программирования. Для реализации модели с областным представлением территориального фактора В.Н. Тыртышный разработал и реализовал специальный алгоритм, базирующийся на многопродуктовом обобщении известных потоковых алгоритмов (типа Форда – Фалкерсона). Другой проблемой, позволившей реализовать в 70-х годах только экспериментальный вариант модели с областным представлением территориального фактора, были трудности информационного наполнения такой модели. При информационном наполнении 18-районной модели использовалась имеющаяся в Сибирском энергетическом институте база данных модели анализа вариантов долгосрочного развития ТЭК СССР, созданная А.А. Макаровым, Л.Д. Криворуцким и другими сотрудниками.

В исходном варианте модели рассматривался период времени, необходимый для устранения крупномасштабных возмущений. В качестве основных способов адаптации к крупномасштабным возмущениям в первоначальных вариантах модели рассматривалось использование эксплуатационных запасов топлива, использование госрезерва, маневрирование межрегиональными поставками энергоресурсов, использование взаимозаменяемости отдельных видов энергоресурсов (при производстве электроэнергии, в нефтепереработке, в теплоснабжении) и как особая мера – ограничение энергоснабжения предприятий. Предприятия – потребители энергоресурсов были разделены на три категории по степени важности их функционирования для народного хозяйства в условиях крупномасштабных возмущений.

При использовании специальных алгоритмов формировались «штрафные» коэффициенты, обеспечивающие строгую последовательность (лексикографическую оптимизацию) проведения отдельных мероприятий по достижению максимально возможной устойчивости систем энергоснабжения к возникшим крупномасштабным возмущениям. За счет этого введение ограничений на энергоснабжение третьей категории потребителей могло осуществляться только в тех регионах, где не было возможности покрыть все потребности располагаемыми мощностями по производству и транспорту энергоресурсов. Ограничения на энергообеспечение второй категории потребителей в оптимальном решении модели вводились, только если были исчерпаны полностью ограничения по обеспечению данным видом энергоресурсов третьей категории потребителей. Ограничения на энергоснабжение первой категории потребителей (частичная или полная остановка предприятий-потребителей) могли вводиться только после того, как полностью прекращалось энергоснабжение второй категории потребителей. Несколько более полное описание первых вариантов модели имеется в [4].

Со второй половины 80-х годов продолжалось развитие модели живучести ТЭК в направлении более детального учета территориального фактора, введение в рассмотрение нескольких периодов времени [6]. В настоящее время в дополнение к рассмотренным в данной статье аспектам ведется разработка

специальных процедур выбора оптимального состава средств обеспечения устойчивости ТЭК к крупномасштабным возмущениям особого класса. Развитие модели живучести ТЭК осуществляется Н.И. Пятковой, А.В. Еделевым и Н.М. Бересневой; содержательные исследования проблем устойчивости энергоснабжения России проводились С.М. Сендеровым и В.И. Рабчуком [7–11].

К началу 90-х годов интерес к проблематике живучести ТЭК у правительственных органов пропал, как и в целом к проблемам обеспечения надежности энергоснабжения, в связи с происходившими процессами перестройки, ускорения, смены власти, приватизации. Существенных проблем в энергоснабжении в последующий период удалось избежать вследствие произошедшего резкого падения промышленного производства в 90-х годах и значительного последующего потепления. В последние годы стал проявляться и такой фактор, как сокращение экспорта из России энергоресурсов и образование их относительного избытка. Ныне становится всё более актуальной необходимость возрождения активных исследований и разработок по проблемам надежности энергоснабжения, в том числе по развитию моделей с условным названием «Живучесть ТЭК».

3. МОДЕЛЬ ЖИВУЧЕСТИ ТЭК

Представленная ниже модель исследования живучести ТЭК описывает существующие цепочки преобразования энергетических ресурсов на уровне рассматриваемых энергетических объектов. В ней реализовано сетевое представление территориальных связей отраслевых объектов [2, 3, 12]. В программной реализации эта модель – метасистема отдельных отраслевых систем энергетики, каждая из которых обладает функциональной и топологической структурой. Моделирование поведения ТЭК в этом случае обеспечивается структурными и технологическими связями объектов этих отраслей и не зависит от степени детализации систем энергетики [7, 8].

Модель живучести ТЭК включает угольную, газовую, нефтеперерабатывающую отрасли, электро- и теплоэнергетику. Территориальный разрез модели – субъекты РФ (области, края, республики), временной разрез – сутки. Состав ресурсов в модели: природный газ, каменный и бурый уголь, топочный мазут и дизельное топливо, электроэнергия и тепло.

В описании топливных отраслей модели учитываются мощности по производству и добыче ресурсов в субъектах РФ, суммарные эксплуатационные запасы топлива в регионах, технологии транспортировки ресурсов.

Электро- и теплоэнергетика представлена выработкой электроэнергии в субъектах РФ различными типами электростанций и котельными. В модели рассматриваются атомные, топливные (на мазуте, природном газе, угле, дизельном топливе) электростанции, гидроэлектростанции, а также источники возобновляемой энергии (ветровые, солнечные, геотермальные электростанции). Основные объекты отпуска тепла в модели – тепловые электростанции (ТЭС) и котельные, работающие на перечисленных выше видах топлива. Для ТЭС и котельных предусмотрена замена газа топочным мазутом (диверсификация топлива). Перетоки электроэнергии в модели представлены укрупненной межрегиональной сетью линий электропередач.

Газовая отрасль в модели представлена детализированной схемой Единой системы газоснабжения России, заимствованной из отраслевой газовой модели страны [6, 7]. Она представлена отдельными месторождениями газа (28 источников), подземными хранилищами (22 хранилища, включая европейские), узловыми компрессорными станциями (268 узлов), участками магистральных газопроводов (268 дуг, включая отводы на распределительные сети). Поддержка подземных хранилищ газа в модели ТЭК реализована в двух режимах их функционирования – в режиме отбора газа (в отопительный период при штатных ситуациях) и режиме закачки (в летний период). Также в модели заложена возможность расширения для участков магистральных газопроводов их пропускной способности на 10 % от номинальных возможностей при возникновении критических ситуаций. Территориально схема Единой системы газоснабжения помимо российских регионов охватывает страны СНГ и Европы (они рассматриваются в качестве экспортеров или импортеров газа).

Конечные потребители энергоресурсов в модели – субъекты РФ и страны, в которые экспортируются энергоресурсы. На внутрироссийском уровне потребности в топливе в модели разделены на энергетические (на нужды электро- и теплоэнергетики) и прочие обязательные потребности субъектов. Важность категорий потребителей, приоритетность энергоресурсов в модели задаются в ее целевой функции с помощью удельных штрафов за недопоставку энергоресурсов. Категорированность потребителей зависит от постановки задач исследований. Вариант базовой постановки исследований на модели – оценка обеспеченности потребностей в отопительный период при резком похолодании в условиях дефицита газовых поставок. В этом случае в первую очередь обеспечиваются потребности в тепле, газе, электроэнергии. Такой порядок объясняется реализацией взаимозаменяемости газа и мазута при выработке тепла и электроэнергии ТЭС и котельными.

Модель живучести ТЭК многопериодная. Она традиционно применяется для оценки управления процессами энергоснабжения территорий, позволяет определять оптимальные изменения топологии и режимов функционирования систем энергетики.

Структура и исходные данные модели сформированы на основе проектных и отчетных данных с использованием ранее созданных моделей функционирования и развития отдельных систем энергетики и топливно-энергетического комплекса страны.

Математическая формализация модели живучести ТЭК может быть представлена следующим образом. Территориально-производственная структура ТЭК описывается сетью $G = (N, E)$, где N – это множество узлов, E – множество дуг. Сеть G является направленным графом, поэтому для каждой дуги $(i, j) \in E$ узел $i \in N$ является началом, а узел $j \in N$ – концом.

Множество узлов N состоит из подмножеств источников N_b , хранилищ N_s , потребителей N_d и промежуточных узлов N_o . Объекты производства и преобразования энергоресурсов представлены в сети G парой узлов $i', i'' \in N_b$, и связывающей их дугой $(i', i'') \in E$, которая фактически моделирует данные энергетические технологии. Объекты потребления и хранения представлены одним узлом, принадлежащим N_d и N_s соответственно.

Объект передачи энергоресурсов может содержать одну или несколько дуг $(i, j) \in E$, которые моделируют отдельные участки путей транспорта и имеют общие промежуточные узлы. Последние представляют компрессорные станции для магистральных трубопроводов или пересечения путей железнодорожного транспорта.

Модель живучести ТЭК может быть записана в виде следующей задачи линейного программирования:

$$\sum_{t=1}^T \left[\sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ijt} + \sum_{i \in N_d} b_i y_{it} + \sum_{j \in N_s} e_j s_{jt} \right] \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\sum_{i \in N_j^+} a_{ij} x_{ijt} - \sum_{i \in N_i^-} x_{ijt} = 0, \quad j \in N_o \cup N_b, \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N_j^+} a_{ij} x_{ijt} - \sum_{i \in N_i^-} x_{ijt} + y_{jt} = r_{jt}, \quad j \in N_d, \quad (3)$$

$$s_{jt-1} + \sum_{i \in N_j^+} a_{ij} x_{ijt} - \sum_{i \in N_j^-} x_{jit} - s_{jt} = 0, \quad j \in N_s, \quad (4)$$

$$x_{ijt}^{\min} \leq x_{ijt} \leq x_{ijt}^{\max}, \quad (i, j) \in E, \quad (5)$$

$$0 \leq y_{jt} \leq r_{jt}, \quad j \in N_d, \quad (6)$$

$$0 \leq s_{jt} \leq s_j^{\max}, \quad j \in N_s, \quad (7)$$

$$s_{jo} = s_j^{\max}, \quad j \in N_s, \quad (8)$$

$$t = \overline{1, T}, \quad (9)$$

где $N_j^+ = \{i : \forall (i, j) \in E\}$ – множество начал дуг, входящих в узел $j \in N$;
 $N_j^- = \{i : \forall (j, i) \in E\}$ – множество концов дуг, исходящих из узла $j \in N$;
 T – число периодов времени.

Модель (1) – (9) рассчитывает потокораспределение энергоресурсов по сети G в течение T периодов времени. Заданными параметрами в модели являются: a_{ij} – технологический коэффициент, связанный с дугой $(i, j) \in E$;
 c_{ij} – удельные эксплуатационные затраты на поток по дуге $(i, j) \in E$;
 b_i – удельный штраф за недопоставку энергоресурса потребителю $i \in N_d$;

e_j – удельный штраф за незаполненное хранилище $j \in N_s$; $x_{ijt}^{\min}$ – нижний предел пропускной способности дуги $(i, j) \in E$ в течение периода t ; $x_{ijt}^{\max}$ – верхний предел пропускной способности дуги $(i, j) \in E$ в течение периода t ; r_{jt} – требуемая поставка энергоресурса потребителю $j \in N_d$ в течение периода t ; $y_{jt}^{\max}$ – верхний предел недопоставки энергоресурса потребителю $j \in N_d$ в течение периода t ; $s_j^{\max}$ – емкость хранилища $j \in N_s$.

Если коэффициент a_{ij} отражает потери при передаче энергоресурса по дуге $(i, j) \in E$, то выполняется условие $0 \leq a_{ij} \leq 1$. Преобразование энергоресурса a_{ij} характеризует удельный расход преобразуемого энергоресурса (например, сжигаемого топлива). В остальных случаях $a_{ij} = +1$.

Искомými параметрами в модели (1) – (9) являются: x_{ijt} – поток по дуге $(i, j) \in E$ в течение периода t ; y_{it} – объем недопоставки энергоресурса потребителю $j \in N_d$ в течение периода t ; s_{jt} – запас топлива.

Первая составляющая целевой функции (1) минимизирует затраты на распределение потоков энергоресурсов по сети G . Вторая составляющая обеспечивает своевременную поставку энергоресурсов потребителям. Третья составляющая максимизирует заполненность хранилищ.

Уравнения (2) – (4) описывают баланс входящих и выходящих потоков в узле $i \in N$. Для потребителей $j \in N_d$ в (3) учитывается потребность в энергоресурсе r_{jt} и его возможный дефицит y_{jt} . Для хранилищ $j \in N_s$ в (4) задаются переменные s_{jt} , связывающие периоды времени $t = \overline{1, T}$ между собой в модели (1) – (9).

Соотношение (5) характеризует ограничения на потоки энергоресурсов по дугам.

Неравенство (6) характеризует ограничения на недопоставку энергоресурсов потребителям $j \in N_d$. Они должны быть неотрицательными и не превышать текущих потребностей.

Соотношение (7) характеризует ограничения на запас энергоресурсов в хранилищах $j \in N_s$. Он должен быть неотрицательным и не превышать емкости хранилищ. Хранилища изначально считаются полностью заполненными согласно равенству (8).

Деформация территориально-производственной структуры ТЭК в результате воздействия НС достигается увеличением потребностей r_{jt} в (3) для потребителей $j \in N_d$, уменьшением пропускных способностей $x_{ijt}^{\max}$ в (5). Например, для удаления узла $j \in N$ необходимо обнулить пропускные способности входящих в него и исходящих из него дуг.

4. НЕКОТОРЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ

Последние исследования на модели живучести ТЭК были связаны с определением критически важных для ТЭК объектов газовой отрасли [10, 11] и проходили одновременно с исследованиями на отраслевой модели ЕСГ России. Предварительно в рамках отраслевых исследований ЕСГ России определялись критически важные объекты газовой отрасли, а также их критически важные сочетания на базе оценок дефицитов газа по системе в целом (принятый допустимый порог недопоставок газа – пятипроцентный относительный дефицит по стране) [13, 14]. На базе этих исследований экспертно формировался перечень критичных газовых объектов и перечень критичных сочетаний газовых объектов. Эти перечни включали преимущественно компрессорные станции (важные с позиций обеспеченности газовых поставок) и участки магистральных газопроводов между ними. Далее в рамках модели ТЭК для холодных январских суток моделировалось отключение этих газовых объектов по одному либо критическое сочетание отключений этих объектов, учитывались запасы топлива, возможности диверсификации на ТЭС и в котельных. Условия холодных январских суток задавались коэффициентами сезонной неравномерности и накладывались:

- на потребности регионов в тепле и электроэнергии (для тепла экспертно заданное десятипроцентное увеличение потребностей, для электроэнергии – расчетный коэффициент на базе ежемесячной отчетности системного оператора Единой энергетической системы);

- на производственные возможности ТЭС и котельных (изменения коэффициентов использования установленной мощности источников теплоснабжения в отопительный период из отчета Российского энергетического агентства Минэнерго России), гидроэлектростанций (экспертно).

Далее анализировались складывающиеся дефициты в тепле, электроэнергии и газе по отдельным субъектам, по федеральным округам и по стране в целом. На основе этого анализа формировался перечень критически важных для ТЭК страны и ее федеральных округов газовых объектов. За основу бралась ситуация устойчивого функционирования ТЭК страны до 2022 года.

Результаты анализа снабжения потребителей в условиях пикового спроса на тепло при потере работоспособности отдельных объектов газовой схемы (61 критически важный газовый объект) представлены в работе [10]. Анализ проводился по территориям, входящим в зону влияния Единой системы газоснабжения РФ, и состоял в оценке последствий недопоставок газа для электро- и теплоэнергетики, для его прямых потребителей. Результаты анализа подтвердили значительное влияние недопоставок газа на регионы со значительной долей газа в их топливно-энергетическом балансе (это субъекты Северо-Западного и Центрального федеральных округов), на регионы периферии газотранспортной сети (субъекты Южного и Северо-Кавказского федеральных округов) и показали адекватность полученных с помощью модели ТЭК оценок.

В работе [11] оценивались последствия недопоставок газа в субъекты РФ для случаев отключения важнейших критических сочетаний объектов (было рассмотрено 5 комбинаций различных критически важных объектов Единой системы газоснабжения). В данном случае к исследованиям дополнительно

была привлечена отраслевая модель электроэнергетической системы, решающая задачу минимизации дефицита мощностей в энергозонах РФ [6, 15]. С ее помощью определялись относительные недоотпуски электроэнергии по объединенным энергетическим системам России при отключении рассматриваемых критически важных сочетаний газовых объектов, оценивалась корректность модели живучести ТЭК при оценке обеспеченности субъектов РФ электроэнергией. Результаты анализа показали схожесть полученных на обеих моделях результатов, доказали критичность полноценных поставок газа в регионы Центрального, Северо-Западного и Приволжского федеральных округов.

Дальнейшие исследования на модели живучести ТЭК ориентированы на решение задачи выбора эффективных мероприятий по повышению живучести ТЭК (в частности, для обоснования рациональных объемов диверсификации топлива на ТЭС и в котельных субъектов РФ в условиях экстремального функционирования ТЭК).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная выше модель живучести ТЭК России является необходимым инструментом для анализа надежности топливо- и энергоснабжения потребителей в условиях экстремального функционирования ТЭК. С помощью этой модели можно рассмотреть последствия реализации крупномасштабных нештатных ситуаций, оценить эффективность заложенных в ней механизмов резервирования и взаимозаменяемости ресурсов. Эта модель включает в себя модели основных систем энергетики: газоснабжения, углеснабжения, нефтепродуктоснабжения, электроэнергетики. Модель содержит производственный и распределительный (транспортный) блоки, блок потребления, представленный различными категориями потребителей энергоресурсов. Она рассматривает энергетику России как единое целое от производства энергетических ресурсов до потребления конечных энергоносителей, охватывает все стадии переработки и преобразования энергоресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иерархическое моделирование систем энергетики / отв. ред.: Н.И. Воропай, В.А. Стенников. – Новосибирск: Гео, 2022. – 314 с. – ISBN 978-5-6043021-9-4.
2. Системные исследования в энергетике: ретроспектива научных направлений СЭИ-ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2010. – 686 с.
3. Методы и модели исследования живучести систем энергетики / отв. ред. Ю.Н. Руденко. – Новосибирск: Наука, 1990. – 285 с.
4. Зоркальцев В.И. Методы прогнозирования и анализа эффективности функционирования системы топливоснабжения. – М.: Наука, 1988. – 144 с.
5. Макаров А.А., Мелентьев Л.А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства. – Новосибирск: Наука, 1973. – 275 с.
6. Надежность систем энергетики и их оборудования. В 4 т. Т. 1. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / под ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 480 с.
7. Надежность топливо- и энергоснабжения потребителей с позиций обеспечения энергетической безопасности / отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: СО РАН, 2022. – 132 с.

8. Еделев А.В., Береснева Н.М. Подход к моделированию функционирования взаимосвязанных систем энергетики в условиях возмущений и его программная поддержка // Программные продукты и системы. – 2021. – Т. 34, № 3. – С. 409–419. – DOI: 10.15827/0236-235X.135.409-419.
9. Энергетическая безопасность России / В.В. Бушуев, Н.И. Воропай, А.М. Мастепанов, Ю.К. Шафраник и др. – Новосибирск: Наука, 1998. – 302 с.
10. Сендеров С.М., Береснева Н.М. Анализ возможностей энергоснабжения потребителей в условиях похолоданий при крупномасштабных нештатных ситуациях в газовой отрасли // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2024. – № 2. – С. 21–33.
11. Методический подход к оценке уровня значимости объектов энергетики при взаимосвязанной работе энергетических отраслей / С.М. Сендеров, Д.С. Крупенёв, С.В. Воробьев, Н.М. Береснева, Д.А. Бояркин // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2023. – № 2. – С. 31–45.
12. Еделев А.В., Береснева Н.М., Горский С.А. Анализ уязвимости энергетической инфраструктуры и его реализация // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 1. – С. 47–52. – DOI: 10.17513/snt.39008.
13. Сендеров С.М., Воробьев С.В. Формирование перечней критически важных объектов газовой отрасли и их сочетаний с позиций энергетической безопасности страны // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2019. – № 1. – С. 59–69.
14. Senderov S.M., Edelev A.V. Formation of a list of critical facilities in the gas transportation system of Russia in term of energy security // Energy. – 2019. – Vol. 184. – P. 105–112.
15. Iakubovskii D., Krupenev D., Boyarkin D. Model for minimizing energy consumption of electric power systems taking into account the balance of active and reactive power // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 584. – P. 01024.

Береснева Наталья Михайловна, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории живучести систем энергетики № 33 Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. Основное направление научных исследований – живучесть систем энергетики, математическое моделирование. Имеет более 40 печатных работ. E-mail: beresneva@isem.irk.ru

Еделев Алексей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории живучести систем энергетики № 33 Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. Основное направление научных исследований – живучесть систем энергетики, математическое моделирование, оптимизация, параллельные вычисления. Имеет более 60 печатных работ. E-mail: flower@isem.irk.ru

Зоркальцев Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией математического моделирования Байкальского государственного университета. Основное направление научных исследований – методы оптимизации, математическое моделирование, алгоритмы комбинаторного моделирования развития систем. Имеет более 450 печатных работ. E-mail: vizork@mail.ru

Beresneva Natalya M., PhD (Eng.), researcher in the laboratory “Energy Systems Resilience Laboratories” No. 33, Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Her research interests are currently focused on the resilience of energy systems, on mathematical modeling. She has more than 40 publications. E-mail: beresneva@isem.irk.ru.

Edelev Alexei V., PhD (Eng.), senior researcher in the laboratory “Energy systems resilience laboratories” No. 33, the Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on mathematical modeling, optimization methods and resilience of energy systems. He has more than 60 publications. E-mail: flower@isem.irk.ru.

Zorkaltsev Valery I., D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Laboratory of Mathematical Analysis of the Baikal State University. The main direction of scientific research is optimization methods, mathematical modeling, and algorithms for combinatorial modeling of system development. He has more than 450 published works. E-mail: vizork@mail.ru

Model of survivability of the Russia energy sector *N.M. BERESNEVA^{1,2,a}, A.V. EDELEV^{1,b}, V.I. ZORKALTSEV^{3,c}¹ Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 130 Lermontov Street, Irkutsk, 664033, Russian Federation² The Federal State Budget Institution of Higher Education "Irkutsk State Transport University IrGUPS", 15 Chernyshevskogo Street, Irkutsk, 664074, Russian Federation³ Baikal State University, 11 Lenin Street, 664003, Russian Federation^a beresneva@isem.irk.ru ^b flower@isem.irk.ru ^c vizork@mail.ru**Abstract**

The article describes the mathematical model developed and used to solve problems of ensuring the resilience of the fuel and energy complex of Russia during large-scale disturbances. Using this model, the consequences of a drop in the productivity of energy facilities and systems in the event of large-scale disturbances are analyzed, and measures are substantiated to restore fuel and energy supplies to consumers for the extreme conditions of the country's energy sector. The sources of the disturbances under consideration may be natural, socio-economic, technical factors, foreign economic, foreign policy, and sabotage and military influences. The model is a development of previously created tools for managing the country's fuel and energy complex in emergency situations. The purpose of the article is to highlight the methodological aspects of this model and software development, including the specifics of organizing computational experiments using the model. The key feature of research into the resilience of the fuel and energy complex is highlighted – the relationship between energy systems and their objects at the intra- and inter-industry levels. Examples of mechanisms for compensating for the consequences of emergency situations are given.

The article provides a mathematical description of a multi-period territorially distributed model of the fuel and energy complex functioning management intended for selection of rational options of energy supply to enterprises and population during large-scale disturbances. The model is based on an aggregated representation of energy system objects (except gas), on the use of maneuvering capabilities of interregional and inter-industry energy resource flows, on the use, if necessary, of restrictions in energy resource supplies to individual categories of consumers. The gas industry in the model is represented by a detailed diagram of the Unified Gas Supply System of Russia. Mechanisms for ensuring the survivability of the fuel and energy complex of Russia are presented by short-term and long-term measures to create fuel reserves, reserve capacities, and use possible options for diversifying energy resources.

Keywords: energy sector, energy systems, survivability, fuel and energy complex model, emergency situations, survivability enhancement measures, reliability of fuel and energy supply, computational experiment

REFERENCES

1. Voropai N.I., Stennikov V.A., ed. *Ierarkhicheskoe modelirovanie sistem energetiki* [Hierarchical modeling of energy systems]. Novosibirsk, Geo Publ., 2022. 314 p. ISBN 978-5-6043021-9-4.
2. Voropai N.I., ed. *Sistemnye issledovaniya v energetike: retrospektiva nauchnykh napravlenii SEI-ISEM* [Systemic research in energy: A retrospective of the scientific directions of SEI–ISEM]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2010. 686 p.
3. Rudenko Yu.N., ed. *Metody i modeli issledovaniya zhivuchesti sistem energetiki* [Methods and models for studying the resilience of energy systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 285 p.

* Received 25 January 2024.

Financial support for research: government assignment project No. FWEU-2021-0003 (registration number: AAAA-A21-121012090014-5).

4. Zorkaltsev V.I. *Metody prognozirovaniya i analiza effektivnosti funktsionirovaniya sistemy toplivnabzheniya* [Methods for forecasting and analyzing the efficiency of the fuel supply system]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 144 p.
5. Makarov A.A., Melent'ev L.A. *Metody issledovaniya i optimizatsii energeticheskogo khozyaistva* [Methods of research and optimization of energy economy]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1973. 275 p.
6. Rudenko Yu.N., ed. *Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya*. V 4 t. T. 1. *Spravochnik po obshchim modelyam analiza i sinteza nadezhnosti sistem energetiki* [Reliability of energy systems and their equipment. In 4 vols. Vol. 1. Reference book on General models of analysis and synthesis of reliability of power systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1994. 480 p.
7. Voropai N.I., ed. *Nadezhnost' toplivo- i energosnabzheniya potrebitel'ei s pozitsii obespecheniya energeticheskoi bezopasnosti* [Reliability of fuel and energy supply to consumers from the standpoint of ensuring energy security]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2022. 132 p.
8. Edelev A.V., Beresneva N.M. Podkhod k modelirovaniyu funktsionirovaniya vzaimosvyazannykh sistem energetiki v usloviyakh vozmushchenii i ego programmaya podderzhka [An approach to modeling the functioning of Interdependent energy systems under disturbances and its software support]. *Programmnye produkty i sistemy = Software & Systems*, 2021, vol. 34 (3), pp. 409–419. DOI: 10.15827/0236-235X.135.409-419.
9. Bushuev V.V., Voropai N.I., Mastepanov A.M., Shafranik Yu.K. *Energeticheskaya bezopasnost' Rossii* [Energy security of Russia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1998. 302 p.
10. Senderov S.M., Beresneva N.M. Analiz vozmozhnostei energosnabzheniya potrebitel'ei v usloviyakh pokholodanii pri krupnomasshtabnykh neshtatnykh situatsiyakh v gazovoi otrasli [Analysis of the possibilities of energy supply to consumers in conditions of cold snaps during large-scale emergency situations in the gas industry]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian academy of sciences. Power engineering*, 2024, no. 2, pp. 21–33.
11. Senderov S.M., Krupenev D.S., Vorobev S.V., Beresneva N.M., Boyarkin D.A. Metodicheskii podkhod k otsenke urovnya znachimosti ob'ektov energetiki pri vzaimosvyazannoi rabote energeticheskikh otraslei [Methodological approach to assessing the level of significance of critically important energy facilities in the interconnected operation of energy systems]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian academy of sciences. Power engineering*, 2023, no. 2, pp. 31–45.
12. Edelev A.V., Beresneva N.M., Gorskiy S.A. Analiz uyazvimosti energeticheskoi infrastruktury i ego realizatsiya [Vulnerability analysis of energy infrastructure and its implementation]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern High Technologies*, 2022, no. 1, pp. 47–52. DOI: 10.17513/snt.39008
13. Senderov S.M., Vorob'ev S.V. Formirovanie perechnei kriticheski vazhnykh ob'ektov gazovoi otrasli i ikh sochetanii s pozitsii energeticheskoi bezopasnosti strany [Formation of lists of critical gas industry facilities and their combinations from the standpoint of the country's energy security]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika = Proceedings of the Russian academy of sciences. Power engineering*, 2019, no. 1, pp. 59–69.
14. Senderov S.M., Edelev A.V. Formation of a list of critical facilities in the gas transportation system of Russia in term of energy security. *Energy*, 2019, vol. 184, pp. 105–112.
15. Iakubovskii D., Krupenev D., Boyarkin D. Model for minimizing energy consumption of electric power systems taking into account the balance of active and reactive power. *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 584, p. 01024.

Для цитирования:

Береснева Н.М., Еделев А.В., Зоркальцев В.И. Модель живучести топливно-энергетического комплекса России // Системы анализа и обработки данных. – 2025. – № 3 (99). – С. 7–24. – DOI: 10.17212/2782-2001-2025-3-7-24.

For citation:

Beresneva N.M., Edelev A.V., Zorkaltsev V.I. Model' zhivuchesti toplivno-energeticheskogo kompleksa Rossii [Model of survivability of the Russia energy sector]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2025, no. 3 (99), pp. 7–24. DOI: 10.17212/2782-2001-2025-3-7-24.