

**ТЕХНОЛОГИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА
В ИССЛЕДОВАНИЯХ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОТРАСЛЕЙ
ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ УГРОЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Массель Алексей Геннадьевич

к.т.н., с.н.с. отдела «Системы искусственного интеллекта в энергетике»

e-mail: amassel@isem.irk.ru

Мамедов Тимур Габилевич

аспирант отдела «Системы искусственного интеллекта в энергетике»

e-mail: mamedowtymur@yandex.ru

Пяткова Наталья Ивановна

к.т.н., с.н.с. лаборатории «Надежность топливо- и энергоснабжения»

e-mail: nata@isem.irk.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130.

Аннотация. В работе представлен алгоритм проведения вычислительного эксперимента на примере реализации одной из угроз энергетической безопасности «Недостаток инвестиций в отрасли энергетике» с использованием когнитивных и экономико-математических моделей. Рассмотрены особенности включения инвестиционной составляющей в модель оптимизации вариантов развития ТЭК с учетом энергетической безопасности. Представлена когнитивная модель для анализа угрозы «Недостаток инвестиций в отрасли энергетике». Дается описание ПК ИНТЭК-А, обеспечивающего возможность интеграции когнитивных и математических моделей.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, угрозы энергетической безопасности, когнитивное моделирование, экономико-математическая модель.

Цитирование: Массель А.Г., Мамедов Т.Г., Пяткова Н.И. Технология вычислительного эксперимента в исследованиях работы энергетических отраслей при реализации угроз энергетической безопасности // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. №3(23). С. 62-73. DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.006.

Введение. В современных условиях планирования работы и развития энергосистем возрастают актуальность и значимость исследований проблем энергетической безопасности. Это прежде всего связано с высоким ущербом, а иногда с катастрофическими последствиями в случаях прерывания поставки энергоресурсов потребителям. Энергетическая безопасность касается двух аспектов [1-4]: необходимости долгосрочного бездефицитного обеспечения потребителей требуемыми видами энергоресурсов при функционировании энергетики в нормальных условиях, и необходимости создания условий для обеспечения энергоресурсами потребителей в условиях чрезвычайных ситуаций (вызванных реализацией угроз энергетической безопасности).

Как известно, реализация угроз энергетической безопасности приводит к значительному ущербу для экономики страны и регионов. Так, к примеру, снижение инвестиционных возможностей приводит к уменьшению уровней добычи нефти и газа в стране, к росту доли физически и морально устаревших основных производственных фондов в энергетических отраслях, к замедлению темпов снижения величины удельной энергоёмкости ВВП [2].

Снижение инвестиционных возможностей в целом по топливно-энергетического комплексу и отдельно прослеживается для электроэнергетики, газовой и угольной отраслей, а именно [5, 6]:

- в электроэнергетике сокращение инвестиций в 2020 году по сравнению с 2019 годом составило 5,8 %;
- в газовой отрасли инвестиции сократились на 12 %, при этом большая часть инвестиций распределяется в строительство новых магистральных трубопроводов;
- в угольной отрасли объем инвестиций носил переменный характер: в 2016 году они составили 44 % от уровня 2012 года, к 2019 году увеличились в 2 раза по сравнению с 2016, в 2020 снизились на 27% по сравнению с 2019 годом.

В случае природных угроз возможны отклонения максимальных сезонных отопительных нагрузок регионов в зависимости от их климатических условий, от состава потребителей в них вплоть до 20-30 %. Также отклонения могут сопровождаться значительным ростом спроса на энергоресурсы как для единой климатической зоны, так и нескольких соседних регионов.

Техногенные угрозы наиболее критичны для газовой отрасли и электроэнергетики. В системе газоснабжения одним из наиболее опасных фактором является возможность повреждения трансконтинентальных газопроводов, идущих из крупного газодобывающего района через Урал в европейскую часть России [2]. В электроэнергетике значительные недопоставки могут быть вызваны разрывами связей между отдельными энергосистемами или аварийными ситуациями на конкретных электростанциях (например, авария на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г., системная авария на энергообъектах Сибирского федерального округа из-за сбоя на Братской ГЭС в июне 2017 г.).

Что касается нефтедобывающей отрасли, то наблюдается отставание в воспроизводстве сырьевой базы нефтедобычи, которое сопровождается снижением коэффициента извлечения нефти (с 49% до 30% и ниже).

Сложившаяся структура топливно-энергетического баланса страны с доминирующей, а в ряде случаев почти монопольной, долей природного газа особенно в балансах котельно-печного топлива европейских районов России является серьезной стратегической угрозой ЭБ России. Опасность здесь состоит в том, что такая фактически моноструктура делает экономику европейской части России слишком зависимой от надежности поставок газа, добываемого и транспортируемого в основном из одного газодобывающего района и по одной системе трубопроводов.

Во всех отраслях ТЭК увеличивается доля оборудования, выработавшего свой ресурс (нормативный срок службы). Оно характеризуется высокой аварийностью, значительными затратами и продолжительностью ремонтов, низким техническим уровнем.

К настоящему моменту около 70 % *магистральных нефтепроводов* имеют возраст более 35 лет, при этом, несмотря на ввод новых нефтепроводов, качественного изменения не произошло: доля изношенного оборудования остается по-прежнему большой. В *газотранспортной системе* большинство трубопроводов были построены в 70-80-е годы прошлого столетия, т.е. находятся в эксплуатации более 30 лет. Крайне острой становится проблема износа производственных фондов *в электроэнергетике*. Суммарная мощность устаревшего оборудования на электростанциях страны составляет около 38 % от установленной мощности, износ электросетевого оборудования увеличился к 2020 году до 52%.

В силу невозможности проведения натурных экспериментов на работающих системах энергетики ТЭК особое значение приобретают исследования, связанные с моделированием этих систем, разработкой специализированных программно-инструментальных средств, рациональной организацией вычислительного эксперимента для поиска путей бездефицитного обеспечения потребителей энергоресурсами при функционировании в нормальных условиях и условиях нештатных ситуаций.

Современные условия развития информационных технологий, появление высокопроизводительных вычислительных средств, а также интеллектуализация систем энергетики и необходимость их функционирования в условиях цифровой экономики предъявляют, с одной стороны, особые требования к используемым модельно-вычислительным средствам. С другой – предоставляют возможности повысить адекватность и корректность моделирования реальных систем, учесть в моделях инерционность процессов, динамику развития аварийных ситуаций в моделях оптимизации систем энергетики ТЭК, нелинейность с точки зрения адекватности представления процессов в системах энергетики для повышения точности принимаемых решений.

Постановка задачи и алгоритм вычислительного эксперимента с использованием экономико-математической модели ТЭК. Данная работа является составной частью исследований энергетической безопасности, проводимых в отделе энергетической безопасности ИСЭМ СО РАН. Аналогичные исследования, разработки и модели для таких исследований ориентированы в основном на решение задач перспективного планирования работы энергетики в нормальных условиях функционирования с горизонтом до 15-20 лет. Подобные работы, проводимые в других коллективах, носят локальный или региональный характер с исследованием отдельных аспектов проблемы [7-17]. Комплексные же исследования, позволяющие оценить возможности взаимосвязанной работы всех энергетических отраслей и определить последствия для потребителей энергоресурсов при возникновении чрезвычайных ситуаций в работе одной отрасли или нескольких отраслей одновременно, ранее не выполнялись.

Исследования же, выполняемые в отделе энергетической безопасности ИСЭМ СО РАН, отличаются нацеленностью на решение задач оценки поведения систем энергетики в условиях реализации угроз энергетической безопасности, оптимизации режимов взаимосвязанной работы систем энергетики в условиях нештатных ситуаций для надежного энергоснабжения потребителей. По результатам проведенных исследований предлагается формировать определенный перечень мероприятий, позволяющих обеспечить уровень энергетической безопасности на соответствующем уровне.

Для проведения исследований по оценке влияния угроз энергетической безопасности на надежность энергоснабжения потребителей в условиях нештатных (критических) ситуаций в ИСЭМ СО РАН предлагается использовать двухуровневую технологию, интегрирующую этапы качественного анализа (с использованием инструментальных средств семантического моделирования) и количественного анализа (с использованием линейных экономико-математических моделей и традиционных программных комплексов) (рис.1) [18]. Применение методов когнитивного моделирования на уровне качественного анализа рассматривалось, в частности, в [19].

Для проведения комплексного эксперимента по анализу основной угрозы энергетической безопасности «Недостаток инвестиций в отрасли энергетики» предполагается совместное использование когнитивных моделей систем энергетики (газовой, угольной, электроэнергетики) и модели оптимизации вариантов развития ТЭК с учетом факторов энергетической безопасности.

Для первого этапа качественного уровня сформирована когнитивная модель угрозы «Недостаток инвестиций» для газовой отрасли (рис. 2).

На втором (количественном уровне) предлагается использовать экономико-математическую модель (ЭММ) для оптимизации вариантов развития ТЭК с учетом энергетической безопасности, описанную в [1, 4]. Модель объединяет блоки, моделирующие отраслевые подсистемы энергетического комплекса (газовой, угольной,

нефтеперерабатывающей (в части мазутоснабжения) отраслями, электро- и теплоэнергетикой).



Рис. 1. Схема взаимодействия задач и модельно-инструментальных средств

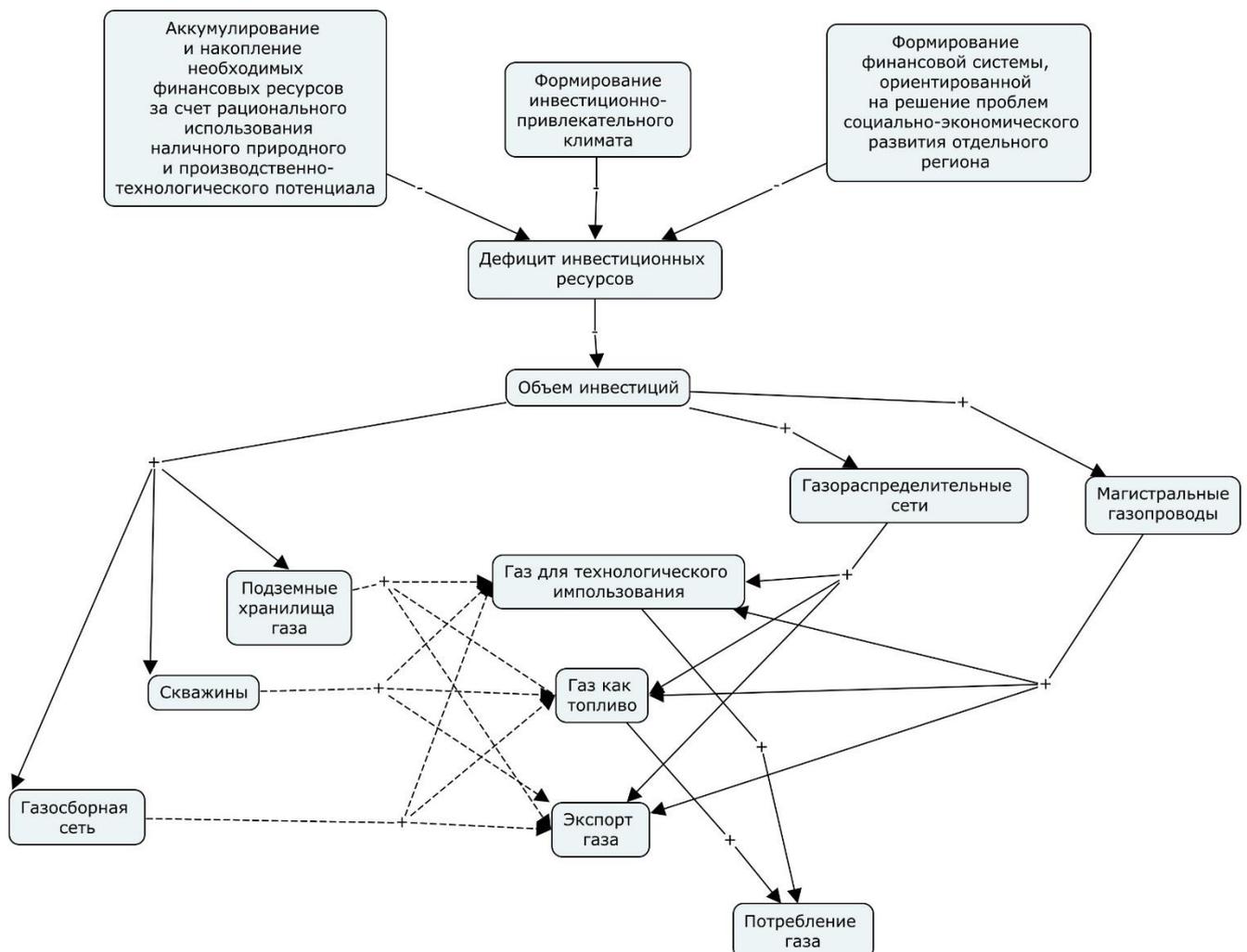


Рис. 2. Когнитивная карта угрозы «Недостаток инвестиций» для газовой отрасли

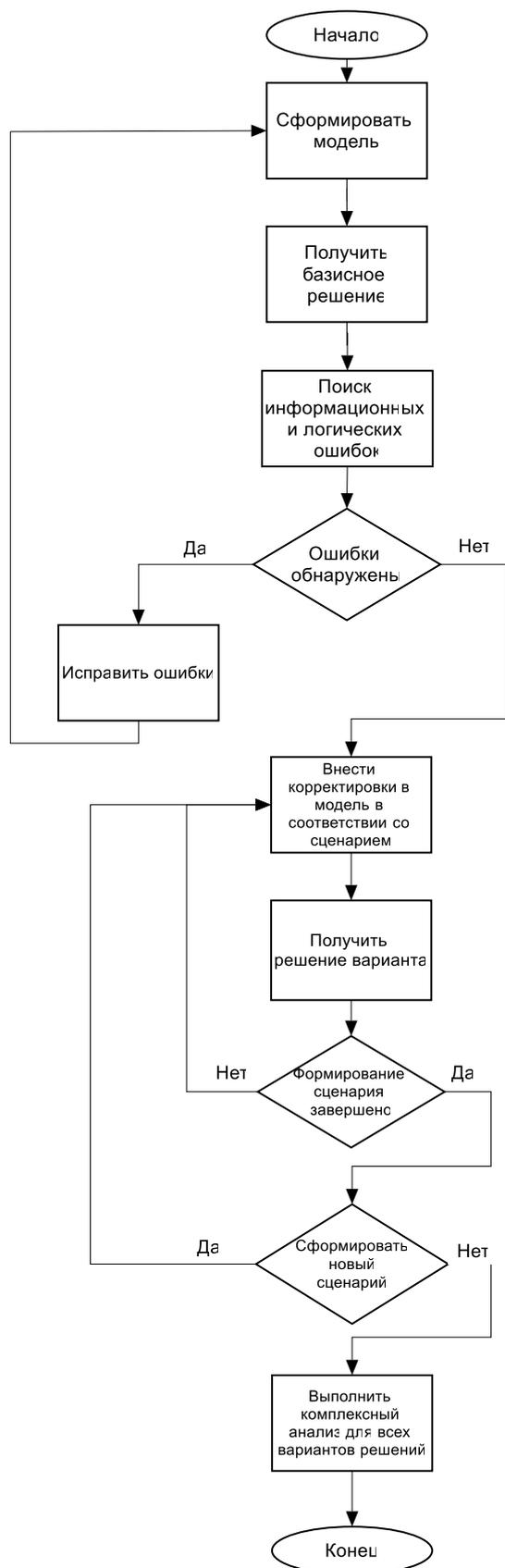


Рис. 3. Алгоритм вычислительного эксперимента с использованием ЭММ ТЭК.

Предложено существующий финансовый блок модели дополнить инвестиционными показателями на реконструкцию, модернизацию действующих мощностей, вывод устаревшего оборудования, ввод новых мощностей на объектах энергетических отраслей. Учет этих составляющих будет представлен в модели дополнительными уравнениями, описывающими удельные капиталовложения на единицу новых мощностей по всем технологическим этапам. Для выполнения вычислительного эксперимента с использованием ЭММ предлагается следующий алгоритм (рис. 3).

На основе когнитивных моделей отраслей энергетики формируется блок корректирующих коэффициентов для модели количественного уровня, который включает коэффициенты корректировки переменных, верхних ограничений и правых частей матрицы условий.

Предполагается проведение следующих этапов эксперимента:

1. Расчет инвестиций по всем энергетическим отраслям без внесения возмущений.
2. Расчет при заданных ограничениях на инвестиции (10%, 20% и т.д. на капвложения):
 - по отдельным отраслям;
 - по отдельным технологическим этапам (добыча-производство, транспорт).

В результате экспериментальных расчетов выявляется динамика складывающихся дефицитов у отдельных категорий потребителей по территории страны и по видам энергоресурсов.

Проведение оптимизационных расчетов проводится с использованием модифицированного программного комплекса «ИНТЭК-А».

Описание ПК «ИНТЭК-А». ПК «ИНТЭК-А» – это комплекс вычислительных программ для поддержки исследований направлений развития топливно-энергетического комплекса с учетом требований энергетической безопасности. ПК ориентирован на решение оптимизационных задач большой размерности методами линейного программирования, включая автоматизацию процессов обработки данных, выполнение расчетов в задачах моделирования и оптимизации развития систем энергетики и визуализацию результатов. Из-за перехода предыдущей версии ПК («ИНТЭК-М») [20, 21] в категорию унаследованного программного обеспечения было принято решение о реинжиниринге, результатом которого стала новая версия ПК «ИНТЭК-А». Особенности новой версии являются применение агентно-сервисного подхода для разработки архитектуры и ее реализации (рис. 4), интеграция в ПК инструмента когнитивного моделирования, а также использование современных технологий при разработке.

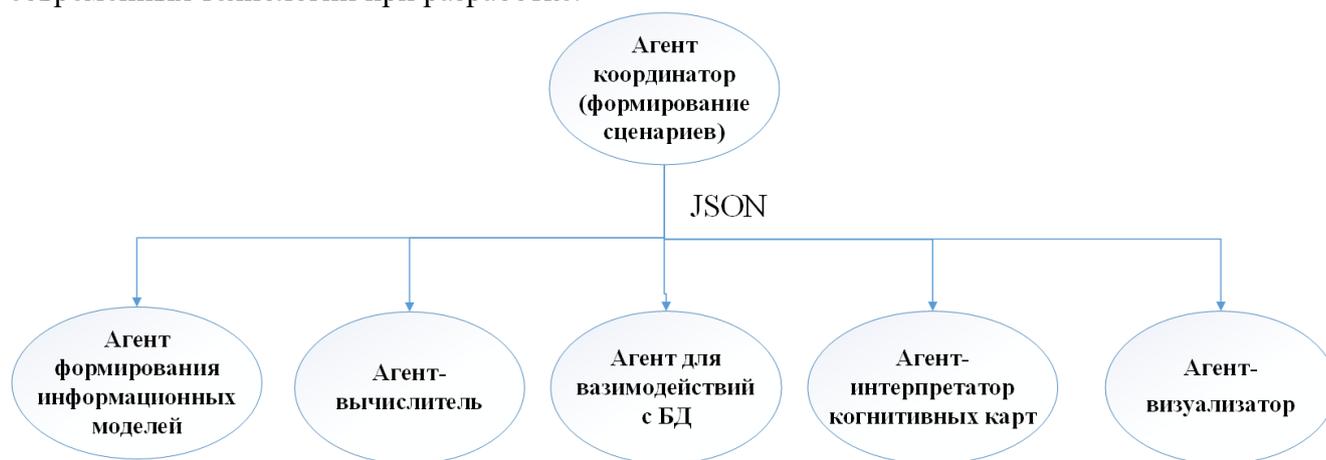


Рис. 4. Схема взаимодействия агентов в ПК «ИНТЭК-А»

Состав агентов:

- Главный агент ПК «ИНТЭК-А» – это **агент-координатор** (агент формирования сценариев). Его задача – задавать различные ситуации и формировать отдельные сценарии путем создания и наполнения технологических словарей, вызывать других агентов, обеспечивать контроль действий пользователя. Словари используются для отображения моделей на естественном языке. Агент частично поддерживает первый этап подготовки исходных данных.
- **Агент формирования информационных моделей** и внесения корректировок, необходим для удобной работы с информационными моделями. Этот агент включает возможности создания новых моделей посредством использования графического пользовательского интерфейса.
- **Агент-вычислитель** – в ядре агента расположена библиотека для решения общей задачи линейного программирования. Назначение агента – это поиск оптимальных значений переменных модели.
- **Агент для взаимодействий с базой данных** – обеспечивает взаимодействие с многофункциональной СУБД PostgreSQL, способной обрабатывать сложные запросы и поддерживать базы данных большого объема; СУБД бесплатная и содержит ряд полезных опций.
- **Агент – интерпретатор когнитивных карт** интегрирует экономико-математические и когнитивные модели. Агент позволит взаимодействовать с экономико-математическими моделями ТЭК через когнитивные карты и формировать

когнитивные карты по полученным балансовым оценкам. В [22] описан подход к решению проблемы управления знаниями, взятый за основу для разработки агента.

- **Агент визуализации вычислений** отвечает за визуализацию расчетов. Основной задачей этого агента является построение различных табличных отчетов и графиков, содержащих интересующие исследователя показатели результатов вычислительного эксперимента, такие, как: балансы топливно-энергетических ресурсов по каждому району, группе районов и стране целом; межрайонные потоки различных видов топлива; оценки эффективности энергетических ресурсов и технологических способов.

ПК «ИНТЭК-А» предоставляет пользователю следующие функциональные возможности: формирование технологических словарей, информационных моделей ТЭК, сценария исследований; многокритериальные правки информационной модели ТЭК; выполнение оптимизационных расчетов; визуализация результатов оптимизации в виде балансовых таблиц или когнитивных карт. Примеры интерфейсов некоторых новых функциональных возможностей ПК «ИНТЭК-А» приведены на рис. 5-7.

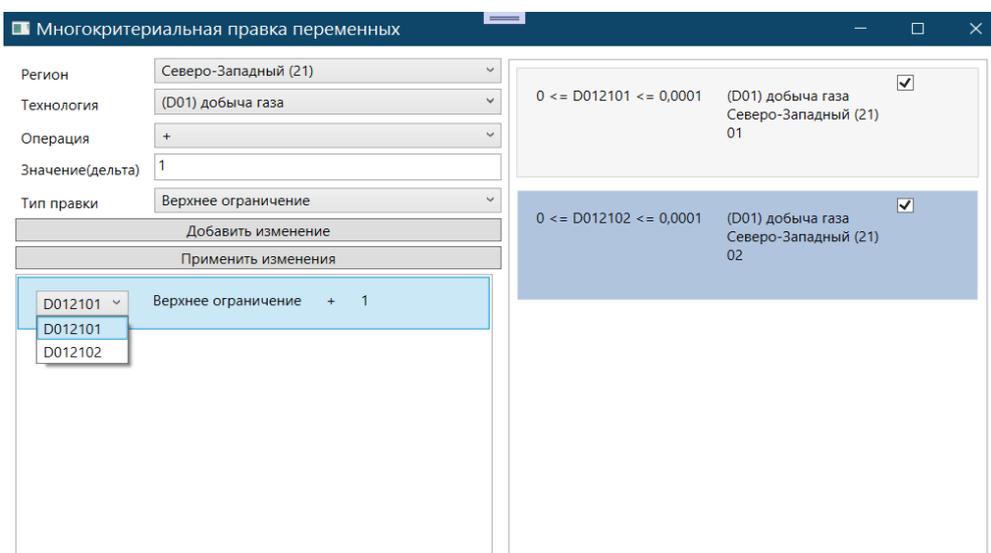


Рис. 5. Многокритериальные правки параметров переменных и линейных неравенств или уравнений (пример интерфейса)

| Балансовая таблицы модели текущего шага: | | | Балансовая таблицы модели предыдущего шага: | | |
|--|------------------------|-------------------------|---|------------------------|-------------------------|
| Район | э/энергия, млрд. кВт*ч | теплоэнергия, млн. Гкал | Район | э/энергия, млрд. кВт*ч | теплоэнергия, млн. Гкал |
| Северо-Западный (21) | | | Северо-Западный (21) | | |
| КЭС действ. | 0 | 0 | КЭС действ. | 15,7 | 0 |
| КЭС новые | 0 | 0 | КЭС новые | 0 | 0 |
| ТЭЦ действ. | 31,51 | 80 | ТЭЦ действ. | 30,72 | 78 |
| ТЭЦ новые | 0 | 0 | ТЭЦ новые | 0 | 0 |
| АЭС действ. | 80,6 | 0 | АЭС действ. | 38,68 | 0 |
| ГЭС действ. | 13,29 | 0 | ГЭС действ. | 12,8 | 0 |
| ГЭС новые. | 0,19 | 0 | ГЭС новые. | 0 | 0 |
| Котельные | 0 | 82 | Котельные | 0 | 68,1 |
| Прочие источники | 0 | 10 | Прочие источники | 0 | 9 |
| Всего (тэ, ээ) | 125,59 | 172 | Всего (тэ, ээ) | 97,9 | 155,1 |
| Потребление | 100,7 | 172 | Потребление | 92,9 | 155,1 |
| Дефицит | 20,09 | 0 | Дефицит | 0 | 0 |
| Экспорт | 4,8 | 0 | Экспорт | 5 | 0 |
| Вывоз | 0 | 0 | Вывоз | 0 | 0 |
| Импорт | 0 | 0 | Импорт | 0 | 0 |

Рис. 6. Сравнение балансовых оценок текущего шага с балансовыми оценками предыдущего шага

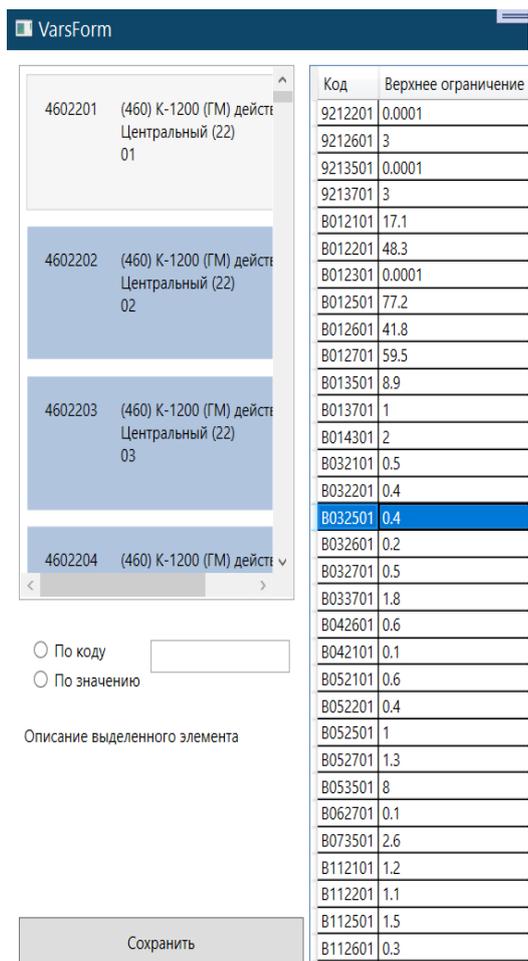


Рис. 7. Отображение верхних ограничений переменных и линейных неравенств или уравнений в виде таблиц, с возможностью редактирования через эти таблицы (формирование паттерна информационной модели)

Заключение. В статье представлены обоснование необходимости и постановка задачи выполнения вычислительных экспериментов для сценария реализации одной из угроз ЭБ – «Недостаток инвестиций в отрасли энергетики». Представлены общая схема взаимосвязи этапов качественного и количественного анализа и одна из когнитивных карт – когнитивная карта угрозы «Недостаток инвестиций» для газовой отрасли. Предложен алгоритм выполнения вычислительного эксперимента с использованием многоагентного программного комплекса ПК ИНТЭК-А, разработанного на основе реинжиниринга предыдущей версии ПК ИНТЭК-М. Рассмотрен состав агентов и функциональные возможности ПК, принципиальным отличием которого от предыдущих версий является интеграция в состав ПК инструментального средства когнитивного моделирования, что позволяет автоматизировать интеграцию семантических (когнитивных) и математических моделей. Визуализация расчетов в виде таблиц и когнитивных карт облегчает их интерпретацию.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания FWEU-2021-0001 № АААА-А21-12101209007-7 программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП "Высокотемпературный контур" (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038), при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 19-07-00351, 20-08-00367.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев В.В., Воропай Н.И., Мастепанов А.М., Шафраник Ю.К. Энергетическая безопасность России. Новосибирск: «Наука». Сиб. издательская фирма РАН. 1999. 439 с.
2. Пяткова Н.И., Рабчук В.И., Сендеров С.М. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения. Новосибирск: Наука. 2011. 211 с.
3. Сендеров С.М., Рабчук В.И., Пяткова Н.И., Воробьев С.В. Обеспечение энергетической безопасности России: выбор приоритетов. Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние. Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Новосибирск: Наука. 2017. 116 с.

4. Pyatkova N., Krupenev D. Methodical aspects of the energy industries interconnected operation modeling at the energy security research under modern conditions E3S Web of Conferences 209, 06001 (2020) DOI: <https://doi.org/10.1051 /e3sconf/202020906016>.
5. Итоги работы Минэнерго России и основные результаты функционирования ТЭК в 2018 году. Задачи на среднесрочную перспективу. Режим доступа: https://minenergo.gov.ru/prezentaciya_kollegiya_2019.pdf (дата обращения: 15.09.2021).
6. Итоги работы Минэнерго России и основные результаты функционирования ТЭК в 2012-2017 гг. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/11279/82618> (дата обращения: 15.09.2021).
7. Вавина Е. 20 лет электроэнергетики в России – от РАО «ЕЭС России» до либерализации рынка. Российская экономика 1999-2019. Спецпроект «Ведомостей» и «Эксперт РА». 09.12.2019 Ведомости. Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2019/12/10/818261-20-elektroenergetiki> (дата обращения: 15.09.2021).
8. Козлов М.В., Малашенко Ю. Е., Назарова И. А., Новикова Н.М. Управление топливно-энергетической системой при крупномасштабных повреждениях. Сетевая модель и программная реализация. Изв. РАН. Теория и системы управления. 2017. № 6. С. 50-73.
9. Малашенко Ю.Е., Назарова И.А., Новикова Н.М. Управление топливно-энергетической системой при крупномасштабных повреждениях. Постановки задач оптимизации. Изв. РАН. Теория и системы управления. 2018. № 2. С. 39-51.
10. Малашенко Ю. Е., Назарова И. А., Новикова Н.М. Метод анализа функциональной уязвимости потоковых сетевых систем. Информатика и ее применения. 2017. Т. 11. Вып. 4. С. 47-54.
11. Малашенко Ю. Е., Назарова И. А., Новикова Н.М. Диаграммы уязвимости потоковых сетевых систем. Информатика и ее применения. 2018. Т. 12. Вып. 1. С. 11-17.
12. Гребенюк Г.Г., Никишов С.М. Блокирование энерго- и ресурсоснабжения целевых объектов в сетевых инфраструктурах // Control sciences. 2016. № 4. С. 52-57.
13. Seebregts, Ad J., Goldstein, Gary A., Smekens, Koen. Energy/Environmental Modeling with the MARKAL Family of Models. Proc. Int. Conf. on Operations Research (OR 2001), Energy and Environment Session, September 3-5, 2001. Duisburg, Germany. Режим доступа: <ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/report/2001/rx01039.pdf> (дата обращения: 01.09.2021).
14. MARKAL IEA-ETSAP: The Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP). 2011. Режим доступа: <http://www.iea-etsap.org/web/Markal.asp> (дата обращения: 22.08.2021).
15. MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact) International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) [Laxenburg, Austria]. Режим доступа: <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/Energy/MESSAGE.en.html> (дата обращения: 15.09.2021).
16. Федорова Е. В., Зорина Т.Г. Моделирование межрегионального энергообмена с помощью программы MESSAGE. Ядерная энергетика. 2004. № 4. С. 3-11.
17. The National Energy Modeling System: An Overview 2009. Режим доступа: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/overview/index.html> (дата обращения: 15.09.2021).
18. Массель А. Г. Методологический подход к организации интеллектуальной поддержки исследований проблемы энергетической безопасности // Информационные технологии. 2010. № 9. С. 32-36.

19. Пяткова Н.И., Массель А.Г. Когнитивное моделирование в исследованиях энергетической безопасности: переход к динамическим когнитивным картам // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 4(20). С.24-33.
 20. Аршинский В.Л., Массель А.Г., Фартышев Д.А. Мультиагентный программный комплекс для исследований проблемы энергетической безопасности // Труды XIV Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Том 3. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2009. С. 283-289.
 21. Фартышев Д.А. Разработка многоагентного ПК ИНТЭК-М для исследований проблемы энергетической безопасности // Программные продукты и системы. № 3. 2010. С. 126-129.
 22. Массель Л.В., Массель А.Г., Пестерев Д.В. Технология управления знаниями с использованием онтологий, когнитивных моделей и продукционных экспертных систем. Известия ЮФУ. Технические науки. № 4. 2019. С. 140-152.
-

UDK 004.8:620.9

**COMPUTATIONAL EXPERIMENT TECHNOLOGY
IN RESEARCH OF POWER INDUSTRIES WHEN IMPLEMENTING
THREATS TO ENERGY SECURITY**

Alexey G. Massel

Ph.D., senior researcher of Department "Artificial Intelligence Systems in Energy"
e-mail: amassel@isem.irk.ru

Timur H. Mamedov

Postgraduate student of the department "Artificial Intelligence Systems in Energy"
e-mail: mamedowtymur@yandex.ru

Natalia I. Pyatkova

Ph.D., senior researcher laboratory "Reliability of fuel and energy supply"
e-mail: nata@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 130

Abstract. The paper presents an algorithm of computational experiment on the example of the implementation of one of the threats to energy security "Lack of investment in the energy sector" using cognitive and economic-mathematical models. The features of the inclusion of the investment component in the model of optimization of options for the development of the fuel and energy complex, taking into account energy security, are considered. A cognitive model for analyzing the threat "Lack of investment in the energy sector" is presented. The description of PC INTEC-A, which provides the ability to integrate cognitive and mathematical models, is given.

Keywords: computational experiment, energy security, threats to energy security, economic and mathematical model, cognitive modeling.

REFERENCES

1. Bushuev V.V., Voropai N.I., Mastepanov A.M., Shafranik Yu.K. Jenergeticheskaja bezopasnost' Rossii [Energy security of Russia]. Novosibirsk: Nauka. Sib. izdatel'skaja firma RAN= Novosibirsk: Science. Sib. publishing company RAS. 1999. 439p. (in Russian)

2. Pyatkova N.I., Rabchuk V.I., Senderov S.M. Jenergeticheskaja bezopasnost' Rossii: problemy i puti reshenija [Energy security of Russia: problems and solutions]. Novosibirsk: Nauka = Novosibirsk: Science. 2011. 211p. (in Russian)
3. Senderov S.M., Rabchuk V.I., Pyatkova N.I., Vorobiev S.V. Obespechenie jenergeticheskoy bezopasnosti Rossii: vybor prioritetov [Ensuring the energy security of Russia: the choice of priorities]. Ros. akad. Nauk. Sib. Otdelenie. Institut sistem jenergetiki im. L.A. Melent'eva. Novosibirsk: Nauka = Novosibirsk: Science. 2017. 116 p. (in Russian)
4. Pyatkova N., Krupenev D. Methodical aspects of the energy industries interconnected operation modeling at the energy security research under modern conditions E3S Web of Conferences 209, 06001 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020906016>.
5. Itogi raboty Minjenergo Rossii i osnovnye rezul'taty funkcionirovaniya TJeK v 2018 godu Zadachi na srednesrochnuju perspektivu [Results of the work of the Ministry of Energy of Russia and the main results of the functioning of the fuel and energy complex in 2018. Medium-term tasks.]. Available at: https://minenergo.gov.ru/prezentaciya_kollegiya_2019.pdf (accessed 15.09.2021) (in Russian)
6. Itogi raboty Minjenergo Rossii i osnovnye rezul'taty funkcionirovaniya TJEK v 2012–2017 gg [Results of the work of the Ministry of Energy of Russia and the main results of the functioning of the fuel and energy complex in 2012–2017]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/11279/82618> (accessed 15.09.2021) (in Russian)
7. Vavina E. 20 let jelektrojenergetiki v Rossii – ot RAO «EJeS Rossii» do liberalizacii rynka. Rossijskaja jekonomika 1999–2019. Specproekt «Vedomostej» i «Jekspert RA» [20 years of the power industry in Russia - from RAO UES of Russia to market liberalization. Russian economy 1999–2019. Special project "Vedomosti" and "Expert RA"]. 09.12.2019 *Statements* = *Vedomosti*. Available at: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2019/12/10/818261-20-elektroenergetiki> (accessed 15.09.2021) (in Russian)
8. Kozlov M.V., Malashenko Yu. E., Nazarova I.A., Novikova N.M. Upravlenie toplivno-jenergeticheskoy sistemoj pri krupnomasshtabnyh povrezhdenijah. Setevaja model' i programmaja realizacija [Fuel and energy system management in case of large-scale damage. Network model and software implementation.]. *Teorija i sistemy upravlenija*= *Theory and control systems*. *Izv. RAN*= *News RAS*. 2017. № 6. Pp. 50-73. (in Russian)
9. Malashenko Yu. E., Nazarova I.A., Novikova N.M. Upravlenie toplivno-jenergeticheskoy sistemoj pri krupnomasshtabnyh povrezhdenijah. Postanovki zadach optimizacii [Fuel and energy system management in case of large-scale damage. Optimization problem statement]. *Izv. RAN. Teorija i sistemy upravlenija* = *News RAS. Theory and control systems*. 2018. № 2. Pp. 39-51. (in Russian)
10. Malashenko Yu. E., Nazarova I.A., Novikova N.M. Metod analiza funkcional'noj ujazvimosti potokovyh setevykh sistem [A method for analyzing the functional vulnerability of streaming network systems]. *Informatika i ee primenenija* = *Informatics and its applications*. 2017. Vol.11. Issue 4. 2017. Pp. 47-54. (in Russian)
11. Malashenko Yu. E., Nazarova I.A., Novikova N.M. Diagrammy ujazvimosti potokovyh setevykh sistem [Vulnerability diagrams of streaming network systems]. *Informatika i ee primenenija*= *Informatics and its applications*. 2018. Vol. 12. Issue 1. Pp. 11-17. (in Russian)
12. Grebenyuk G.G., Nikishov S.M. Blokirovanie jenergo- i resursosnabzhenija celevykh obektov v setevykh infrastrukturah [Blocking of energy and resource supply of target objects in network infrastructures] // *Control sciences*. 2016. № 4. Pp. 52-57. (in Russian)
13. Seebregts Ad J., Goldstein Gary A., Smekens Koen Energy/Environmental Modeling with

- the MARKAL Family of Models [Electronic resource] Proc. Int. Conf. on Operations Research (OR 2001), Energy and Environment Session, September 3-5, 2001. Duisburg, Germany. Available at: <ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/report/2001/rx01039.pdf> (accessed 01.09.2021).
14. MARKAL IEA-ETSAP: The Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP). 2011. Available at: <http://www.iea-etsap.org/web/Markal.asp> (accessed 22.08.2021).
 15. MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact) International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) [Laxenburg, Austria]. Available at: <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/Energy/MESSAGE.en.html> (accessed 15.09.2021).
 16. Fedorova E. V., Zorina T.G. Modelirovanie mezhhregional'nogo jenergoobmena s pomoshh'ju programmy MESSAGE [Modeling of interregional energy exchange using the MESSAGE program]. *Jadernaja jenergetika= Nuclear energy*. 2004. №. 4. Pp. 3-11 (in Russian)
 17. The National Energy Modeling System: An Overview 2009. Available at: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/overview/index.html> (accessed 15.09.2021).
 18. Massel A. G. Metodologicheskij podhod k organizacii intellektual'noj podderzhki issledovanij problemy jenergeticheskoy bezopasnosti [Methodological approach to the organization of intellectual support for research on the problem of energy security] // *Informacionnye tehnologii. = Information Technology*. 2010. № 9. Pp. 32-36. (in Russian)
 19. Pyatkova N.I., Massel A.G. Kognitivnoe modelirovanie v issledovanijah jenergeticheskoy bezopasnosti: perehod k dinamicheskim kognitivnym kartam [Cognitive Modeling in Energy Security Research: Moving to Dynamic Cognitive Maps] // *Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii= Information and Mathematical Technologies in Science and Management*. 2020. № 4 (20). Pp. 24-33 (in Russian)
 20. Arshinskij V.L., Massel' A.G., Fartyshev D.A. Mul'tiagentnyj programmnyj kompleks dlja issledovanij problemy jenergeticheskoy bezopasnosti [A multi-agent software package for researching the problem of energy security] // *Trudy XIV Bajkal'skoj Vserossijskoj konferencii «Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii»= Proceedings of the XIV Baikal All-Russian Conference "Information and Mathematical Technologies in Science and Management"*. Volume 3. Irkutsk: MESI SB RAS. 2009. Pp. 283-289. (in Russian)
 21. Fartyshev D.A. Razrabotka mnogoagentnogo PK INTEK-M dlja issledovanij problemy jenergeticheskoy bezopasnosti [Development of a multi-agent PC INTEK-M for researching the problem of energy security] // *Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems*. № 3. 2010. Pp. 126-129. (in Russian)
 22. Massel L.V., Massel A.G., Pesterev D.V. Tehnologija upravljenija znanijami s ispol'zovaniem ontologij, kognitivnyh modelej i produkcionnyh jekspertnyh sistem [Knowledge management technology using ontologies, cognitive models and production expert systems]. *Izvestija JuFU. Tehniceskie nauki= News SFU Technical science*. №4. 2019. Pp. 140-152 (in Russian)

Статья поступила в редакцию 20.09.2021; одобрена после рецензирования 18.10.2021; принята к публикации 22.10.2021.

The article was submitted 20.09.2021; approved after reviewing 18.10.2021; accepted for publication 22.10.2021.