

УДК 004.8:620.9

DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.006

## Интеграция математического и когнитивного моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК с позиции энергетической безопасности

Массель Алексей Геннадьевич, Мамедов Тимур Габирович

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
Россия, Иркутск, [amassel@isem.irk.ru](mailto:amassel@isem.irk.ru)

**Аннотация.** В статье рассматривается методика интеграции когнитивного и математического моделирования для анализа направлений развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) с позиции энергетической безопасности. Предлагаемый подход позволяет формализовать и автоматизировать процесс перехода от качественного анализа угроз и мер противодействия им к количественной оценке их влияния на ТЭК с помощью оптимизационных моделей. В основе методики лежит использование онтологий для структуризации знаний предметной области, построение когнитивных карт для визуализации причинно-следственных связей и разработка реляционных баз данных для интеграции семантических и математических моделей. Применение данного подхода демонстрируется на примере вычислительного эксперимента, включающего моделирование угроз и оценку эффективности стратегий обеспечения энергетической безопасности. Результаты исследования могут быть использованы для принятия управленческих решений в условиях неопределённости и кризисных сценариев.

**Ключевые слова:** когнитивное моделирование, энергетическая безопасность, топливно-энергетический комплекс, онтологии, вычислительный эксперимент, оптимизационные модели.

**Цитирование:** Массель А.Г. Интеграция математического и когнитивного моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК с позиции энергетической безопасности / А.Г. Массель, Т.Г. Мамедов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3(39). – С. 61-71. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.006.

**Введение.** Современный топливно-энергетический комплекс (ТЭК) представляет собой сложную систему, функционирование которой подвержено множеству внутренних и внешних угроз. В условиях глобальной нестабильности и возрастающих рисков обеспечение энергетической безопасности (ЭБ) становится ключевой задачей государственной политики [1]. Для анализа таких сложных систем с высокой степенью неопределённости применяется когнитивное моделирование, позволяющее формализовать причинно-следственные связи между факторами и разрабатывать стратегии управления в условиях возмущений [2].

Когнитивные карты, представляющие собой ориентированные графы, широко используются для визуализации взаимосвязей между элементами системы [3, 4]. Однако для количественной оценки последствий реализации угроз и эффективности мер противодействия требуется интеграция когнитивных методов с методами математического моделирования. В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН) для этих целей применяется программный комплекс ИНТЭК, основанный на использовании оптимизационных моделей балансов топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Однако существующие модели не учитывают угрозы и мероприятия напрямую, что затрудняет анализ сценариев развития ТЭК в условиях кризисных ситуаций.

Целью данной работы является разработка методики интеграции семантического (когнитивного) и математического моделирования для исследования направлений развития ТЭК с учётом угроз энергетической безопасности. Основные задачи заключаются в формализации и структурировании предметной области за счет построения онтологий для ТЭК и угроз его функционированию; разработке когнитивных карт, связывающих качественные и количественные аспекты моделирования и формализации данных с помощью реляционных баз данных, и затем, проведении вычислительных экспериментов для оценки устойчивости ТЭК в различных сценариях.

Предлагаемый подход позволяет автоматизировать переход от качественного анализа к количественным расчётам, что снижает нагрузку на экспертов и ускоряет процесс принятия решений. В работе представлены алгоритмы формирования семантических моделей, методика проведения вычислительных экспериментов и примеры применения подхода для анализа конкретных угроз на примере выхода из строя части газопровода.

**Исследования направлений развития ТЭК с позиции ЭБ.** Исследованиями ТЭК в условиях возмущений занимается отдел энергетической безопасности ИСЭМ СО РАН. Основная цель исследований в сфере энергетической безопасности государства заключается в научно обоснованном выборе приоритетных направлений, обеспечивающих стабильное и долгосрочное снабжение потребителей всеми необходимыми видами топливно-энергетических ресурсов [5]. Предлагаемые меры должны быть универсальными и эффективными в условиях различных негативных сценариев в экономике и энергетике. Кроме того, особое внимание уделяется разработке решений, гарантирующих бесперебойное энергоснабжение в чрезвычайных ситуациях.

В рамках этих исследований решаются следующие задачи: выявление возможных угроз и моделирование на их основе возмущающих сценариев, анализ состояния ТЭК при их реализации, выявление узких мест в энергоснабжении, оценка эффективности мер по их устранению и отбор наиболее надёжных стратегий обеспечения энергетической безопасности [6].

Из-за масштабности и сложности ТЭК невозможно проводить полноценные натурные эксперименты. Поэтому для изучения устойчивости и функционирования системы при различных условиях проводится серия вычислительных экспериментов. Их результаты служат основой для выбора оптимальных решений в управлении и планировании развития ТЭК.

Вычислительный эксперимент – это метод анализа технических систем и физических процессов с помощью математического моделирования и программной реализации математических моделей. Он предполагает создание модели, адекватно отражающей объект, и её численное исследование, что позволяет имитировать поведение системы при разных условиях. Здесь роль экспериментальной установки выполняет программный комплекс, а не физический объект, что повышает требования к качеству программного обеспечения, применяемого в научных исследованиях.

Одним из инструментов автоматизации выполнения вычислительного эксперимента является программный комплекс (ПК) ИНТЭК. Комплекс предназначен для анализа различных сценариев развития ТЭК с учётом угроз энергетической безопасности и помогает формировать стратегические решения, направленные на их предупреждение или снижение последствий. В конце 90-х гг. прошлого века новая версия ИНТЭК, с учетом предыдущих разработок, была создана А.Р. Ершовым [7], архитектуру «клиент-сервер» реализовал Е.А. Болдырев [8], следующую мультиагентную версию ИНТЭК-М разработал Д.А. Фартышев [9–11]. Последнюю версию ПК ИНТЭК-SAW разработал Мамедов Т.Г. под руководством А.Г.

ПК ИНТЭК-SAW использует для расчётов модель оптимизации балансов ТЭР по России [12], в математическом смысле при помощи которой решается классическая задача линейного программирования. Модель описывается системой линейных уравнений и целевой функцией минимизации суммы приведенных затрат и потерь от дефицита топливно-энергетических ресурсов среди потребителей. В содержательном смысле описывается территориально-производственная модель ТЭК с блоками электроэнергетики, тепло-, газо- и углеснабжения, а также нефтепереработки – мазутоснабжения.

Для описания экономико-математической модели экспертами-энергетиками была принята система обозначений переменных и уравнений [13], которая сохранена в последней версии. Название переменной (TRV) состоит из 7 символов (XXXYYZZ), где XXX-код

объекта (или группы объектов) добычи, производства, транспорта, переработки, и потребления энергоресурсов, YY – код района, ZZ – код технологии, используемой на определенном объекте в определённом районе. Название ограничения (IR) содержит 5 символов (QQQYY), где QQQ – код энергетического ресурса, YY – код района

Модель не описывает угрозы развитию ТЭК или мероприятия по компенсации реализации угроз, но может отразить их последствия при помощи изменений параметров факторов ТЭК, описанных в модели. Следовательно, для описания угроз и мероприятий можно ввести дополнительные сущности, которые можно связать с параметрами модели и установить между ними функциональную зависимость и, таким образом, сформировать базу знаний для исследований. Для достижения этой цели предлагается интегрировать семантическое и математическое моделирование для модификации моделей с использованием когнитивных карт и визуализации результатов расчетов с их помощью.

**Методика интеграции когнитивного и математического моделирования.** Для интеграции семантического и математического моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК была разработана методика, которая включает следующие этапы:

- построение онтологий для структуризации знаний предметной области и их использование в качестве компонентов когнитивной карты, отражающих наличие связей между факторами модели ТЭК;
- построение когнитивных карт исследования развития ТЭК, используемых в качестве интерфейса для формирования вычислительного сценария и инструмента интерпретации результатов оптимизации сценария;
- определение множества реляционных отношений для интеграции семантических и математических моделей;
- проведение вычислительного эксперимента.

Каждый этап состоит из нескольких шагов и подробно описан ниже.

#### **Этап 1. Построение онтологий и когнитивных карт.**

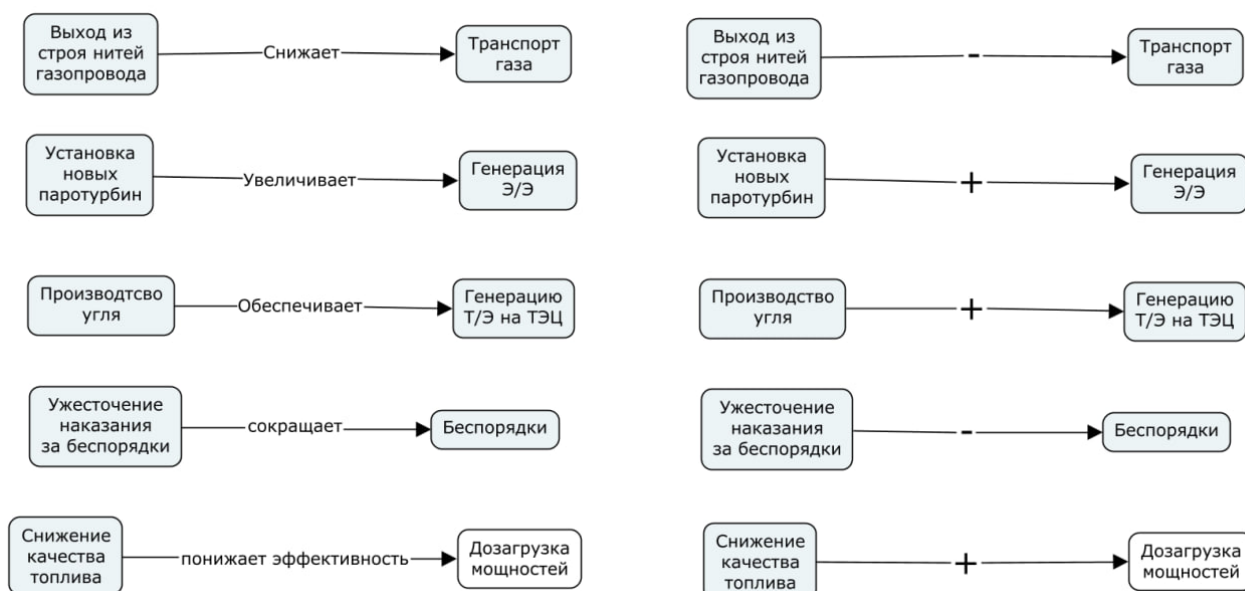
Для интеграции когнитивного и математического моделирования требуется выбрать концепт для каждого элемента технико-экономической модели, также можно определить концепт для группы элементов технико-экономической модели. Концепты когнитивной карты делятся на 2 вида: концепты, характеризующие элементы технико-экономической модели, и концепты, характеризующие факторы угроз и мероприятий. После получения множества концептов требуется установить связи между концептами и значения связей.

##### **Шаг 1. Построение онтологий.**

Для перехода от технико-экономической модели к когнитивным картам предлагается использовать онтологии. При помощи онтологии описываются связи между элементами технико-экономической модели. Для этого в онтологиях используются триплеты.

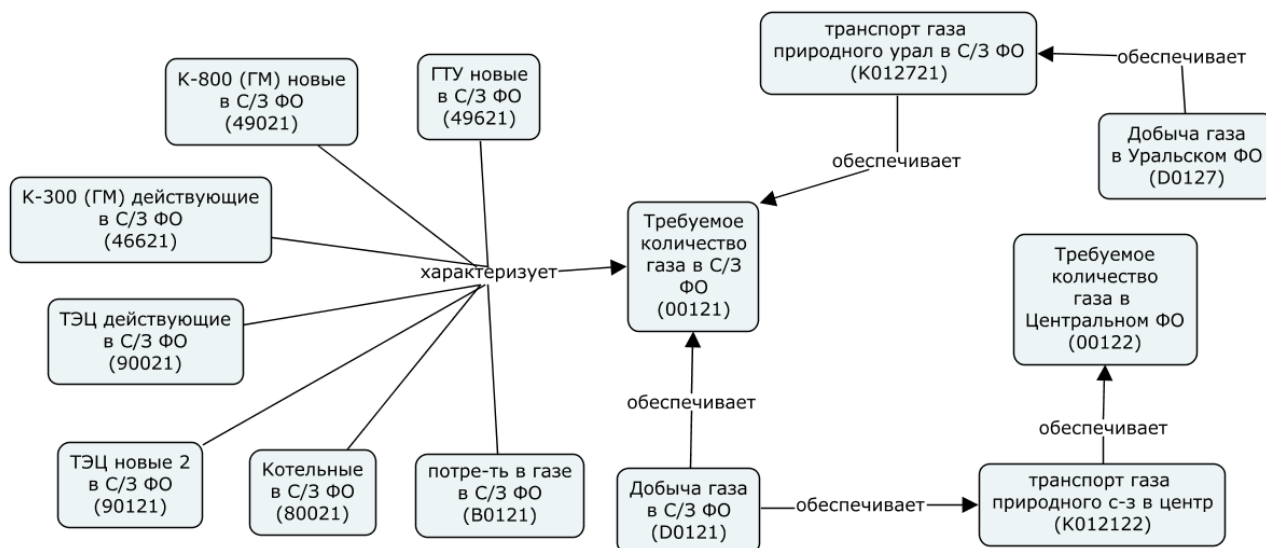
В ходе работы были выделены следующие типы триплетов онтологий и когнитивных карт: угроза – предикат – объект; угроза – предикат – мероприятие; мероприятие – предикат – объект; мероприятие – предикат – угроза; объект – предикат – объект. Основные предикаты, которые были выделены в ходе работы: снижение, увеличение, обеспечение, сокращение и др., что, в свою очередь, соответствует предикатам в когнитивной карте.

На рисунке 1 приведены примеры для каждого типа триплета онтологии и триплета когнитивной карты.



**Рис. 1.** Типы триплетов для онтологий и когнитивных карт

Также в ходе работы были построены онтология технико-экономической модели ТЭК. На рисунке 2 представлен фрагмент онтологии в графическом виде, где каждому концепту соответствуют уравнение или переменная в технико-экономической модели.



**Рис. 2.** Фрагмент онтологии связей между элементами технико-экономической модели

Все триплеты хранятся в виде таблиц, пример описания триплета онтологии приводится в таблице 1.

**Таблица 1.** Описание триплета онтологии

|                         |                                    |
|-------------------------|------------------------------------|
| Наименование концепта А | К-800 (ГМ) новые в С/З ФО          |
| Тип элемента А          | Уравнение (IR)                     |
| Код элемента А          | 49021                              |
| Наименование концепта Б | Требуемое количество газа в С/З ФО |
| Тип элемента Б          | Уравнение (IR)                     |
| Код элемента Б          | 00121                              |
| Значение связи          | «Обеспечивает»                     |

**Шаг 2. Построение когнитивных карт.**

Полученная онтология будет использоваться для построения когнитивной карты, а именно, для построения триплетов, описывающих взаимосвязь между элементами технико-экономической модели. Для добавления в когнитивную карту угроз/мероприятий требуется описать триплет когнитивной карты следующим образом: название угрозы/мероприятия; тип элемента технико-экономической модели, на который будет влиять угроза/мероприятие; код элемента; параметр элемента; тип связи; значение связи. Параметры элементов технико-экономической модели, на которые может влиять угроза/мероприятие, отображены в табл. 2.

**Таблица 2.** Описание элементов модели

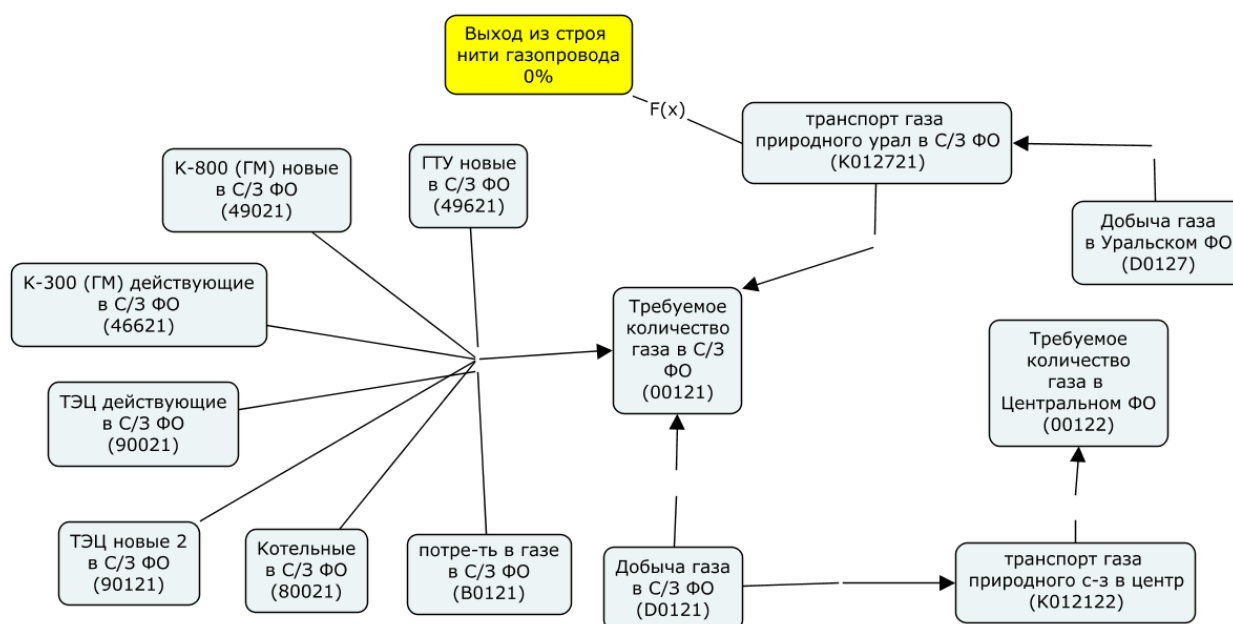
| Тип элемента модели | Параметр элемента                    |
|---------------------|--------------------------------------|
| Переменная (TRV)    | Верхнее ограничение                  |
|                     | Нижнее ограничение                   |
|                     | Коэффициент при целевой функции      |
| Уравнение (IR)      | Верхнее ограничение                  |
|                     | Нижнее ограничение                   |
|                     | Коэффициент переменной в неравенстве |

Далее составляется триплет когнитивной карты для конкретной угрозы. В качестве иллюстрационного примера взята угроза «Выход из строя нити газопровода». Описание триплета представлено в таблице 3.

**Таблица 3.** Описание триплета угрозы «Выход из строя нити газопровода»

|                     |                                 |
|---------------------|---------------------------------|
| Наименование угрозы | Выход из строя нити газопровода |
| Тип элемента        | Переменная (TRV)                |
| Код элемента        | K012721                         |
| Параметр элемента   | Верхнее ограничение             |
| Тип связи           | Функция                         |
| Значение связи      | $Y=F(x)$                        |

После описания триплета угрозы на когнитивной карте появляется соответствующий концепт, через корректировку значения которого будет меняться верхнее ограничение переменной, характеризующей транспорт газа, следовательно, после расчёта решателем будут получены новые оптимальные значения. Результаты расчётов отражаются на когнитивной карте (рисунок 3).

**Рис. 3.** Когнитивная карта угрозы «Выход из строя нити газопровода»

### Шаг 3. Определение множества реляционных отношений.

Далее необходимо определить множества реляционных отношений. Предлагается формализовать данные, используемые для исследования, с помощью реляционных баз данных, и разработать алгоритмы обработки этих данных. Выделенные множества реляционных отношений описаны в нотации Чена, которая представлена на рисунке 4. В соответствии с полученной нотацией Чена были выделены следующие отношения (таблицы в реляционной БД):

- **Отношение «Переменные»** хранит наименование переменной, ее верхнего и нижнего ограничения, а также оптимальное значение, полученное после расчёта модели, и коэффициент при целевой функции.
- **Отношение «Уравнения»** хранит наименование уравнений и значения верхних и нижних ограничений.
- **Отношение «Модели»** хранит наименование моделей и данные о расчёте: была рассчитана модель или нет, было найдено оптимальное решение или нет; также хранит тип целевой функции(максимум/минимум) и текстовое описание модели.
- **Отношение «Сценарии»** хранит наименование и описание вычислительного сценария
- **Отношение «Элементы модели»** хранит информацию об элементах модели, используется как связывающее отношения между семантическими моделями и технико-экономической моделью.
- **Отношение «Триплеты онтологий»** хранит триплеты, описывающие взаимосвязи между элементами технико-экономической модели.
- **Отношение «Триплеты когнитивных карт»** хранит триплеты, описывающие влияние угроз и мероприятий на элементы технико-экономической модели.

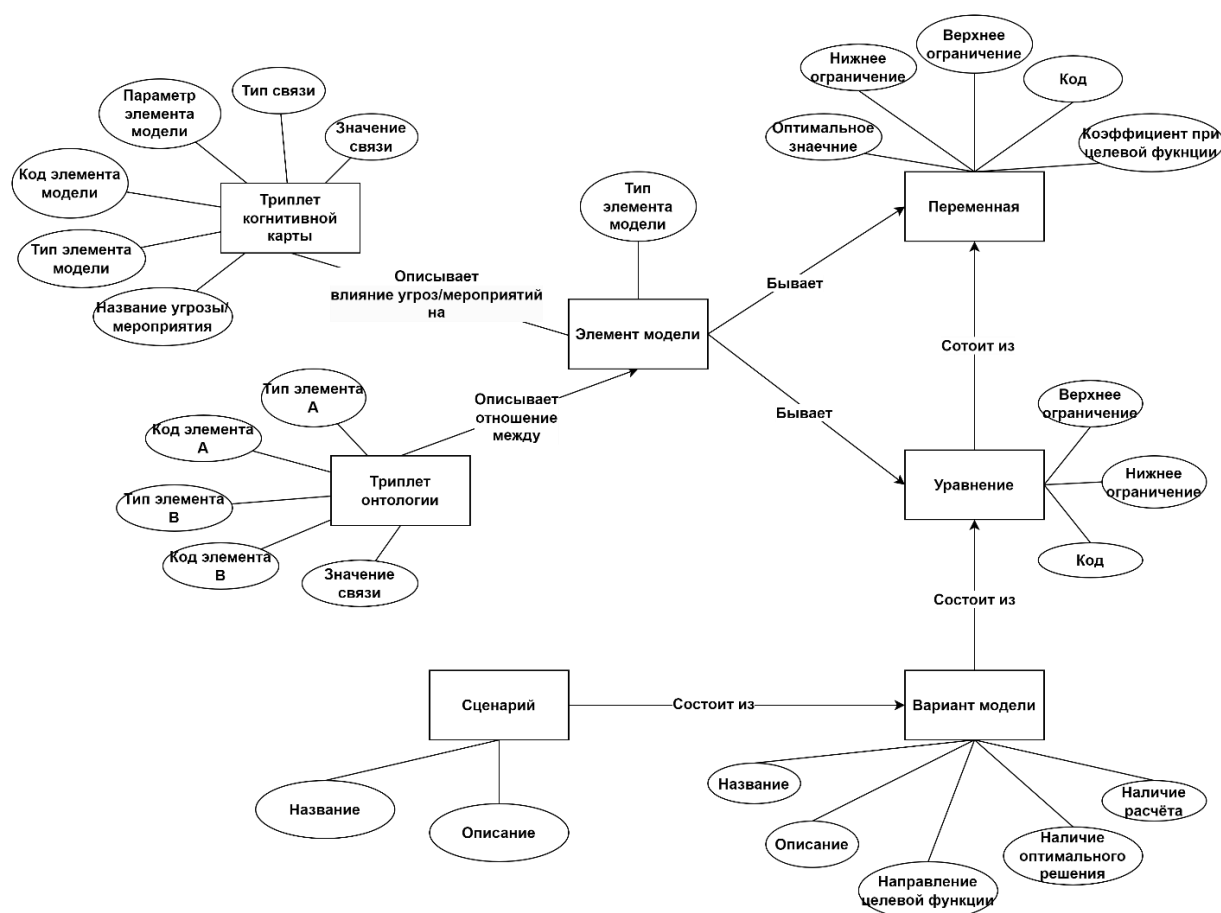


Рис. 4. Множество реляционных отношений в нотации Чена

## **Этап 2. Формирование и реализация вычислительного сценария исследований.**

Этап включает в себя построение базового варианта и вариантов развития ТЭК с угрозами и мероприятиями, их расчёта и интерпретации с использованием семантических моделей.

Для формирования вычислительного сценария определяются: базовый вариант модели, угрозы и мероприятия, индикаторы оценки эффективности выбранной стратегии развития в условиях возмущений.

### **Шаг 1. Построение базового варианта модели.**

Для построения базового варианта модели из сформированного ранее отношения онтологий выберем онтологию, описывающую требуемый для исследования фрагмент технико-экономической модели ТЭК. Исследователь выбирает район(ы), которым в программе присвоены определенные коды. По этим кодам из отношения онтологий выбираются советуемые концепты и устанавливаются связи, также описанные в этом отношении.

На текущем шаге определяются угрозы и мероприятия, и их исходные значения, которые характеризуют **базовые значения угрозы**. Базовые значения угрозы – это значения угрозы, которые исследователь указывает в исходном варианте модели вычислительного сценария. Из отношения угроз и мероприятий исследователю предоставляется список угроз и мероприятий, связи которых установлены с теми элементами модели, которые представлены онтологией на предыдущем шаге. Это сопоставление выполняется по кодам элементов моделей (переменные, уравнения).

Выполняем поиск оптимального решения базового варианта. Для концептов онтологий рассчитываются и устанавливаются значения. На следующем шаге формируются варианты развития с угрозами и мероприятиями.

### **Шаг 2. Внесение корректировок в модель.**

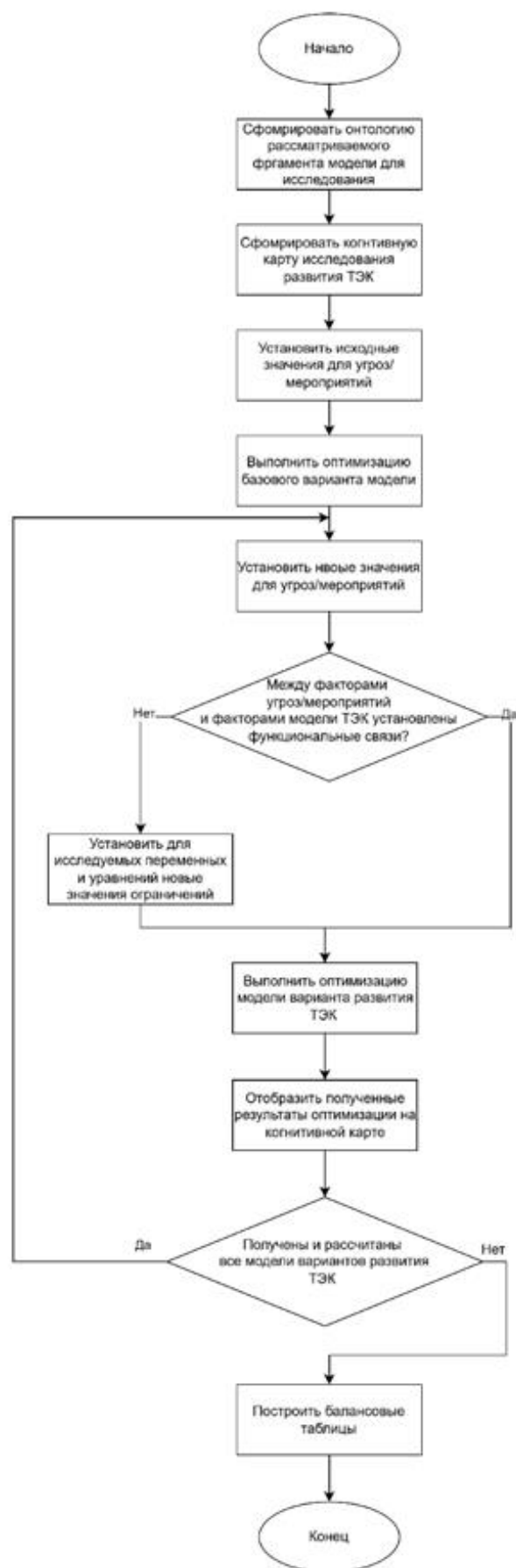
Для формирования вариантов развития ТЭК в условиях возмущений необходимо установить новые значения для концептов угроз и выполнить расчеты.

Если для угроз установлены функциональные зависимости для описания причинно-следственной связи, тогда для проведения расчётов достаточно установить для концептов угроз новые значения и выполнить расчёт.

Если для угроз для описания причинно-следственных связей установлены знаки, веса, пустые связи и прочее, тогда исследователю требуется самостоятельно установить значение параметров для элемента, с которым связана угроза, и выполнить расчёт.

Результаты расчёта будут показаны на когнитивной карте. Точно таким же образом выполняются построение и расчёт для варианта модели с мероприятиями. Продолжаем повторять этот шаг до тех пор, пока не будет построен целиком вычислительный сценарий.

После проведения всех расчетов есть возможность построения балансовых таблиц и внесение значений в когнитивную карту. На рисунке 5 приводится алгоритм, реализующий методику интеграции семантического и математического моделирования для проведения вычислительного эксперимента.



**Рис. 5.** Алгоритм интеграции семантических и математических моделей и проведения вычислительного эксперимента

**Заключение.** В статье предложена методика интеграции когнитивного и математического моделирования для анализа направлений развития ТЭК с учетом угроз энергетической безопасности. Разработанный подход позволяет формализовать сложные взаимосвязи между факторами ТЭК, угрозами и мерами противодействия им, обеспечивая переход от качественного анализа к количественным оценкам с использованием оптимизационных моделей.

За счет предложенного подхода решаются следующие задачи:

- Структуризация знаний. Построенные онтологии позволяют систематизировать данные о технико-экономической модели ТЭК, угрозах и мероприятиях. Использование триплетов обеспечивает гибкость в описании причинно-следственных связей.
- Визуализация и анализ угроз ЭБ. Когнитивные карты являются интерфейсом для формирования вычислительных сценариев и интерпретации результатов моделирования. На примере угрозы «Выход из строя нити газопровода» продемонстрирована возможность оценки влияния возмущений на параметры ТЭК.
- Интеграция моделей. Предложенная реляционная база данных объединяет семантические и математические модели, упрощает обработку данных и автоматизацию вычислительных экспериментов.

Таким образом, предложенный подход позволяет существенно повысить эффективность анализа энергетической безопасности за счет сочетания когнитивного и математического моделирования, обеспечивая научно обоснованное принятие решений в условиях нестабильности.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0007) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.

#### Список источников

1. Энергостратегия. – URL: <https://minenergo.gov.ru> (дата обращения: 18.08.2025).
2. Массель А.Г. Методологический подход к организации интеллектуальной поддержки исследований проблемы энергетической безопасности / А.Г. Массель // Информационные технологии, 2010. – № 9. – С. 32-36.
3. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений: Научно-практическое издание. Серия «Информатизация России на пороге XXI века» / Э.А. Трахтенгерц. – М.: СИНТЕГ, 1998. – 376 с.
4. Axelrod R. Structure of decision: The cognitive maps of political elites. Princeton University Press, 1976, 405 p.
5. Воропай Н.И. Энергетическая безопасность. Термины и определения / Н.И. Воропай. – М., 2005. – 53 с.
6. Энергетическая безопасность России (введение в проблему): СЭИ СО РАН / рук. Воропай Н.И., Клименко С.М., Криворучий Л.Д., Массель Л.В. – Иркутск, 1997.
7. Массель Л.В. Инструментальные средства поддержки решений по обеспечению энергетической безопасности / Л.В. Массель, Н.Н. Макагонова, А.Р. Ершов // Методические вопросы исследований надежности больших систем энергетики. – Спб., 1997. – Т. 49. – С. 492-503.
8. Болдырев Е.А. Моделирование программного обеспечения на примере программного комплекса для исследований проблемы энергетической безопасности / Е.А. Болдырев // Информационные технологии в науке, технике и образовании. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2002. – С. 40-45.
9. Аршинский В.Л. Мультиагентный программный комплекс для исследований проблемы энергетической безопасности / В.Л. Аршинский, А.Г. Массель, Д.А. Фартышев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2009. – Т. 3. – С. 283-289.
10. Фартышев Д.А. Методика построения и разработка многоагентного программного комплекса для исследований проблемы энергетической безопасности / Д.А. Фартышев // Программные продукты и системы. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2010.
11. Фартышев Д.А. Разработка многоагентного ПК ИНТЭК-М для исследований проблемы энергетической безопасности / Д.А. Фартышев // Программные продукты и системы, 2010. – № 3. – С. 126-129.
12. Макаров А.А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства / А.А. Макаров, Л.А. Мелентьев. – Новосибирск: Наука, 1973. – 273 с.

13. Массель А.Г. Адаптация методики реинжиниринга унаследованных программных систем / А.Г. Массель, Т.Г. Мамедов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – № 4 (24). – С. 88-99.

**Массель Алексей Геннадьевич.** Кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. AuthorID: 173012, SPIN:2940-2510, Scopus AuthorID: 57220804764, ORCID: 0000-0002-0351-0415, amassel@gmail.com, Россия, Иркутск, Лермонтова, д.130.

**Мамедов Тимур Габирович.** Инженер-исследователь, аспирант отдела Систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН. AuthorID: 1040958, SPIN: 2011-2120, Scopus AuthorID: 58026460700, ORCID: 0000-0002-3396-5074, mamedowtimur@yandex.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова, д.130.

---

UDC 004.8:620.9

DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.006

## **Integration of mathematical and cognitive modeling in research on the development of the fuel and energy complex from the perspective of energy security**

**Aleksei G. Massel, Timur G. Mamedov**

Melentiev energy systems institute SB RAS,  
Russia, Irkutsk, amassel@isem.irk.ru

**Abstract.** The article discusses the methodology of integrating cognitive and mathematical modeling to analyze the directions of development of the fuel and energy complex (fuel and energy complex) from the perspective of energy security. The proposed approach makes it possible to formalize and automate the process of transition from a qualitative analysis of threats and countermeasures to a quantitative assessment of their impact on the fuel and energy sector using optimization models. The methodology is based on the use of ontologies to structure domain knowledge, the construction of cognitive maps to visualize cause-and-effect relationships, and the development of relational databases to integrate semantic and mathematical models. The application of this approach is demonstrated by the example of a computational experiment involving threat modeling and evaluation of the effectiveness of energy security strategies. The results of the study can be used to make managerial decisions in conditions of uncertainty and crisis scenarios.

**Keywords:** cognitive modeling, energy security, fuel and energy complex, ontologies, computational experiment, optimization models

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the draft state assignment (no. FWEU-2021-0007) of the fundamental research program of the Russian Federation for 2021-2030.

### **References**

1. Energostrategiya [Energy Strategy], available at: <https://minenergo.gov.ru> (accessed: 08/18/2025).
2. Massel A.G. Metodologicheskii podkhod k organizatsii intellektual'noy podderzhki issledovaniy problemy energeticheskoy bezopasnosti [Methodological approach to organizing intelligent support for energy security research]. Informatsionnyye tekhnologii [Information technologies], 2010, no. 9, pp. 32-36.
3. Trakhtengerts E.A. Komp'yuternaya podderzhka prinyatiya resheniy: Nauchno-prakticheskoye izdaniye. Seriya "Informatizatsiya Rossii na poroge XXI veka" [Computer decision support: Scientific and practical publication. Series "Informatization of Russia on the Threshold of the 21st Century"]. Moscow, SINTEG Publ., 1998, 376 p.
4. Axelrod R. Structure of decision: The cognitive maps of political elites. Princeton University Press, 1976, 405 p.
5. Voropay N.I. Energeticheskaya bezopasnost'. Terminy i opredeleniya [Energy security. Terms and definitions]. Moscow, 2005, 53 p.
6. Energeticheskaya bezopasnost' Rossii (vvedeniye v problemu): SEI SO RAN [Energy Security of Russia (Introduction to the Problem): ESI SB RAS]. Head N.I. Voropay, S.M. Klimenko, L.D. Krivorutskiy, L.V. Massel. Irkutsk, 1997.

7. Massel L.V., Makagonova N.N., Yershov A.R. Instrumental'nyye sredstva podderzhki resheniy po obespecheniyu energeticheskoy bezopasnosti [Instrumental means of decision support for ensuring energy security]. Metodicheskiye voprosy issledovaniy nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki [methodological issues of reliability research of large energy systems], St. Petersburg, 1997, vol. 49, pp. 492-503.
8. Boldyrev E.A. Modelirovaniye programmnoy obespecheniya na primere programmnoy kompleksa dlya issledovaniy problemy energeticheskoy bezopasnosti [Software modeling using the example of a software complex for energy security research]. Informatsionnyye tekhnologii v nauke, tekhnike i obrazovanii [Information technologies in science, engineering and education], Irkutsk, ISEM SB RAS, 2002, pp. 40-45.
9. Arshinskiy V.L., Massel A.G., Fartyshev D.A. Mul'tiagentnyy programmnyy kompleks dlya issledovaniy problemy energeticheskoy bezopasnosti [Multi-agent software complex for energy security research]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], Irkutsk, ISEM SB RAS, 2009, vol. 3, pp. 283-289.
10. Fartyshev D.A. Metodika postroyeniya i razrabotka mnogoagentnogo programmnoy kompleksa dlya issledovaniy problemy energeticheskoy bezopasnosti [Methodology for building and developing a multi-agent software complex for energy security research]. Programmnyye produkty i sistemy [Software products and systems] Irkutsk, ISEM SB RAS, 2010.
11. Fartyshev D.A. Razrabotka mnogoagentnogo PK INTÉK-M dlya issledovaniy problemy energeticheskoy bezopasnosti [Development of the multi-agent software complex INTÉK-M for energy security research]. Programmnyye produkty i sistemy [Software & Systems], 2010, no. 3, pp. 126-129.
12. Makarov A.A., Melentyev L.A. Metody issledovaniya i optimizatsii energeticheskogo khozyaystva [Methods for research and optimization of the energy economy]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1973, 273 p.
13. Massel A.G., Mamedov T.G. Adaptatsiya metodiki reinzhiniringa unasledovannykh programmnykh sistem [Adaptation of the legacy software systems reengineering methodology]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no. 4 (24).

**Massel Aleksei Gennadievich.** Ph. D, Senior Research Fellow of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. AuthorID: 173012, SPIN: 2940-2510, Scopus AuthorID: 57220804764, ORCID: 0000-0002-0351-0415, amassel@gmail.com. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.

**Mamedov Timur Gabilovich.** Research engineer, postgraduate of the Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. AuthorID: 1040958, SPIN: 2011-2120, Scopus AuthorID: 58026460700, ORCID: 0000-0002-3396-5074, mamedowtymur@yandex.ru. Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.

Статья поступила в редакцию 21.08.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 25.08.2025.

The article was submitted 08/21/2025; approved after reviewing 08/25/2025; accepted for publication 08/25/2025.