

ИНТЕГРАЦИЯ СЕМАНТИЧЕСКОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОБЛЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

А. Г. Массель¹ [0000-0002-0351-0415], Т. Г. Мамедов² [0000-0002-3396-5074]

^{1, 2}*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН, г. Иркутск, Россия*

¹amassel@gmail.com, ²mamedowtymur@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрена задача интеграции когнитивного и математического моделирования в исследованиях направлений развития топливно-энергетического комплекса с учетом требований энергетической безопасности. Актуальность работы обусловлена тем, что в существующей двухуровневой технологии исследований переход от результатов качественного анализа с помощью когнитивного моделирования к параметрам математической модели в значительной степени выполняется вручную, что снижает воспроизводимость численных экспериментов и ограничивает эффективность использования накопленных знаний. Цель проведенного исследования состояла в разработке программного компонента, обеспечивающего совместное использование когнитивной и математической моделей в составе Экосистемы знаний в энергетике. Предложен программный компонент, реализованный в составе комплекса ИНТЭК-SAW и обеспечивающий преобразование изменений когнитивной модели в параметры экономико-математической модели, а также обратную интерпретацию результатов расчетов. Разработана технология проведения численного эксперимента, включающая построение семантических (онтологической и когнитивной) моделей, формирование вычислительного сценария, выполнение оптимизационных расчетов и представление результатов, отличающаяся автоматизацией совместного использования онтологических, когнитивных и экономико-математических моделей. Для учета неопределенности предложен численный метод стохастической корректировки параметров на основе когнитивных весов. Работоспособность подхода продемонстрирована на численном эксперименте по исследованию влияния

ограничений выбросов CO₂ на топливно-энергетические балансы Сибирского федерального округа. Практическая значимость работы состоит в повышении обоснованности и воспроизводимости исследований развития топливно-энергетического комплекса за счет согласованного использования средств качественного и количественного анализа.

Ключевые слова: топливно-энергетический комплекс, энергетическая безопасность, когнитивное моделирование, онтологии, численный эксперимент, линейное программирование.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования направлений развития топливно-энергетического комплекса с учетом требований энергетической безопасности относятся к числу сложных задач, требующих совместного использования качественных и количественных методов анализа. В Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук для решения таких задач применяется двухуровневый подход, в рамках которого методы семантического (онтологического и когнитивного) моделирования используются на этапе качественного анализа, а экономико-математические модели и программные комплексы для оптимизационных расчетов – на этапе количественного анализа вариантов развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) [1–3]. Такой подход позволяет учитывать как структурные и причинно-следственные связи между факторами, так и количественные последствия реализации различных возмущающих и управляющих воздействий.

Однако существующие инструментальные средства практически не формализованный переход от результатов когнитивного анализа к параметрам математической модели [4]. На практике изменение сценарных факторов, выделенных на когнитивной карте, и их перенос в параметры и ограничения экономико-математической модели во многих случаях выполняются вручную. Это снижает воспроизводимость численных экспериментов, затрудняет повторное использование знаний и ограничивает возможности сопоставления различных вариантов исследования в рамках единого программного комплекса. В этих условиях возникает задача разработки программного компонента, обеспечивающего интеграцию когнитивного и математического моделирования в составе

цифровой среды системных исследований в энергетике. Такой компонент должен поддерживать построение и редактирование когнитивных моделей, формализованное преобразование изменений их весов и характеристик в параметры экономико-математической модели, выполнение расчетов по сформированным сценариям и обратную интерпретацию полученных результатов. Особое значение имеет также учет неопределенности, сопровождающей экспертные оценки силы и направленности воздействий при формировании сценариев развития ТЭК.

Целью проведенных исследований была разработка программного компонента интеграции когнитивного и математического моделирования в составе Экосистемы знаний в энергетике [1]. Для достижения поставленной цели решались задачи разработки архитектуры компонента в составе комплекса ИНТЭК-SAW, формализации технологии проведения численного эксперимента, разработки численного метода стохастической корректировки параметров на основе когнитивных весов и апробации предложенного подхода на примере исследования влияния ограничений выбросов CO₂ на параметры топливно-энергетического баланса Сибирского федерального округа.

В работе представлены архитектура программного компонента, технология проведения численного эксперимента, численный метод учета неопределенности и полученные результаты численного эксперимента.

1. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИНТЭК-SAW

Программный комплекс (ПК) ИНТЭК-SAW реализован на основе агентно-сервисной архитектуры, обеспечивающей согласованное использование сервисов семантического и математического моделирования, расчетных средств и средств представления результатов [5]. В рамках данной архитектуры отдельные функциональные задачи распределены между специализированными агентами, за счет этого обеспечено согласованное использование различных видов моделей и результатов вычислений в составе единого программного комплекса.

Архитектура ПК ИНТЭК-SAW (рис. 1) ориентирована на поддержку интеграции когнитивного и математического моделирования при проведении численных экспериментов по установлению направлений развития топливно-энергетического комплекса с учетом требований энергетической безопасности. В составе

комплекса выделены агенты формирования сценариев, построения и редактирования когнитивных моделей, а также выполнения оптимизационных расчетов и представления результатов исследования.

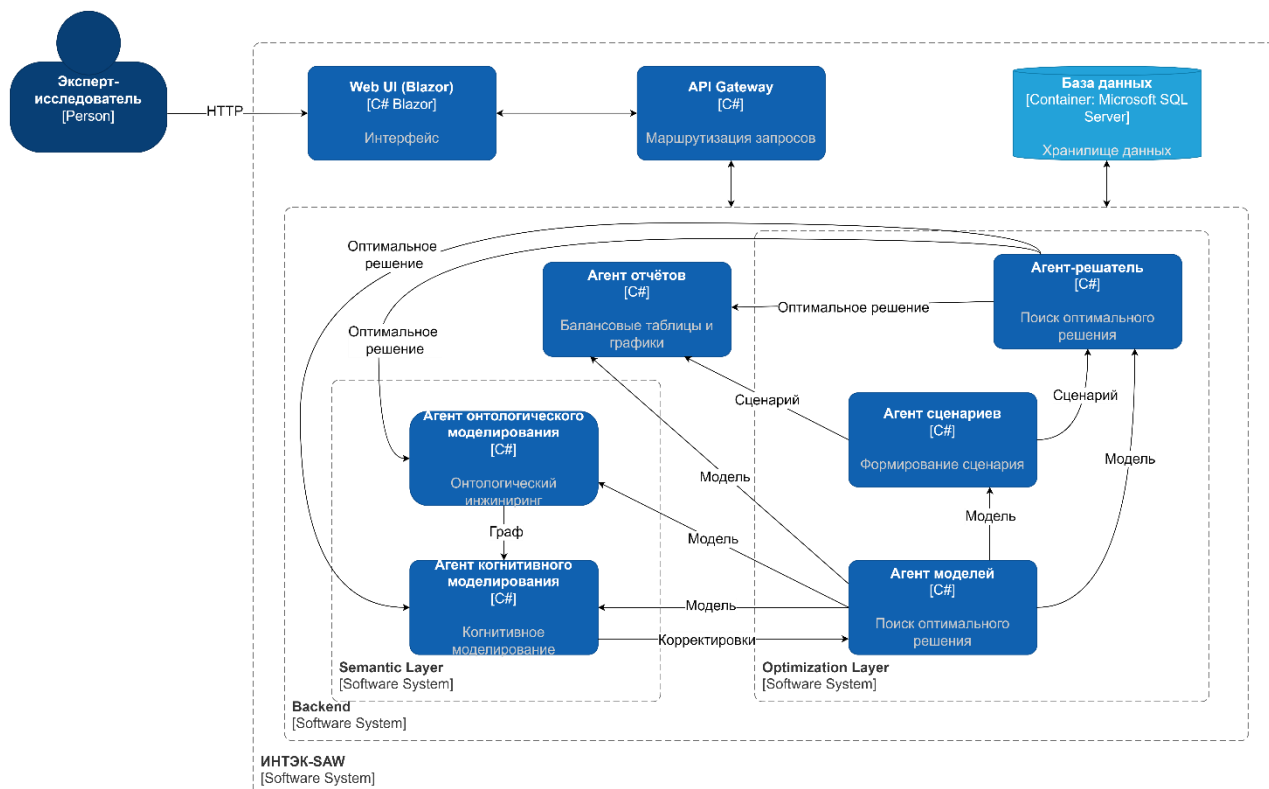


Рис. 1. Архитектура ПК ИНТЭК-SAW.

Агент когнитивного моделирования обеспечивает построение, редактирование и хранение когнитивных карт, отражающих причинно-следственные связи между факторами, параметрами и показателями исследуемой системы. Интерфейс агента представлен на рис. 2. Использование графового представления позволяет формализовать взаимосвязи между элементами модели и обеспечить их последующее преобразование в параметры экономико-математической модели. Тем самым программный комплекс ИНТЭК-SAW обеспечивает согласованное использование семантического и математического моделирования при проведении численного эксперимента.



Рис. 2. Интерфейс построения и редактирования когнитивной карты (графического представления когнитивной модели)

2. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Предложена технология проведения численного эксперимента с использованием агента когнитивного моделирования, включающая шесть основных этапов (рис. 3).

Этап 1. Выбирается модель для исследования, формируются технологические словари, задаются система переменных и ограничений, целевая функция. Результатом этапа является формализованная экономико-математическая модель ТЭК, представленная системой ограничений и целевой функцией [6]. Базовый вариант модели используется в качестве исходного состояния численного эксперимента.

Этап 2. Выполняется структурирование знаний о взаимосвязях между элементами экономико-математической модели. Эти отношения представляются в виде онтологии ориентированного графа, в котором вершины соответствуют факторам модели, а дуги отражают логико-семантические связи между ними. Результатом этапа является онтологическая модель ТЭК, формирующая семантический слой исследования [7].

Этап 3. На основе онтологической модели строится когнитивная карта, предназначенная для задания сценариев развития ТЭК. В нее включаются факторы модели, а также возмущающие и управляющие воздействия. Между ними задаются причинно-следственные связи в знаковой, весовой или функциональной формах. Результатом этапа является когнитивная модель, интегрированная с экономико-математической моделью через механизм преобразования изменений факторов когнитивной модели в параметры математической модели.

Этап 4. Формируется сценарий развития ТЭК с использованием когнитивной модели. Изменение значений факторов, характеризующих возмущающие или управляющие воздействия, приводит к корректировке параметров и ограничений технико-экономической модели. Результатом этапа является вычислительный сценарий, задающий согласованную совокупность условий функционирования ТЭК.

Этап 5. Выполняется поиск оптимального решения для каждого варианта модели ТЭК, входящего в вычислительный сценарий. Результатом этапа является построенный вариант развития ТЭК, характеризующийся количественными значениями переменных математической модели.

Этап 6. Дается интерпретация результатов численного эксперимента. Полученные данные представляются в виде балансовых таблиц и значений показателей на когнитивной карте. При необходимости результаты используются для уточнения исследуемых параметров ТЭК и повторного проведения расчета.

Таким образом, предложенная технология обеспечивает последовательный переход от формирования математической и семантической моделей к построению сценариев развития ТЭК, их количественному расчету и обратной интерпретации результатов в виде когнитивных карт [8].

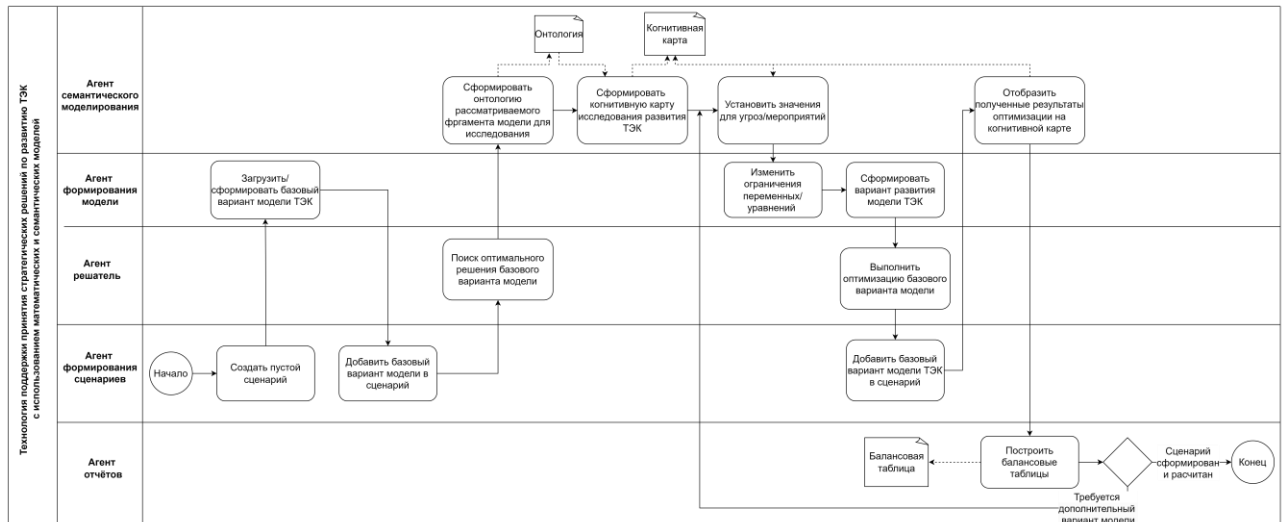


Рис. 3. Диаграмма бизнес-процесса технологии проведения численного эксперимента (BPMN).

Формирование вычислительного сценария на основе когнитивной модели требует учета неопределенности, связанной с оценкой силы воздействий и их влияния на параметры экономико-математической модели. Поэтому на данном этапе используется авторский численный метод стохастической корректировки параметров на основе когнитивных весов, обеспечивающий переход от детерминированного задания сценарных воздействий к формированию ансамбля возможных состояний ТЭК.

3. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД СТОХАСТИЧЕСКОЙ КОРРЕКТИРОВКИ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ КОГНИТИВНЫХ ВЕСОВ

Для учета неопределенности в сценарных исследованиях ТЭК предложен численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели на основе когнитивных весов. В этом методе использована когнитивная карта [9], представляемая ориентированным взвешенным графом

$$G = (V_c, E_c),$$

где $V_c = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множество концептов, а $E_c \subseteq V_c \times V_c$ – множество причинно-следственных связей между ними.

Каждая связь $(v_j \rightarrow v_i) \in E_c$ характеризуется весовым коэффициентом $w_{ji} \in [-1, 1]$ и степенью уверенности эксперта [10] $c_{ji} \in [0, 1]$. Для интеграции когнитивного и математического моделирования введено отображение

$\Phi: V_c \rightarrow P$, сопоставляющее концептам когнитивной карты параметры математической модели. Экономико-математическая модель ТЭК представлена в виде задачи оптимизации

$$\min_{x \in X} F(x, p),$$

где x – вектор переменных модели, $p = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ – вектор параметров, $p_i^{(0)}$ – их базовые значения.

Для каждого концепта v_i рассмотрено множество входящих воздействий

$$\text{In}(v_i) = \{(v_j \rightarrow v_i) \in E_c\}.$$

Агрегированное когнитивное воздействие определено как нормированная взвешенная сумма входящих влияний:

$$W_i = \frac{\sum_{(j \rightarrow i) \in \text{In}(v_i)} w_{ji} c_{ji}}{\sum_{(j \rightarrow i) \in \text{In}(v_i)} c_{ji}}$$

при условии, что $\sum_{(j \rightarrow i) \in \text{In}(v_i)} c_{ji} > 0$. Если для концепта v_i входящие связи отсутствуют, принимается $W_i = 0$. Такая форма позволяет учитывать как знак и силу когнитивного влияния, так и степень доверия к экспертным оценкам, не допуская искусственного увеличения суммарного эффекта только за счет числа входящих связей.

Суммарная степень уверенности экспертов определена выражением

$$C_i = 1 - \prod_{(j \rightarrow i) \in \text{In}(v_i)} (1 - c_{ji}).$$

Эта величина интерпретируется как агрегированная мера уверенности по совокупности входящих воздействий и принимает значения в интервале $[0, 1]$.

Стохастическая корректировка параметра p_i в k -й реализации моделируется случайной величиной

$$\Delta p_i^{(k)} \sim N(\mu_i, \sigma_i^2),$$

где

$$\mu_i = \beta W_i p_i^{(0)}, \quad \sigma_i = \alpha | p_i^{(0)} | (1 - C_i).$$

Здесь β – коэффициент, задающий масштаб среднего смещения параметра под действием когнитивного воздействия, α – коэффициент, определяющий уровень

стохастической вариации. Тогда значение параметра в k -й реализации находится в виде

$$p_i^{(k)} = \Pi_{[p_i^{\min}, p_i^{\max}]} (p_i^{(0)} + \Delta p_i^{(k)}),$$

где Π – оператор проекции на допустимый интервал изменения параметра.

Для каждой реализации параметров $p^{(k)}$, $k = 1, \dots, N$, решалась оптимизационная задача

$$x^{(k)} = \arg \min_{x \in X} F(x, p^{(k)}),$$

в результате формируется ансамбль сценарных состояний

$$V^{\text{SCWA}} = \{V^{(k)}\}_{k=1}^N.$$

Агрегирование результатов численного эксперимента выполнено на основе статистических характеристик исследуемых индикаторов. Для индикатора I_r найдены оценки математического ожидания

$$E[I_r] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_r^{(k)}$$

и дисперсии

$$\text{Var}(I_r) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (I_r^{(k)} - E[I_r])^2.$$

Предложенный метод обеспечивает формализацию связей когнитивной модели с параметрами экономико-математической модели и формирование ансамбля сценарных состояний ТЭК в условиях неопределенности.

4. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО СНИЖЕНИЮ ВЫБРОСОВ CO₂ В СИБИРСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ

Для апробации предложенной технологии и разработанного численного метода был проведен численный эксперимент по исследованию влияния ужесточения ограничений по выбросам CO₂ на параметры топливно-энергетического баланса Сибирского федерального округа.

В качестве базового значения экологического ограничения принималось верхнее ограничение уравнения «Выбросы CO₂ в Сибирском федеральном округе», с кодом 99835, равное 123462.74 тыс. т CO₂. В когнитивной модели возмущающему воздействию, отражающему ужесточение углеродной политики,

были сопоставлены значения весового коэффициента $w = -0.7$ и степени уверенности $c = 0.75$. Для стохастической корректировки параметра брались коэффициент масштаба $\beta = 0.035$ и коэффициент неопределенности $\alpha = 0.05$. На этой основе был сформирован ансамбль из 1000 расчетных реализаций, для каждой из которых выполнялся оптимизационный расчет модели ТЭК.

Выполненная серия расчетов позволила перейти от анализа одного детерминированного сценария к исследованию множества допустимых состояний системы при вариативном значении экологического ограничения. Несмотря на то что среднее смещение соответствует ужесточению ограничения, стохастическая постановка допускает реализацию значений параметра как ниже, так и выше базового уровня в пределах сформированного ансамбля. В полученном ансамбле значение ограничения по выбросам CO₂ изменялось в диапазоне от 116545.22 до 125669.92 тыс. т. Тем самым экологическое ограничение рассматривалось не как фиксированное условие, а как диапазон возможных состояний, формируемый за счет возмущающего воздействия и неопределенности экспертной оценки.

Результаты расчетов показали, что в большинстве реализаций устойчивость электроэнергетического баланса Сибирского федерального округа сохраняется (рис. 4). В основной части сценариев дефицит электроэнергии отсутствует, однако при наиболее жестких значениях ограничения возникают его ненулевые значения. По выборке максимальный дефицит составил 3.23 млрд кВт·ч; в ряде реализаций наблюдаются промежуточные значения порядка 0.05–2.88 млрд кВт·ч, тогда как в большинстве случаев значение дефицита остается нулевым. Это указывает на то, что исследуемая система в целом сохраняет работоспособность, а влияние ограничения проявляется прежде всего не в нарушении энергоснабжения, а в перестройке структуры потребления котельно-печного топлива.

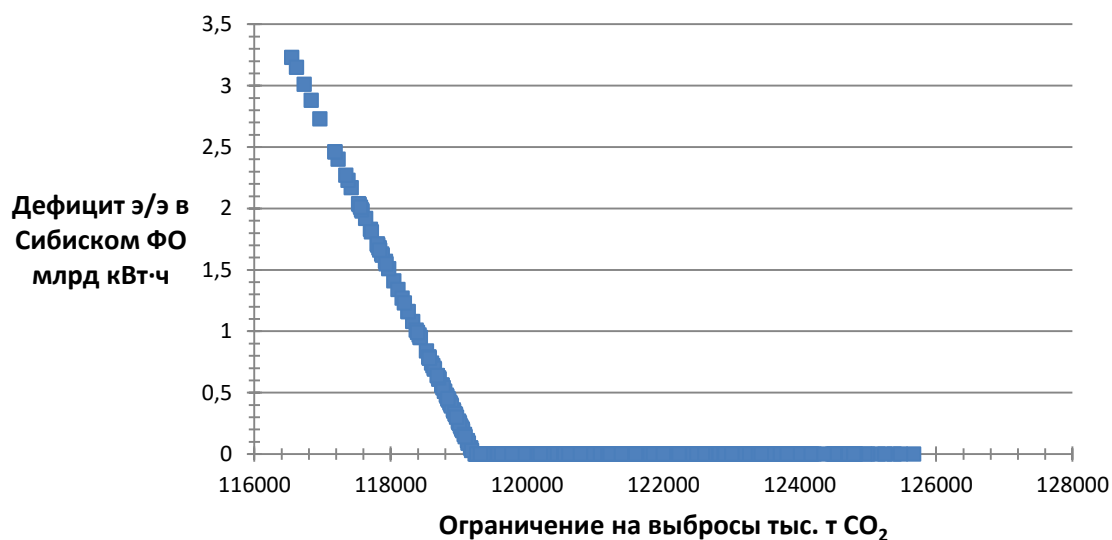


Рис. 4. Зависимость дефицита электроэнергии в Сибирском федеральном округе от уровня ограничения выбросов CO₂.

Анализ распределения показателей котельно-печного топлива подтвердил сделанный выше вывод (рис. 5). В серии расчетов объем использования угля изменялся в диапазоне от 111.29 до 134.50 млн т у. т., потребление газа – от 6.70 до 32.55 млн т у. т., потребление мазута – от 9.05 до 28.94 млн т у. т.

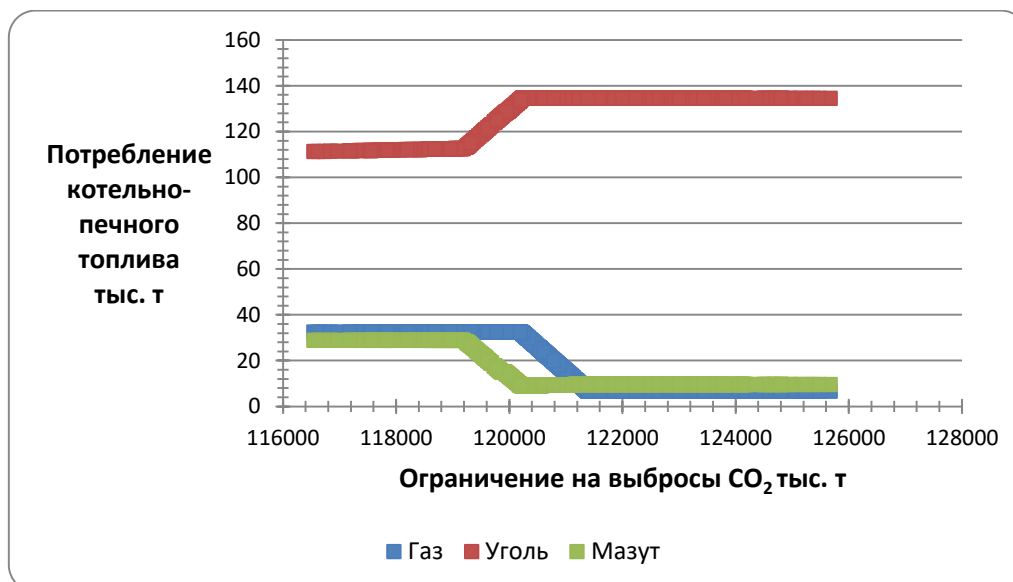


Рис. 5. Изменение структуры потребления котельно-печного топлива в зависимости от ограничения выбросов CO₂.

При более жестких ограничениях по выбросам наблюдаются снижение использования угля и увеличение роли газа и мазута, тогда как при менее жестких

значениях ограничений решение стремится к верхней границе использования угля и минимальным значениям альтернативных видов топлива. Следовательно, адаптация топливно-энергетического баланса к ужесточению экологического ограничения осуществляется главным образом за счет изменения структуры потребления топлива [11].

Таким образом, проведенный численный эксперимент показал, что предложенный численный метод позволяет исследовать не одно расчетное состояние, а ансамбль возможных состояний ТЭК при варьировании экологических ограничений. На примере Сибирского федерального округа показано, что ужесточение ограничения по выбросам CO₂ приводит прежде всего к замещению угля менее углеродоемкими энергоресурсами при сохранении устойчивости энергобаланса в большинстве сценарных реализаций. Это подтверждает применимость метода для анализа последствий экологических ограничений в условиях неопределенности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена задача интеграции семантического и математического моделирования в исследованиях направлений развития топливно-энергетического комплекса с учетом требований энергетической безопасности. Разработан программный компонент в составе комплекса ИНТЭК-SAW, обеспечивающий формализованное преобразование изменений когнитивной модели в параметры технико-экономической модели и обратную интерпретацию результатов расчетов.

Предложена технология проведения численного эксперимента, реализующая последовательный переход от построения онтологической и когнитивной моделей к формированию вычислительных сценариев, выполнению оптимизационных расчетов и представлению результатов. В отличие от существующих подходов, технология обеспечивает автоматизацию взаимодействия качественного и количественного анализа и поддерживает повторное использование знаний в составе единого программного средства.

Разработан численный метод стохастической корректировки параметров на основе когнитивных весов, позволяющий учитывать неопределенность экспертных оценок при формировании сценарных условий. Метод обеспечивает

переход от детерминированного задания воздействий к формированию ансамбля сценарных состояний ТЭК.

Проведенный численный эксперимент подтвердил работоспособность предложенного подхода и показал его применимость для анализа влияния экологических ограничений на структуру топливно-энергетического баланса. Установлено, что при ужесточении ограничения по выбросам CO₂ адаптация системы осуществляется преимущественно за счет изменения структуры потребления котельно-печного топлива при сохранении устойчивости энергобаланса в большинстве вариантов расчета.

Полученные результаты могут быть использованы при проведении численных экспериментов при изучении энергетической безопасности, а также при разработке инструментальных средств поддержки принятия решений в энергетике.

Благодарности

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Массель Л.В.* Экосистема знаний для поддержки исследований и управления развитием энергосистем // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: материалы совещания. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2024. С. 3224–3231.
2. *Массель Л.В., Массель А.Г.* Семантические технологии на основе интеграции онтологического, когнитивного и событийного моделирования // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2013): материалы III Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 21–23 февр. 2013 г.). Минск: БГУИР, 2013. С. 247–250.
3. *Ворожцова Т.Н., Пестерев Д.В., Кузьмин В.Р.* Семантическое моделирование в исследованиях устойчивости энергетических и социо-экологических систем // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. Т. 24, № 4. С. 31–43.

4. *Массель А.Г., Мамедов Т.Г.* Интеграция математического и когнитивного моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК с позиции энергетической безопасности // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2025. Т. 39, № 3. С. 61–71.

5. *Кузьмин В.Р., Загорулько Ю.А.* Применение агентно-сервисного подхода при разработке интеллектуальных систем поддержки принятия решений в энергетике // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2020. Т. 18, № 3. С. 5–18.

6. *Tyurina E.A., Mednikov A.S., Elsuikov P.Y., Sushko S.N.* Competitiveness of export-oriented systems of long-range energy supply // Energy Systems Research. 2024. Vol. 7, No. 1. P. 44–50.

7. *Макареня Т.А., Маннаа А.С., Калиниченко А.И., Петренко С.В.* Когнитивное моделирование социально-экономических систем: ретроспективный анализ инструментов и информационных систем // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2023. № 3. С. 84–94.

8. *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. Т. 23, № 3. С. 62–73.

9. *Kosko B.* Fuzzy cognitive maps // International Journal of Man-Machine Studies. 1986. Vol. 24. P. 65–75.

10. *Zadeh L.A.* Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. P. 338–353.

11. *Severina Y.D., Shakirov V.A., Takaishvili L.N.* Modeling the development of energy systems of remote areas in the context of the energy transition // Energy Systems Research. 2024. Vol. 7, No. 4. P. 5–12.

INTEGRATION OF SEMANTIC MATHEMATICAL MODELING FOR THE ANALYSIS OF ENERGY SECURITY PROBLEMS

A. G. Massel¹ [0009-0001-6884-1119], T. G. Mamedov² [0000-0001-9257-7410]

^{1, 2}*Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

¹amassel@gmail.com, ²mamedowtymur@yandex.ru

Abstract

The study addresses the problem of integrating cognitive and mathematical modeling in research on the development directions of the fuel and energy complex, taking into account energy security requirements. The relevance of the work is due to the fact that in the existing two-level research methodology, the transition from the results of qualitative analysis using cognitive modeling to the parameters of the mathematical model is largely performed manually, which reduces the reproducibility of numerical experiments and limits the efficiency of accumulated knowledge usage. The aim of the work is to develop a software component that ensures the combined use of cognitive and mathematical models within an Energy Knowledge Ecosystem. A software component is proposed, implemented as part of the INTEC-SAW suite, which provides the transformation of changes in the cognitive model into the parameters of the economic-mathematical model, as well as the reverse interpretation of calculation results. Technology for conducting numerical experiments has been developed, including the construction of semantic (ontological and cognitive) models, formation of computational scenarios, execution of optimization calculations, and presentation of results, distinguished by the automation of the joint use of ontological, cognitive, and economic-mathematical models. To account for uncertainty, a numerical method of stochastic parameter adjustment based on cognitive weights is proposed. The effectiveness of the approach is demonstrated through a numerical experiment investigating the impact of CO₂ emission constraints on the energy balances of the Siberian Federal District. The practical significance of the work lies in increasing the validity and reproducibility of research on the development of the fuel and energy complex through the coordinated use of qualitative and quantitative analysis tools.

Keywords: *energy complex, energy security, cognitive modeling, ontologies, computational experiment, linear programming*

REFERENCES

1. *Massel L.V.* Knowledge ecosystem for supporting research and management of energy systems development // Proceedings of the XIV All-Russian Conference on Control Problems. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, 2024. P. 3224–3231.
2. *Massel L.V., Massel A.G.* Semantic technologies based on the integration of ontological, cognitive and event modeling // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2013): Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference (Minsk, February 21–23, 2013). Minsk: BSUIR, 2013. P. 247–250.
3. *Vorozhtsova T.N., Pesterev D.V., Kuzmin V.R.* Semantic modeling in studies of sustainability of energy and socio-ecological systems // Information and Mathematical Technologies in Science and Management. 2021. Vol. 24, No. 4. P. 31–43.
4. *Massel A.G., Mamedov T.G.* Integration of mathematical and cognitive modeling in studies of fuel and energy complex development from the perspective of energy security // Information and Mathematical Technologies in Science and Management. 2025. Vol. 39, No. 3. P. 61–71.
5. *Kuzmin V.R., Zagorulko Yu.A.* Application of the agent-service approach in the development of intelligent decision support systems in the energy sector // Vestnik of Novosibirsk State University. Series: Information Technologies. 2020. Vol. 18, No. 3. P. 5–18.
6. *Tyurina E.A., Mednikov A.S., Elsukov P.Y., Sushko S.N.* Competitiveness of export-oriented systems of long-range energy supply // Energy Systems Research. 2024. Vol. 7, No. 1. P. 44–50.
7. *Makarenya T.A., Manna A.S., Kalinichenko A.I., Petrenko S.V.* Cognitive modeling of socio-economic systems: retrospective analysis of tools and information systems // Vestnik VSU. Series: System Analysis and Information Technologies. 2023. No. 3. P. 84–94.
8. *Massel A.G., Mamedov T.G., Pyatkova N.I.* Technology of computational experiments in studies of energy sector functioning under energy security threats //

Information and Mathematical Technologies in Science and Management. 2021. Vol. 23, No. 3. P. 62–73.

9. *Kosko B.* Fuzzy cognitive maps // International Journal of Man-Machine Studies. 1986. Vol. 24. P. 65–75.

10. *Zadeh L.A.* Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. P. 338–353.

11. *Severina Y.D., Shakirov V.A., Takaishvili L.N.* Modeling the development of energy systems of remote areas in the context of the energy transition // Energy Systems Research. 2024. Vol. 7, No. 4. P. 5–12.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Массель Алексей Геннадьевич – окончил Иркутский государственный университет в 2007 году. Получил степень кандидата технических наук в 2011 году. Научные интересы включают семантическое моделирование, проектирование информационных систем и разработку систем поддержки принятия решений в энергетике. Автор более 70 работ. Scopus Author ID: 57205017287.

Alexey Genadevich MASSEL — born in 1985. Graduated from Irkutsk State University in 2007. Received the Ph.D. degree in Engineering in 2011. His research interests include semantic modeling, information system design, and the development of decision support systems in the energy sector. He is the author of more than 70 publications.

email: amassel@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0351-0415



МАМЕДОВ Тимур Габилевич – окончил Иркутский государственный технический университет в 2021 году. В настоящее время работает младшим научным сотрудником. Научные интересы включают семантическое моделирование, когнитивные карты и исследование направления развития ТЭК.

Timur Gabilovich MAMEDOV – graduated from Irkutsk National Research Technical University in 2021. He is currently working as a junior researcher. His research interests include semantic modeling, cognitive maps, and studies of fuel and energy complex (FEC) development.

Scopus Author ID: 58026460700.

email: mamedowtymur@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-3396-5074

Материал поступил в редакцию 3 апреля 2026 года