

ISSN 2413 - 0133
Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

6+

№1(17)/ 2020

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Научный журнал

№ 1 (17)



EDITORIAL BOARD

Ablameyko S.V.
Arshinskiy L.V.
Bachkova I.A.
Berestneva O.G.
Boukhanovsky A.V.
Bychkov I.V.
Donskoy V.I.

Dunaev M.P.
Eliseev S.V.
Gornov A.Y.
Gribova V.V.
Groumpos P.
Hodashinsky I.A.
Kalimoldaev M.N.
Karpenko A.P.
Kazakov A.L.
Khamisov O.V.
Komendantova N.P.
Lis R.
Massel L.V.
Mokhor V.V.
Moskvichev V.V.
Ovtcharova J.
Popov G.T.
Smirnov S.V.
Stylios C.
Taratukhin V.V.
Voevodin V.V.
Voropai N.I.
Woern H.
Wolfengagen V.E.
Yusupova N.I.
Zorina T.G.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ
Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
Бачкова И.А., Болгария, София, ХТМУ
Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ
Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО
Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Донской В.И., д.ф.-м.н., Симферополь, Таврическая академия Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского
Дунаев М.П., д.т.н., Иркутск, ИРНИТУ
Елисеев С.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Грибова В.В., д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
Грумπος П., Греция, University of Patras
Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР
Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ
Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана
Казаков А.Л., д.ф.-м.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Комендантова Н.П., PhD, Австрия, Лаксенбург, IASA
Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology
Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Мохор В.В., д.т.н., Киев, ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины
Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, СКБ «Наука» СО РАН
Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН
Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus
Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster
Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ
Воропай Н.И., чл.-корр. РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Вёрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ
Юсупова Н.И., д.т.н., Уфа, УГАТУ
Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси

EXECUTIVE EDITORIAL

Chief Editor Massel L.V.
Executive Editor
Bakhvalova Z.A.
Editor Kopaigorodsky A.N.
Editor Massel A.G.
Designer Pesterev D.V.

ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор Массель Л.В. д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Выпускающий редактор Бахвалова З.А. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Редактор Копайгородский А.Н. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Редактор Массель А.Г. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Дизайнер Пестерев Д.В. Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Адрес учредителя, издателя и редакции

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130 Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 441
Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 440

Массель Л.В., e-mail: massel@isem.irk.ru
Бахвалова З.А. e-mail: zinand@isem.irk.ru

Сайт журнала и конференции ИМТ - <https://www.imt-journal.ru/>

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016.
Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Регистрационный номер ПИ № ФС 77 – 73539.

Отпечатано в полиграфическом участке ИСЭМ СО РАН

© Все права принадлежат авторам публикуемых статей.

Дата выхода 20.05.2020 г. Тираж 100 экз.
Цена свободная. (6+)

© Издательство ИСЭМ СО РАН

Математические и информационные технологии

Черкашин А.К. Математические аспекты реализации метода анализа иерархий	5
Виноградов Г.П., Воронин Ю.А. Самоорганизующиеся сетевые экспертные среды в управлении региональной техногенной безопасностью	25
Виноградов Г.П., Прохоров А.А., Шепелев Г.А. Паттерны в системах управления автономными системами	40

Интеллектуальные технологии в энергетике

Гальперова Е.В., Гальперов В.И. Методический подход к исследованию влияния развития интеллектуальных систем энергетики на спрос и цену электроэнергии в регионе	55
Колосок И.Н., Гурина Л.А. Оценка качества данных SCADA И WAMS при кибератаках на информационно-коммуникационную инфраструктуру ЭЭС	68
Дунаев А.М., Дунаев М.П. Диагностирование электрооборудования на транспорте с использованием интеллектуальных систем	79
Ворожцова Т.Н., Майсюк Е.П., Иванова И.Ю. Система онтологий для исследования антропогенного влияния объектов энергетики на окружающую среду	89

Программные системы и комплексы

Городняя Л.В., Демидов С.Е., Кириченко М.Д. Ткаченко Д.Д. Проект информационного стенда «ПРИЗМА» для представления измеримых характеристик языков и систем программирования	105
Бахвалова З.А., Камышова Е.А. Роль формализации требований в тестировании программного обеспечения	120
Трофимов И.Л., Трофимов Л.Н. Инструментальные средства для формирования и анализа множества вариантов расчетов модели ОРИРЭС и представление результатов в Web-приложении	130
Кузьмин В.Р. Разработка информационной подсистемы для расчёта и визуализации вредных выбросов от объектов энергетики	142

Mathematical and Information Technologies

Cherkashin A.K. Mathematical aspects of implementing the analytic hierarchy process	5
Vinogradov G.P., Voronin Yu.A. Self-organizing network expert environments in the management of regional technogenic security	25
Vinogradov G. P., Prokhorov A. A., Shepelev G. A Patterns in control systems by autonomous systems	40

Intelligent technology in the energy sector

Galperova E.V., Galperov V.I. A methodological approach to the assessment of the impact of intelligent energy systems development on regional electricity price and demand	55
Kolosok I.N., Gurina L.A. Quality assessment of SCADA and WAMS data in the case of cyberattacks on information and communication infrastructure of EPS	68
Dunaev A.M., Dunaev M.P. Diagnostics of electrical equipment in transport using intelligent systems	79
Vorozhtsova T.N., Maysyuk E.P., Ivanova I.Yu. An ontology system for studying the anthropogenic impact of energy facilities on the environment	89

Software systems and complexes

Gorodnaya L.V., Demidov S.E., Kirichenko M.D., Tkachenko D.D. The project of the information stand "PRISMA" for the presentation of the measurable characteristics of programming languages and systems	105
Bakhvalova Z.A., Kamyshova E.A. The role of formalizing requirements in software testing	120
Trofimov I.L., Trofimov L.N. Software tools for the formation and analysis of many options for calculating the ORIRES model and presenting the results in a Web application	130
Kuzmin V.R. Development of information subsystem for calculation and visualization of harmful emissions from energy objects	142

УДК: 51.7 : 519.816

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ
МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

Черкашин Александр Константинович

д.г.н., профессор, главный научный сотрудник,

зав. лабораторией теоретической географии,

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН,

664033, Россия, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская 1, e-mail: akcherk@irnok.net

Аннотация. Обсуждаются актуальные проблемы формирования метатеоретических основ моделирования при реализации методов анализа иерархий (МАИ), а именно - вопросы математического обоснования шкалы суждений на основе взаимосвязанных наблюдений, парных сравнений факторов, критериев и альтернатив, расчета приоритетов и их синтеза в итоговые оценки. Показано, что базовые положения (аксиомы) МАИ непосредственно связаны со свойствами частных производных, характеризующих предельную норму замещения факторов, и с дифференциальным уравнением Эйлера для однородных функций многих переменных. На метатеоретическом уровне эти связи обусловлены процедурами расслоения пространств и множеств на элементах базы расслоения разного содержания. Методология МАИ основана на расслоениях числовых множеств, касательных расслоениях на многообразиях и расслоениях знаний на системные теории, что обеспечивает универсальность ее применения. Математический анализ процедур МАИ выделяет требование линейности пространства исследования и необходимость линеаризовать показатели в самом начале обработки данных с дальнейшим переходом от исходных абсолютных показателей к относительным для формирования локальной системы координат касательного слоя (кластера) – пространства локального, линейного, метрического и ограниченного. Уравнение Эйлера связывает значения координат локального пространства касательного слоя в форме метрических зависимостей – функций оценивания линейного и нелинейного вида, известных в МАИ. Для определения шкалы превосходства на разных уровнях формализации применяются натуральные и целые числа, рациональные числа, действительные и гипердействительные числа стандартного и нестандартного анализа. Показано, при каких ограничениях в процедурах МАИ, имея матрицу парного оценивания и не зная вид функции ранжирования, появляется возможность вычислять приоритеты и выбирать нужный вариант решения. Расчетные приоритеты – это относительные чувствительности изменения оценочных функций, а их соотношения – нормы замещения учитываемых факторов. Выводятся уравнения синтеза оценок глобального приоритета на основе показателей локальных приоритетов по всем критериям. Итоговая функция оценивания может быть представлена в виде произведения векторов и матриц сравнения разных иерархических уровней (полилинейной формы).

Ключевые слова. Метод анализа иерархий (МАИ), математические основы, процедуры расслоения, касательные расслоения, уравнение Эйлера, функции оценивания, матрицы сравнения.

Цитирование: Черкашин А. К. Математические аспекты реализации метода анализа иерархий // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 1 (17). С. 5–24. DOI: 10.38028/ESI.2020.17.1.001

Введение. Прекрасной иллюстрацией применения математических технологий в решении теоретических и прикладных проблем стали процессы иерархического и сетевого анализа, разработанные в 1970-х годах ученым из Питтсбургского Университета (США) – профессором Томасом Л. Саати. В российской научной литературе они называются методом анализа иерархий (МАИ) и методом аналитических сетей (МАС). Многие из статей и книг Т.Л.Саати за прошедшие десятилетия переведены на русский язык, в частности монографии [3-4]. Эти методы основаны на хорошей математике, содержательны и наглядны и имеют множество приложений в различных областях науки и практики [20], что отображено в многочисленных научных публикациях в России и за рубежом, количество которых постоянно возрастает [11]. Сформулированы главные принципы и аксиомы методологии МАИ и МАС, предложены математические модели и методы решения задач [4, 13, 16], которые могут быть осмысленны с информационных позиций метатеоретического знания [6-7], находящегося на границе между чистой математикой и системными теориями. Универсальный характер методологии МАИ и МАС и ее широкое приложение прямо указывают на эту методологическую позицию.

МАИ — логический и математический инструмент системного подхода к сложным проблемам принятия решений, хорошо формализуемый и реализуемый в алгоритмах, компьютерных программах и информационных технологиях с получением нетривиальных результатов обоснования выбора наилучшей альтернативы действия. Анализ проблемы принятия решений начинается с построения иерархической структуры, которая включает цель, критерии (факторы, явления), альтернативы (объекты выбора) и другие особенности, влияющие на выбор. Структурная модель (граф) отражает понимание поставленной проблемы лицом, принимающим решение. Для решения задачи во внимание принимаются разные количественные параметры и качественные характеристики, объективные данные и субъективные экспертные оценки. С помощью процедуры их парных сравнений МАИ позволяет определить приоритеты достижения цели и построить матрицы сравнений (суждений). Затем выполняются анализ этой матрицы и синтез (полилинейная свертка) всех приоритетов иерархии, рассчитываются приоритеты альтернатив относительно главной цели, а лучшей считается альтернатива с максимальным значением приоритета.

МАС – более общая форма процесса анализа иерархии МАИ, используемого в многокритериальном обосновании решений. МАС в отличие от МАИ структурирует проблему не в иерархию цели, критериев и альтернатив, а в сеть взаимных связей компонентов структуры с дальнейшим их попарным сравнением для измерения весов компонентов, ранжирования альтернатив для конечного решения проблемы. Если в МАИ каждый элемент иерархии считается независимым, то МАС не требует такой независимости, поэтому его

можно использовать как более эффективный инструмент сравнения с меньшими ограничениями на применение формул.

Как отмечает Т.Л. Саати [4], все наши суждения имеют относительную природу и зависят от контекста, поэтому могут быть ошибочными, если не принимать эту особенность во внимание. Используемые формулы истинны только в ограниченных пределах однородных структур с размытыми границами, поэтому в МАИ исходят из предположения, что «вселенная стратифицирована в пространство однородных структур, отношения между которыми подобны отношениям внутри каждой из этих структур» [4, с. 31]. В связи с этим имеет смысл исследовать методологию МАИ с позиций математических процедур расслоения реальности на многообразиях среды [6-8].

1. Основные понятия и принципы. МАИ включает четыре аксиомы, которые отражают отношения обратной симметрии процедур сравнения однородных элементов иерархических и системных связей, а также проблемы сохранения порядка полученных результатов и их зависимости от исходной и расширенной постановки задачи [4]. Т.Л. Саати [4, 16] выделял семь «столпов» МАИ, согласно которым объективно существуют 1) шкалы отношений, пропорциональность показателей и нормирование критериев оценки; 2) фундаментальная шкала парных сравнений, обратно симметричные матрицы сравнения и собственные векторы приоритетов; 3) нечувствительность собственного вектора к изменениям оценочных суждений, что требует однородности этих оценок; 4) однородность и кластеризация для расширения шкалы с интервала $[1,9]$ до $[1,\infty]$; 5) аддитивный синтез приоритетов на иерархиях и сетевых структурах с помощью полилинейных форм для сведения многомерных показателей к одномерной нормированной безразмерной шкале отношений доминирования; 6) сохранение порядка при реализации синтеза; 7) возможность синтеза индивидуальных суждений для разработки групповых решений, совместимых с личными предпочтениями.

1.1. Линейная шкала оценивания. В технологии МАИ сначала выбираются цели оценивания, эффективность достижения которых определяется функцией $f(y)$ набора-вектора критериев (факторов) $y = \{y_i\}$, с позиций которых оцениваются альтернативы $z = \{z_i\}$. МАИ базируется на парных сравнениях между собой отдельно критериев и отдельно альтернатив – вариантов выбора. Основная проблема метода – точность определения критериев и сравнение по этим критериям альтернатив, когда вид оценочной функции $f(y)$ неизвестен.

Задача решается на основе перечисленных положений (аксиом), которые формализуются следующим образом (рис. 1). Пусть $x = \{x_i\}$ – система независимых координат общего (тотального) пространства R^n переменных. В этом пространстве формируются локальные центрированные и нормированные системы координат $y_i = (x_i - x_{0i})/\sigma_i$ – безразмерных дискретных или непрерывных величин с центром x_0 ; x_{0i} и σ_i – индивидуальные константы переменных x_i , в частности, их средние значения x_{0i} и квадратические отклонения σ_i . Желательно, чтобы y_i было положительной величиной, отражающей некоторое расстояние – отклонение от нормы: $y_i = |x_i - x_{0i}|/\sigma_i$. При сравнении разных явлений i и j в этом случае используются оценки $a_{ij} = y_j/y_i$. В любом случае величина (критерий) a_{ij} рассматривается как результат измерений по фундаментальной шкале парного сравнения, обладающего свойством обратной симметрии $a_{ij} = 1/a_{ji}$. Такие свойства являются выражением первых двух упомянутых гипотез МАИ [4]. Из значений a_{ij} формируется рабочая матрица (ядро метода) $A = \|a_{ij}\|$, на

основе которой рассчитываются приоритеты каждого явления путем вычисления собственных значений и векторов этой матрицы. Матрица парных сравнений позволяет выразить относительное превосходство a_{ij} одного явления или объекта над другим j по общему для них признаку: i превосходит j в a_{ij} раз, откуда $a_{ji}=1/a_{ij}$.

Фундаментальная шкала приоритетов сравнения i и j , оцениваемых экспертным путем, состоит из симметрично упорядоченных целых чисел u_{ij} , в частности, ряда (9, 8, ..., 2, 1, 1, 2, ..., 8, 9), где $u_{ij}=1$ указывает на равное предпочтение альтернатив i и j , отклонение от 1 влево - на разные степени u_{ij} предпочтения i , а вправо u_{ji} - преимуществ j над i (см. рис. 1). При экспертной оценке определяется, какой из двух сравниваемых критериев является более важным в данном целевом отношении. Таким образом, величина u_{ij} укладывается в интервал $[1, 9]$ или в любой оценочный интервал, ограниченный сверху значением u_0 . Величина u_{ij} выражает своеобразное расстояние - модуль отклонения $u_{ij} = |x_i - x_{0i}|$ в сторону преимущества i исходного (неизвестного) показателя x_i от эталона x_{0i} . Элементы матрицы в этом случае $a_{ij}=u_{ij}/u_{ji}$, когда условно считается $u_{ji}=1$, и $a_{ii}=1$. Тогда величина u_{ij} просто показывает, во сколько раз разность u_{ij} превышает различие u_{ji} . Результаты оценивания a_{ij} упорядочиваются в матрицу превышения $a_{ij} \geq 1$, а $a_{ji}=1/a_{ij}$. В дифференциальном виде $a_{ij}=dy_j/dy_i$ - приращение dy_i в a_{ij} раз больше приращения dy_j , что при сравнительной оценке соответствует $a_{ij}=u_{ij}$ и $u_{ji}=1$. В частных производных $a_{ij}=-\partial y_j/\partial y_i$, и в силу их особенностей, как операторов, смысл утверждения «во сколько раз» теряется, и можно с a_{ij} действовать чисто математико-аналитическими средствами, что позволяет выяснить механизмы преобразований в малых масштабах.

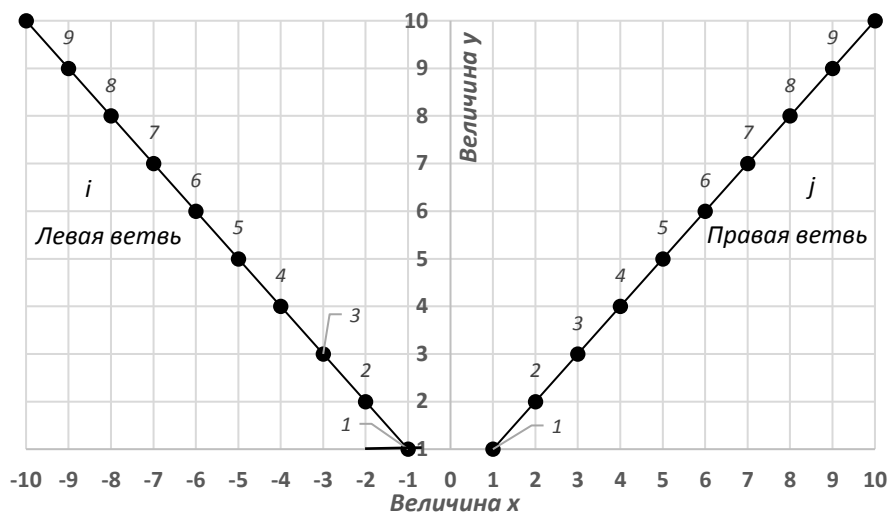


Рис. 1. Схема парного сравнения альтернатив i и j как целочисленная функция $u(x)$ меры отклонения x от x_{0i} (здесь $x_{0i}=0$)

Существование числовой шкалы оценивания Т.Л. Саати [16] связывают с особенностью психологического восприятия реальности, что описывается уравнением психофизического закона Вебера-Фехнера связи «стимул x_i – реакция y_i »:

$$y_i = \alpha \ln(x_i / x_{0i}) = \alpha \ln x_i - \alpha \ln x_{0i}, \quad (1)$$

где x_{0i} – пороговое значение стимула; α - коэффициент чувствительности к воздействию раздражителя. Величина y_i преобразуется в фундаментальную линейную шкалу интервала $[1, 9]$. Метод парных сравнений впервые введен Г. Т. Фехнером, развит Л. Л. Терстоуном [19] и широко используется в МАИ. Аналогично геофизики делают при расчете по шкале Рихтера

магнитуды землетрясений по логарифму энергии сейсмических толчков, а геохимии – при определении кислотности почвы (рН) по логарифму концентрации ионов в почвенном растворе. Очевидно, какой бы не была формула преобразований (1), важно, чтобы она приводила к линейным шкалам абсолютного и относительного сравнения, а в итоге проявляла существующий порядок значимости сравниваемых явлений.

Схема на рис.1 подобна физической модели квантового гармонического осциллятора массы m с частотой колебания ω , дискретные уровни энергии которого $E_p = \omega \hbar (p-1/2)/2\pi$ линейно зависят от собственных чисел $p=1, 2, 3, \dots$ ($\hbar$ – постоянная Планка). Минимальный уровень энергии $\omega \hbar/4\pi$ при $p=1$ называется уровнем нулевых колебаний. В психологии: выбор колебание (сомнение) – быстрая смена решений, периодическая смена настроений в пользу того или иного решения. Для деятельности один из доминирующих вариантов выбирается окончательно, забыв о других вариантах минимального уровня значимости. Пределы различимых уровней сравнения и выбора задаются учитываемом в МАИ психологическим правилом Дж. Миллера [14], согласно которому кратковременная человеческая память не может различить, запомнить и повторить более 7 ± 2 элементов, т.е. в основном в интервале значений от 1 до 9, в частности, у Т.Л. Саати различаются 9 степеней предпочтения от равной предпочтительности (1) до абсолютного предпочтения (9) (см. рис.1).

1.2. Использование алгоритма. Рассмотрим последовательность процедур МАИ на примере видоизменяющего влияния факторов среды на формирование облика ландшафта. Учитываются сочетания ландшафтно-образующих факторов – литологического, гидрологического и термического. Под их местным воздействием формируются географические фации нескольких факторальных рядов: $i=1$ – субгидролитоморфный (A); 2 – сублитоморфный (B); 3 – ксеролитоморфный (C); 4 – субгидроморфный (D) ряды. Сравнительная оценка влияния факторов проводилась на примере ландшафтов Олхинского плоскогорья (Южное Прибайкалье) [5]. Преобладают фации субгидролитоморфного и сублитоморфного рядов, на литологические особенности которых накладываются факторы дополнительного и избыточного увлажнения на северных склонах и водосборных понижениях. Ксеролитоморфные фации встречаются на крутых сухих склонах преимущественно южных экспозиций.

По натурным наблюдениям проведены парные сравнения ландшафтно-образующих преимуществ проявления каждого факторального ряда по фундаментальной шкале от 1 до 9 (табл.1).

Таблица 1. Матрица парного сравнения

	A	B	C	D
A	1,0	1,0	5,0	4,0
B	1,0	1,0	5,0	4,0
C	0,2	0,2	1,0	0,5
D	0,3	0,3	2,0	1,0
Сумма S	2,5	2,5	13,0	9,5

Элементы матрицы $A=||a_{ij}||$ соответствуют преимуществам фактора i над j , что показывает, во сколько раз i важнее j в ландшафтном отношении. Элемент матрицы кодируется сочетанием номеров (i, j) или символов (A, C) (табл. 1). Например, по экспертной

оценке, в исследуемых ландшафтах преимущество $B > D$ отдается сублитоморфным рядам над субгидроморфными $a_{24}=4$; обратная величина $a_{42}=1/4=0,25$. Сравнение типа $A=A$ соответствует $a_{11}=1$. Матрица A формируется так, чтобы всегда $a_{ij}=1/a_{ji}$, что является одним из постулатов-аксиом МАИ.

В процессе дальнейшего преобразования матрицы A сначала находятся суммы $S=||S_j||$ ее элементов по столбцам j (табл.1), и на эти суммы делятся значения элементов соответствующих столбцов $b_{ij}=a_{ij}/S_j$; $B=||b_{ij}||$ – преобразованная матрица (табл. 2).

Затем рассчитываются средние значения суммы элементов по строкам новой матрицы. Набор $\rho=||\rho_i||$ средних по всем категориям A, B, C, D примерно соответствует главному собственному вектору этой матрицы (вектору приоритетов). Расчетное значение собственного значения $\lambda=S \cdot \rho$ – скалярное произведение векторов ($\lambda=4,04$). Точное сходство $\lambda=\lambda_m$ получается при решении уравнения $B\rho=\lambda_m\rho$ на собственное значение $\lambda_m=n$ и собственный вектор-столбец $\rho_m=||\rho_{mi}||$, где n – порядок матрицы A (число сравниваемых факторов).

Таблица 2. Преобразованная матрица парного сравнения и собственный вектор матрицы

	A	B	C	D	Сумма, ρ
A	0,41	0,41	0,38	0,42	0,41
B	0,41	0,41	0,38	0,42	0,41
C	0,08	0,08	0,08	0,05	0,07
D	0,10	0,10	0,15	0,11	0,12
Сумма	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

По степени отклонения расчетного вектора ρ от ρ_m и расчетного значения λ от $\lambda_m=4$ можно судить о точности экспертных оценок сравнения, согласованности суждений, сохраняющей приоритеты явлений по данному свойству (цели): $CI=(\lambda-n)/(n-1)$. Условие $CI=1$ выполняется при $a_{ik}a_{kj}=a_{ij}$ и для однородных показателей a_{ij} , т.е. при их независимости от масштаба t измерения $a_{ij}=y_j/y_i=ty_j/ty_i$ (позиции 3) и 4) в упомянутом списке основ МАИ). В данном случае $CI=0,012$, что соответствует соотношению $CR=10CI/RI < 1$, где $RI=0,9$ при $n=4$. Неравенство $CR < 1$ указывает на приемлемый результат сравнения факторов, что позволяет по максимальной величине ρ_i выбрать из рассматриваемых альтернатив самую лучшую i . Судя по результатам расчета, это $\rho_1=0,41$ (табл. 2), т.е. на рассматриваемой территории основным ландшафтно-образующим фактором является литологический, формирующий сублитоморфные и сублитогидроморфные условия развития.

1.3. Особенности применения. Приведенный алгоритм реализуется с использованием понятий и операций теории квадратных матриц A и B [1], каждый элемент которых a_{ij} и b_{ij} описывает парные связи факторов i и j , что наглядно можно представить в виде прямых a_{ij} и обратных a_{ji} связей $i - j$ вершин графа. Ставится и решается задача поиска собственных значений и векторов матрицы B из равенства $B\rho=\lambda\rho$, результаты решения которого интерпретируются соответствующим образом. Распространенный пример – корреляционная матрица $B=||b_{ij}||$, где b_{ij} имеет смысл парного коэффициента корреляции между нормированными и центрированными случайными величинами y_i и y_j . Решение задачи на собственные значения λ позволяет перевести систему координат исходных величин $y=||y_i||$ в систему независимых координат собственных векторов с расчетом степени информативности

λ каждой координаты, что реализуется в методе главных компонент. Известен метод анализа устойчивости объектов, описываемых системой линейных дифференциальных уравнений $dz/dt=Bz$ с матрицей $B=||b_{ij}||$ коэффициентов взаимного влияния. Набор собственных значений $\lambda=||\lambda_i||$ - коэффициентов независимых решений исходных уравнений – определяет устойчивость системы по отрицательному значению всех действительных частей комплексных чисел λ_i . Сходным образом формируется матрица переходных вероятностей, описывающая случайные марковские процессы смены состояний; собственный вектор $\lambda_m=1$ соответствует равновесному процессу.

Матрица сравнения Т.Л. Саати [4] имеет свою содержательную нагрузку и позволяет оригинальным способом использовать возможности матричного анализа для принятия решений в различных сферах деятельности. Метод интуитивно соответствует особенностям человеческого мышления, но вместе с тем применяемая математика недостаточно обосновывает алгоритм действия, что затрудняет понимание и содержательную интерпретацию результатов обработки данных. По этой причине в науке управления один из наиболее острых споров касается именно МАИ [18]. Дж. Дайер [10] резюмировал такую озабоченность специалистов, принимающих решения, и предложил для устранения недостатков МАИ использовать методы теории многофакторной полезности. В журнальной дискуссии П. Харкер и Л. Варгас [12] не приняли сравнение МАИ с теорией полезности. Считается, чтобы не возникали проблемы использования алгоритмов МАИ, необходимо понимать принципы МАИ и следовать их требованиям [21].

1.4. Формальные аналогии. В базовых положениях МАИ должно получить отражение, как действуют факторы на приоритеты альтернативных решений, как формируются рейтинги решений, отражающие важность факторов в виде оценочных функций. Матрица $A=||a_{ij}||$ создается по процедуре парных сравнений. Явным достоинством метода является то, что, имея матрицу значений парного сравнения A и не зная вид функции ранжирования $f(y)$, мы выполняем оценивание и выбираем лучший вариант решения. Для понимания того, как это происходит, как человеческий опыт и интуиция соотносятся с результатами математических расчетов, проводится дальнейший анализ.

Будем исходить из существования взаимной зависимости однотипных факторов – непрерывных переменных величин $y=||y_i||$, от которых зависят приоритеты решений $f(y)$, принимающие при определенном сочетании величин y конкретные значения $f(y)=f_0$. В этом случае элементы матрицы парного сравнения $A=||a_{ij}||$ задаются ненулевыми частными

производными $a_{ij} = -\frac{\partial y_j}{\partial y_i}$, рассматриваемыми в качестве норм замещения одного фактора y_i

на другой y_j при сохранении значения функции $f(y)=f_0$. Величина коэффициента a_{ij} показывает, на сколько положительно изменится y_j при изменении y_i на единицу. Такая общая постановка удовлетворяет логике МАИ при прямой a_{ij} и обратной $a_{ji} = 1/a_{ij}$ связях переменных просто в соответствии со свойствами частных производных; отсюда же $a_{ii} = 1$. Очевидно, величина y_i не может быть постоянной величиной, поэтому степень ее изменчивости становится основанием отбора для использования в парном сравнении.

Между разнокачественными показателями существует и различным образом проявляется при оценивании определенный порядок значимости (преимуществ) a_{ij} , которые в разных теориях представляют предельную норму замещения, например, предельная норма

технического замещения используется в экономической теории, как мера взаимозаменяемости факторов производства, показывающая, на сколько единиц можно уменьшить один из факторов y_j при увеличении другого фактора y_i на единицу, чтобы выпуск сохранялся неизменным $f(y)=f_0$ [2]. Предельная норма технического замещения факторов производства равна отношению их предельных производительностей (предельных продуктов), что в наших терминах обозначает:

$$a_{ij} = -\frac{\partial y_j}{\partial y_i} = \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} / \frac{\partial f(y)}{\partial y_j} \quad (2)$$

Для монотонно возрастающих с увеличением y функций $f(y)$ всегда $a_{ij}>0$, т.е. матрица $A=||a_{ij}||$ - положительная $a_{ij}>0$, обратно симметричная $a_{ji} = 1/a_{ij}$ и согласованная $a_{ik}a_{ki}=a_{ij}$. В соответствии с (2) $a_{ij}a_{ji}=1$, и в общем случае любое циклическое произведение n коэффициентов a_{ij} вида $a_{ik}a_{kj}a_{ji}=1$, поэтому определитель Якоби $|A|=0$, что указывает на зависимость переменных y_i . Кроме того, из (2) следует известное в МАИ соотношение элементов матрицы $A=||a_{ij}||$: $a_{ik}a_{ki} = a_{ij}$.

Аналогично (2) определяется предельная норма замещения в потреблении, что оценивается функцией полезности. Это количество товара y_j , которое потребитель готов отдать, чтобы получить единицу товара y_i , при условии, что совокупная полезность товарного набора для потребителя не изменяется $f(y)=f_0=\text{const}$. Фактически строятся кривые безразличия – это множество всевозможных комбинаций благ $y=||y_i||$, имеющих для потребителя одинаковую полезность $f(y)=\text{const}$ и по отношению к выбору которых он безразличен. Аналогом понятия кривой безразличия для производителя является изокванта – множество всевозможных комбинаций факторов производства, сохраняющих объем выпуска продукции. Прослеживается аналогия теории полезности и соотношений МАИ [10], что приводит к линейным и полилинейным зависимостям $f(y)$.

Для всякой гладкой, дифференцируемой функции $F(x)$ исходных переменных $x=||x_i||$ справедлива формула полного дифференциала:

$$dF(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial x_i} dx_i, G_i(x) = \frac{\partial F(x)}{\partial x_i}, \quad (3)$$

где $G_i(x)$ – частная производная, или чувствительность (факторная нагрузка) изменения функции $F(x)$ к изменению величины фактора x_i , например, предельная полезность или производительность. Если сравниваются две изменяющиеся переменные x_i и x_j , а остальные считаются постоянными $dx_k=0$, то уравнение (3) приводится к виду $dF = G_i(x)dx_i + G_j(x)dx_j$. Для

сохранения значения функции $F(x)=\text{const}$ при замещении факторов будет $\frac{dx_j}{dx_i} = -\frac{G_i(x)}{G_j(x)}$.

Подобное соотношение справедливо и для скоростей $dx_j/dx_i = v_j/v_i$ ($v_j=dx_j/dt$) или любых изменений по времени или направлениям. Если использовать вместо дифференциалов dx_i конечно-разностные приращения (сравнения) $y_i = x_i - x_{0i}$ (x_{0i} – норма, константа сравнения) получим парные отношения $a_{ij}=y_j/y_i$, соответствующие элементам матрицы $A=||a_{ij}||$. В данном случае предполагается существование линейной зависимости факторов $y_j = a_{ij}y_i$ при условии, что изменение остальных факторов не влияет, а величина $F(x)$ сохраняется.

При линеаризации уравнение (3) распространяется на случай конечных разностей

$$f(y) = F(x) - F(x_0) \text{ и } y_i = x_i - x_{0i}:$$

$$a) f(y) = \sum_{i=1}^n g_i y_i, \quad \delta) f(y) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} y_i, \quad g_i(y) = \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} = \frac{\partial F(x)}{\partial x_j}, \quad (4)$$

где $g_i(y)$ – частная производная, или чувствительность изменения функций $f(y)$ и $F(x)$ к изменению исходной x_i или смещенной y_i относительно постоянной x_{0i} величины. Выражение (4а) – билинейное уравнение по двум наборам переменных y и $g = \|g_i(y)\|$ – скалярное произведение $f = g \cdot y$. Дифференциальное уравнение Эйлера (4б) имеет решения в виде однородных функций первого порядка со свойством зависимости от масштаба t независимых переменных: $f(ty) = tf(y)$. По этой причине шкала сравнения y может иметь разные интервалы и масштабы изменчивости, что согласуется с положением 4) МАИ об однородности. По уравнению (4) осуществляется кластерная свертка значений y_i в оценочную функцию $f(y)$. Более того, эта свертка обладает иерархией показателей, общей для билинейных уравнений. Для этого необходимы способы разбиения совокупности факторов и альтернатив на малые группы – кластеры. В результате сложная задача ранжирования решений разбивается на несколько простых задач.

Такая возможность следует из следующих соотношений. Пусть $y_i(z)$ зависит от частных показателей $z = \|z_k\|$ в соответствии с уравнением (4б). В этом случае зависимость $f[y(z)]$ от z также удовлетворяет (4б):

$$f[y(z)] = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} y_i = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} \sum_{k=1}^m \frac{\partial y_i(z)}{\partial z_k} z_k = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} \frac{\partial y_i(z)}{\partial z_k} z_k = \sum_{k=1}^m \frac{\partial f[y(z)]}{\partial z_k} z_k. \quad (5)$$

Уравнение Эйлера (4б) в векторно-матричном выражении записывается так:

$$f(y) = \left\| \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} \right\| \cdot y^T, \quad \text{где } B_y = \left\| \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} \right\| - \text{вектор показателей чувствительности изменения}$$

оценочной функции $f(y)$ к изменению факторов y_i . Соотношение (5), основанное на этом уравнении, отображается следующим образом

$$f(y) = \left\| \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} \right\| \cdot \left\| \frac{\partial y_i}{\partial z_k} \right\| \cdot z^T,$$

где $B_{yz} = \left\| \frac{\partial y_i}{\partial z_k} \right\|$ – матрица чувствительности изменения y_i к z_k . Переменная $z_k(u)$, в свою очередь,

зависит от детальных показателей $u = \|u_l\|$ нижнего уровня. Тогда $f(y)$ может быть представлена в виде произведения векторов и матриц сравнения разных иерархических уровней:

$$f[y(z(u))] = B_y B_{yz} B_{zu} u^T. \quad \text{Такое произведение в МАИ называется полилинейной формой,}$$

предназначенной для синтеза значений приоритетов [4]. Это соотношение требует, чтобы рейтинги на более высоких уровнях иерархии могли быть первоначально определены независимо от рейтингов на более низких уровнях. Опубликованные примеры использования МАИ для оценки альтернатив по списку критериев предполагают реализацию этого принципа.

Решением уравнения (4б) являются различные однородные функции $f(y) = y_i \Phi(A)$ наборов первых интегралов $\varphi = \|\varphi_i\|$, $A = \|a_{ij}\|$ уравнения (4б) вида

$$a_{ij} = \frac{dy_j}{dy_i} = \frac{y_j}{y_i}; \quad \varphi_i = \frac{df}{dy_i} = \frac{f}{y_i}. \quad (6)$$

Первые интегралы – это инварианты системы (однородные координаты), описываемые уравнением (4б), т.е. на любом решении этой системы величины отношений (6) остаются постоянными. Понятно, что они связаны с элементами матриц парного сравнения a_{ij} и представляют некоторый идеальный (устойчивый) вариант показателей парного взаимодействия, от величины которых зависят результаты ранжирования $f(y) = y_i \Phi(A)$. В частности, для линейной функции $\Phi(A)$ получается

$$f(y) = y_i \sum_{j=1}^n w_j \frac{y_j}{y_i} = \sum_{j=1}^n w_j y_j \quad (7)$$

где w_i – константы интегрирования, в качестве которых можно принять весовые коэффициенты суммирования для каждого фактора y_i при нормировке $\sum_{j=1}^n w_j = 1$. При $w_i = 1/n$, функция (7) имеет смысл среднего арифметического значения для y_i . Функция любого среднего значения удовлетворяет билинейному уравнению (4) в силу ее однородности. Уравнение (7) используется в МАИ для синтеза оценок глобального приоритета $f(y)$ на основе показателей локальных приоритетов по всем факторам y_i . Такой метод позволяет ранжировать альтернативы решения и может быть использован для достижения согласия между экспертами путем «усреднения» или «взвешивания» имеющихся мнений.

Другой пример – степенная зависимость

$$f(y) = y_i \prod_{j=1}^n \left(\frac{y_j}{y_i} \right)^{w_j} = \prod_{j=1}^n y_j^{w_j}, \quad \sum_{j=1}^n w_j = 1. \quad (8)$$

Такой зависимостью описывается производственная функция и функция полезности Кобба-Дугласа [2]. Коэффициенты замещения при полной связи переменных для функций (7) и (8)

$$a_{ij} = -\frac{\partial y_j}{\partial y_i} = \frac{g_i}{g_j} = \frac{w_i}{w_j}, \quad a_{ij} = -\frac{\partial y_j}{\partial y_i} = \frac{g_i}{g_j} = \frac{w_i}{w_j} \frac{y_j}{y_i} \quad (9)$$

При парном сравнении $a_{ij} = dy_j/dy_i$ согласно (6) норма замещения для всех функций одна и та же $a_{ij} = y_j/y_i$.

1.5. Объединение частных оценок. Многие упомянутые базовые положения МАИ [4, 16] связаны с задачами синтеза оценок с помощью полилинейных форм, что дает возможность строить групповые решения. Решение этой задачи, как здесь показано, определено уравнениями Эйлера (4)-(5), свойства которых устанавливают определенный регламент формирования оценочных процедур и функций. Т.Л. Саати [4] перечислил желательные качества функций $f(y)$, объединяющих суждения $y = \|y_i\|$ n участников. Среди них выделяется свойство однородности функций $f(ty) = tf(y)$, удовлетворяющих уравнению (4б), которое также записывается в виде условия нормировки

$$\sum_{i=1}^n y_i \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} / f(y) = 1, \quad \sum_{i=1}^n y_i \rho_i(y) = 1, \quad \rho_i(y) = \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} / f(y). \quad (10)$$

Число таких функций $f(y)$ огромно, и необходимо определить дополнительные ограничительные требования МАИ.

Прежде всего потребовалось выполнение условия единогласия-целостности $f(y) = y$, согласно которому все участники высказывают одно и то же мнение $y \equiv y$, и оно, естественно,

становится мнением группы. Поскольку общий вид решения (4б) $f(\mathbf{y}) = y_i \Phi(\mathbf{A})$, данное свойство удовлетворяется автоматически, что наглядно видно на примере формул (7) и (8). Желательно также принять во внимание требование разделимости $f(\mathbf{y}) = f_1(y_1) f_2(y_2) \cdots f_n(y_n)$, по которому $f(\mathbf{y})$ представляется в виде произведения функций одной переменной $f_i(y_i)$ наподобие (8). В этом случае

$$f(\mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_i} y_i = \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^n f_j \frac{\partial f_i(y_i)}{\partial y_i} \frac{y_i}{f_i} = f(\mathbf{y}) \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_i(y_i)}{\partial y_i} \frac{y_i}{f_i},$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial f_i(y_i)}{\partial y_i} \frac{y_i}{f_i} = 1, \sum_{i=1}^n \frac{\partial \ln f_i(y_i)}{\partial \ln y_i} = 1, \frac{d \ln f_i(y_i)}{d \ln y_i} = w_i = \text{const}, f_i(y_i) = c_i y_i^{w_i}, \sum_{i=1}^n w_i = 1.$$

В итоге оценочная функция $f(\mathbf{y})$ при постоянных нормированных величинах w_i представлена произведением функций одной переменной $f_i(y_i) = c_i y_i^{w_i}$, т.е. фактически степенной функцией (8). Такое уравнение наиболее удобно для группового ранжирования с учетом приоритета каждого участника [4, 16].

Более общий подход можно обеспечить, если $f(\mathbf{y})$ рассматривать в качестве финслеровой метрики локального векторного пространства $\mathbf{y} = \|\mathbf{y}_i\|$, удовлетворяющей уравнению (4), за исключением центральной (тривиальной) точки $\mathbf{y} = 0$ [17]. Остальные p -однородные функции оценки $R[f(\mathbf{y})]$ рассматриваются, как монотонная трансформация функции $f(\mathbf{y})$, когда не меняется порядок предпочтений и при анализе можно работать с ее трансформированной формой, имеющей содержательный смысл и определяющейся формулой [9]

$$R[f(\mathbf{y})] = \sum_i \frac{\partial R[f(\mathbf{y})]}{\partial y_i} y_i = \sum_i \frac{\partial R[f(\mathbf{y})]}{\partial f} \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_i} y_i = \frac{\partial R[f(\mathbf{y})]}{\partial f} \sum_i \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_i} y_i = \frac{\partial R[f(\mathbf{y})]}{\partial f} f(\mathbf{y})$$

– при вычислении $R[f(\mathbf{y})]$ просто вносится поправка на значение функции $f(\mathbf{y})$. В итоге получается, что так или иначе гипотезы и расчеты в МАИ замыкаются на дифференциальные уравнения Эйлера.

1.6. Математические обоснования расчетов. Используя введенные понятия, реализуем алгоритм расчетов МАИ на примере n альтернативных факторов. Матрица сравнения $\mathbf{A} = \|a_{ij}\|$

формируется из ненулевых частных производных $a_{ij} = -\frac{\partial y_j}{\partial y_i}$, связанных с $f(\mathbf{y}) = f_0$

соотношением (2), подстановка которого дает матрицу отношений

$$\mathbf{A} = \left\| \begin{array}{cccc} \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_1} / \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_1} & \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_1} / \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_2} & \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_1} / \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_3} & \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_1} / \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_4} \\ \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_2} / \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_1} & 1 & -\frac{\partial y_2}{\partial y_3} & -\frac{\partial y_2}{\partial y_4} \\ \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_3} / \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_1} & a_{32} & 1 & a_{34} \\ \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_4} / \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_1} & a_{42} & a_{43} & 1 \end{array} \right\|$$

Здесь элементы матрицы представлены на различных стадиях преобразований. По технологии МАИ эта матрица $\mathbf{A} \mathbf{y}^T$ умножается на вектор-строку $\mathbf{y}^T = \|\mathbf{y}_i\|^T$, что дает вектор-строку, каждый элемент которой равен сумме значений элементов столбцов $\mathbf{A}$: $\mathbf{S} = \|\mathbf{S}_j\| =$

$\left\| f(\mathbf{y}) / \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_i} \right\|^T$. Разделив значения элементов столбцов a_{ij} матрицы $\mathbf{A}$ на эту сумму $b_{ij} = a_{ij}/S_j$,

получим матрицу $\mathbf{B} = \left\| \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_i} / f(\mathbf{y}) \right\|$, составленную из одинаковых столбцов $\mathbf{b}_i$. Произведение

$\mathbf{B}\mathbf{y}^T = \mathbf{e}^T$ – единичный вектор-строка $\mathbf{e}^T = \|1 \ 1 \ 1 \ 1\|$ свертывает информацию $\mathbf{B}$ по столбцам.

Произведение $\boldsymbol{\rho} = \mathbf{B}\mathbf{e}/4$ суммирует и делит на $n=4$ значения элементов $\mathbf{B}$ по строкам. Результат

$\boldsymbol{\rho} = \|\rho_i\|$ – итоговый вектор приоритетов – столбец $\boldsymbol{\rho} = \left\| \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_i} / f(\mathbf{y}) \right\|$ компонентов ρ_i , имеющих

смысл относительных чувствительностей оценочной функции $f(\mathbf{y})$ к изменению фактора y_i .

Сумма компонентов вектора равна $\boldsymbol{\rho}\mathbf{y}^T = 1$. Отношение приоритетов ρ_i/ρ_j в векторе $\boldsymbol{\rho}$ соответствует норме замещения факторов.

Произведение векторов $\lambda_m = \mathbf{S}\boldsymbol{\rho} = \left\| \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_i} / f(\mathbf{y}) \right\| \cdot \left\| f(\mathbf{y}) / \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_i} \right\|^T = 4$ – произведение

строки суммы $\mathbf{S}$ по столбцам матрицы $\mathbf{A}$ на столбец суммы по строкам матрицы $\mathbf{B}$. Значение $n=4$ – порядок матрицы $\mathbf{A}$, в данном случае главное и единственное собственное значение λ_m матрицы $\mathbf{A}$, удовлетворяющей равенству $\mathbf{A}\boldsymbol{\rho} = \lambda_m\boldsymbol{\rho}$.

1.7. Синтез приоритетов. Множество вопросов возникает в связи с 6-м положением МАИ, касающимся сохранения порядка или возможной инверсии порядка при реализации синтеза приоритетов $f(\mathbf{y})$ по приоритетам нижележащего уровня $y_i(\mathbf{z})$. Распределенный метод суммирования следует из (5) и (10):

$$1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{f(\mathbf{y})} \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_i} y_i = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{f(\mathbf{y})} \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_i} \sum_{k=1}^m \frac{\partial y_i(\mathbf{z})}{\partial z_k} \frac{z_k}{y_i},$$

$$1 = \sum_{i=1}^n \rho_i(\mathbf{y}) y_i \sum_{k=1}^m \rho_{ik}(\mathbf{z}) z_k, \quad \rho_i(\mathbf{y}) = \frac{\partial f(\mathbf{y})}{\partial y_i} / f(\mathbf{y}), \quad \rho_{ik} = \frac{\partial y_i(\mathbf{z})}{\partial z_k} / y_i.$$

При идеальном способе рассчитанные приоритеты $\rho_{ik}(\mathbf{z})$ нормируются (делятся) на максимальное значение $\rho_{im}(\mathbf{z})$ в группе $y_i(\mathbf{z})$. В распределенном варианте получается

$$1 = \sum_{i=1}^n \rho_i(\mathbf{y}) \rho_{im}(\mathbf{z}) y_i \sum_{k=1}^m \frac{\rho_{ik}(\mathbf{z})}{\rho_{im}(\mathbf{z})} z_k, \quad \text{а в идеальном: } 1 \neq \sum_{i=1}^n \rho_i(\mathbf{y}) y_i \sum_{k=1}^m \frac{\rho_{ik}(\mathbf{z})}{\rho_{im}(\mathbf{z})} z_k.$$

Понятно, что порядок приоритетов сохраняется, если величины $\rho_{im}(\mathbf{z})$ не зависят от номера группы i . В противном случае возникают инверсии порядка альтернатив.

1.8. Единичные значения. Скалярное произведение векторов равно $\boldsymbol{\rho}\mathbf{y}^T = 1$ в силу соотношения (10). В данном случае элементы вектора-строки сравнительных оценок $\mathbf{y} = \|y_i\|$ имеют произвольные значения y_i , но в МАИ все эти значения единичны $\mathbf{y} = \mathbf{e} = \|1 \ 1 \ 1 \ 1\|$, т.е. соответствуют минимальным величинам $y_i = 1$, что в аналоговой модели квантового осциллятора соответствует уровню нулевых колебаний ($p=1$) (см. рис.1). Судя по формулам (7)-(8), значение $f(\mathbf{y})$ будет также единично $f(\mathbf{y}) = 1$. Тогда элементы матрицы сравнения по уравнению (9) задаются отношением $a_{ij} = w_i/w_j$, где w_i – весовые или стоимостные коэффициенты. Абсолютная и относительная чувствительность изменения $f(\mathbf{y})$ к фактору y_i равна коэффициенту w_i . Это показывает, что итоговый вектор приоритетов $\boldsymbol{\rho} = \mathbf{w}$ равен весу (цене) факторов при $\mathbf{y} = \mathbf{e}$. Применение не единичных, а других постоянных значений $\mathbf{y} = \mathbf{y} > 1$ по

причине однородности функции $f(y)$ и условия единогласия дает $f(y)=y$, но при этом показатели сравнения – нормы замещения и относительной чувствительности – не изменяются. При $f(y)=1$ эта функция имеет минимальное значение, и чем меньше значения элементов результирующего вектора реализации МАИ – приоритетов $\rho = \left\| \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} / f(y) \right\|$ – к нулю, тем менее значим w_i соответствующий факторный критерий или альтернатива выбора y_i , на основании которых совершается выбор.

2. Обсуждение результатов. Векторно-матричные математические преобразования позволяют исследовать алгоритмы МАИ с позиции некоторых общих формальных оснований. Это дает возможность понять закономерности получения конечного результата оценки уровня доминирования ρ_i по исходным оценочным категориям y_i парного сравнения на базе фундаментальной шкалы [1, 9]. Помимо математических понятий и их свойств, формальный анализ использует в качестве своеобразной аксиомы билинейное дифференциальное уравнение Эйлера, признавая тем самым, что все оценочные функции $f(y)$ относятся к однородным функциям разного порядка. Остальные аксиомы МАИ оказываются следствием этих положений, научные источники которых необходимо определить.

2.1. Расслоение на множествах. При реализации процедур оценивания приходится сравнивать изучаемые явления с элементами числовых множеств и применять операции на множествах. Числовые множества (системы) – это множества натуральных (N), целых (Z), рациональных (Q), вещественных действительных (R), гипердействительных R^* и других видов чисел вместе с определёнными над этими множествами алгебраическими операциями и с заданным на множестве отношениями линейного порядка. В методологии МАИ первичной становится гипотеза существования порядка в иерархии способов достижения цели. В перечисленных числовых системах этот порядок существует, и каждому явлению можно сопоставить число x и числа, которые больше или меньше данного (рис.3). Меняя число, мы как бы переходим от одного явления к другому по гомотопическому пути, связывающему явления или события в пространстве или во времени. Абсолютную единственную координату x явления на числовой оси определить невозможно, но можно оценить относительное положение y явлений на соответствующей шкале сравнений $y=x-x_0$ – локальных координат. Особенности локального пространства описываются процедурами расслоения [7].

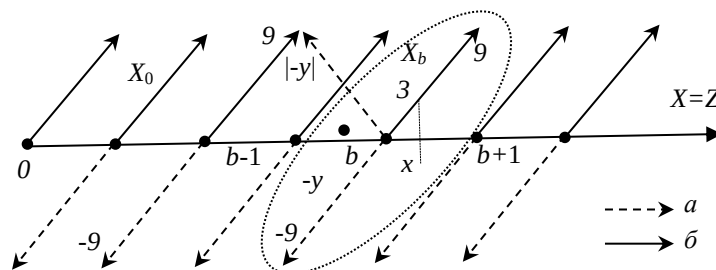


Рис. 2. Расслоенная структура числовых систем. Стрелками указаны отношения подчинения (a) и доминирования (b) относительно узлов базы расслоения $b \in B$ (разбиения на десятки $10b \pm 9$). Эллипсом выделена локальная окрестность элемента $b \in B$.

Расслоение в математике – это отображение $\pi: X \rightarrow B$, обратное которому $\pi^{-1}: b \rightarrow X$ развертывает элементы $b \in B$ в X в виде слоев X_b . В расслоении участвуют множество расслоения $X = \{x\}$, множество базы расслоения $B = \{b\}$, проекция расслоения π . Обратная проекция $\pi^{-1}: B \rightarrow X$ превращает X в результат расслоения – расслоенное множество $Y = \{X_b\}$, где $X_b \in X$ и $X_b \in Y$ – слой X_b над элементом базы $b \in B$ в X , и $Y = B \times X_0$ (X_0 – типовой слой). Каждый слой X_b объединяет элементы множества X в класс эквивалентности по признаку b . Через эти элементы b базы B , слои X_b и пространства X расслоения соприкасаются.

Формами расслоения – разбиения X на непересекающиеся подмножества X_b – являются процедуры сортировки, декомпозиции, типизации, систематики, классификации и т.д.. В МАИ явления и критерии группируются в кластеры-слои, упорядоченные в иерархию связей.

Примером расслоения $\pi: Z \rightarrow B$ является разделение целых чисел $x \in Z$ на десятки, т.е. деление на 10 с остатком или недостатком $x = 10b \pm u$ (рис.2), где $b \in B$ – номер десятка в последовательности, например, число x в окружении элемента базы $b = 23$ в слое $X_b = X_{23}$ равно $x = 10 \cdot 23 \pm 9$. Разность u принадлежит интервалу $[1, 9]$, как в методологии МАИ. Остаток $|+u|$ говорит о преобладании следующей позиции $b+1$ над b , а недостаток $|-u|$ – о преимуществах b над предшествующей в ряду позиций $b-1$ (по направлению стрелки). Разность между числами $|x_1 - x_2|$, относящимися к разным слоям b , может быть больше 9, поэтому преобладание рассчитывается по относительному положению чисел в соответствующих слоях, сходных с типовым интервалом $X_0 = [1, 9]$, например, числа $x_1 = 35$ и $x_2 = 12$ расположены в 3-м и 1-м десятках (слоях), и преобладание свойства $b = 3$ над $b = 1$ будет равно $5 - 2 = 3$. Формально сравнение проводится по модулю 10, т.е. $y = |x_1 - x_2| \bmod 10$, $y = |35 - 12| \bmod 10 = 23 - 10 \cdot 2 = 3$. Вся последовательность целых чисел $Z = B \times X_0$ построена на базе номеров десятков $b \in B$ и связанных с ними слоев $X_0 = [1, 9]$ (рис. 2).

Элементы базы $b \in B$ могут быть расположены разным способом, но путем их парного сравнения a_{ij} по МАИ можно воссоздать естественный непротиворечивый линейный порядок $b_j \rightarrow b_i$, *определив значения* $\rho_i \in (0,1)$ рейтинга собственного вектора ρ . В этом случае, единичный отрезок $X_0 = (0,1)$ – это типовой слой расслоения множества континуума действительных чисел R на базе множества целых чисел $b \in Z: x = b \pm 1$. Частные оценки u могут проводиться и в единицах $\rho_{ij} \in (0,1)$, например, понимая, с какой условной вероятностью ρ_{ij} состояние b_j переходит в состояние b_i .

Задачи могут ставиться и решаться с использованием различных числовых систем с применением соответствующих средств математического анализа. В рамках данного исследования для определения качественного превосходства u_i применяются натуральные N и целые Z числа, для оценки отношений $a_{ij} = y_j/y_i$ – рациональные числа Q , парного сравнения

вида $a_{ij} = -\frac{dy_j}{dy_i} = \frac{g_i(y)}{g_j(y)}$ – действительные числа R , а вида $a_{ij} = -\frac{\partial y_j}{\partial y_i}$ – гипердействительные

числа R^* нестандартного анализа. В разных типах выбранной числовой системы элементы сравнения считаются зависимыми или независимым величинами.

2.2. Расслоения на многообразиях. В качестве базы расслоения пространства используются гладкие многообразия M – это поверхности, локально похожие на евклидовы линейные пространства R^n размерности n . Поверхности задаются выпуклыми функциями

$F=F(x)$ переменных x в координатах $x=||x_i||$ ($i=1,2,...,n$) n -мерного объемлющего (тотального) пространства X . Расслоением называется четверка (X, M, π, T) , где X – пространство расслоения, M – база расслоения с непрерывной топологией, T – типовой (модельный) слой, $TM=M \times T = \{T_bM\}$ – расслоенное пространство. Проекция $\pi: X \rightarrow M$ ставит в соответствие каждой точке $b \in M$ касательный слой $T_bM \subset TM$, например, касательную (гипер)плоскость к поверхности M в точке b с координатами $x_b=||x_{bk}||$ в пространстве $X=R^n$. В структуре конкретного слоя T_bM выделяется индивидуальный центр – точка b с координатами $x_b=||x_{bk}||$ и ядро-карта V_b , соответствующая открытой окрестности этой точки, где имеется наибольшее сходство свойств многообразия и данного слоя T_bM . Остальное пространство слоя $T_bM \setminus V_b$ трактуется как периферия. Такие построения похожи на информационную технологию картографирования и индуцируют естественную структуру в отдельном картографическом слое типа «центр-периферия» [6].

В каждом слое формируется система локальных координат $y=||y_i||$, $y=x-x_b$, $y_i = x_i - x_{bi}$ с началом $y=0$ в точке касания b . В технологии МАИ в касательном слое, описывающем конкретную ситуацию x_b в терминах соответствующего числового множества, вокруг точки b формируется ядро с системой координат y , куда точка $y=0$ обычно не относится. Координатное ядро ограничено значениями $y < y_0$, в МАИ равными $y_0=9$. Оценочная структура ядра показана на рис. 1. Положение x_b объясняет все свойства слоя T_bM , которые выводимы из количественных и качественных характеристик позиции b . В этом смысле многообразие M является средой для всех явлений и процессов, совершаемых в каждом слое.

Уравнение касательной плоскости к поверхности многообразия $F=F(x)$ в локальных координатах y описывается линейным дифференциальным уравнением (4б) зависимости $f(y)$:

$$f(y) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} y_i. \quad (11)$$

В каждом касательном слое T_bM реализуется одно и то же универсальное уравнение (11), которое, как показано выше, лежит в основе аналитических преобразований МАИ. В силу этого расслоенное пространство $TM=\{T_bM\}$ и всякий слой T_bM линейно организованы и формируют векторное пространство взаимодействия. По этой причине, оперируя с оценочными показателями, их необходимо в первую очередь привести к линейному виду, что, в частности, делается по формуле логарифмирования (2). Среди предложенных шкал линейная шкала целых чисел от одного до девяти используется гораздо чаще в приложениях и реализуется в экспертизе. Т. Саати [15] обосновано отстаивал ее как наилучшую шкалу для представления весовых показателей.

Таким образом, математическим основанием МАИ являются геометрические процедуры расслоения на гладких многообразиях с формированием множества касательных слоев, в каждом из которых реализуются принципы МАИ. Согласно этим принципам, пространство сравнения положительно, линейно, ограничено, метризовано и организовано по уравнению (11).

2.3. Системное расслоение. Открытым остается вопрос о сквозном применении МАИ в разных областях науки и практики. Эта проблема также рассматривается и решается с точки зрения расслоения $\pi: X \rightarrow M$ знаний X о реальности на теоретические слои T_b на базе фундаментальных знаний M , включающих инварианты $b \in M$ разных теорий, на которых эти теории и соответствующие модели-суждения воспроизводятся [6]. Все теории T_b подобны

теории модельного слоя T – общей теории систем, по образцу которой они создаются. Расслоенное пространство $TM=M \times T$ как прямое произведение многообразия и типового слоя формируют структуру единой системной науки [8]. Понятия и аксиомы каждой специальной теории формируются по образцу структуры слоя расслоения на многообразиях среды в локальных координатах связи понятий, в которых среда не учитывается (чистое знание). В каждом теоретическом слое воспроизводится структура соответствующих числовых систем. Таким образом, расслоения одного типа послойно используют результаты расслоений другого типа в некоторой иерархической последовательности перехода от абстрактного уровня познания к конкретному. Универсальность МАИ означает возможность их использования в разных предметных слоях системных теорий с привлечением уравнений (11) касательных слоев и расслоений различных числовых систем, в которых осуществляется переход от систем всеобщей связи к парным сравнениям.

Заключение. В работах Т.Л. Саати предложены оригинальные алгоритмы альтернативного выбора решений на основе парных сравнений количественных критериев (показателей, факторов) по их относительному превосходству. Математические аспекты реализации МАИ оказались связаны с частными производными, отражающими предельную норму замещения одного фактора другим при сохранении величины оценочной функции. Эти понятия широко применяются в экономической теории и других областях системного знания, что обеспечило широкое распространение МАИ в приложениях.

Показано, что истинность аксиом аналитических процедур МАИ непосредственно определена свойствами дифференциальных уравнений Эйлера для однородных функций, которые связывают локальные координаты слоев линейного пространства расслоения на многообразиях – одного из вариантов математической технологии расслоения на базах разного содержания. В методологии МАИ прослеживаются расслоения числовых множеств, касательные расслоения на многообразиях и расслоения знаний на системные теории, что обеспечивает ее универсальное применение. Подчеркивается требование линейности пространства анализа и необходимость линеаризовать показатели в начале исследования. Затем надо переходить от исходных абсолютных показателей к относительным, формируя локальную систему координат тематического слоя (кластера) – пространства линейного, метрического и ограниченного.

Предлагаемый метатеоретический подход позволяет математически объяснить некоторые особенности применения МАИ, в частности, иерархическую организацию расчетов глобальных приоритетов по частным оценкам. Приоритеты оказываются относительными чувствительностями изменения оценочных функций, а их соотношения – нормами замещения факторов. Причем неизвестные целевые функции в МАИ рассматриваются на самом нижнем единичном уровне значений, который достигается при минимальной единичной величине факторов. Идеальный способ объединения приоритетов не следует применять в МАИ без опасности утраты точности расчетов (изменения ранга). Учет математических особенностей МАИ делает эту методику действительно универсальной и позволяет ее использовать в сочетании с другими методами количественных исследований и решения прикладных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Физматлит. 2010. 560 с.
2. Клейнер Г.Б. Производственные функции. Теория, методы, применение. М.: Финансы и статистика. 1986. 239 с.
3. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
4. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. М.: Издательство ЛКИ. 2008. 360 с.
5. Фролов А.А., Черкашин А.К. Микрозональная геоморфологическая дифференциация ландшафтов и степень серийности топогеосистем // География и природные ресурсы. 2019. № 1. С. 168 - 177.
6. Черкашин А.К. Метатеоретическое системное моделирование природных и социальных процессов и явлений в неоднородной среде // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 61-84.
7. Черкашин А.К. Инновационная математика: поиск оснований и ограничений моделирования реальности // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 69-87
8. Черкашин А.К. Единая наука о природе и обществе // Общество. Среда. Развитие. 2019. № 4. С. 3-11.
9. Черкашин А.К., Красноштанова Н.Е. Методика создания оценочных карт опасности кризисных ситуаций на основе картографической информации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 75-88.
10. Dyer J.S. Remarks on the analytic hierarchy process // Management science. 1990. V. 36. No.6. P. 249–258.
11. Emrouznejad F., Marra M. The state of the art development of AHP (1979–2017): a literature review with a social network analysis // International journal of production research. 2017. V.55. No.22. P. 6653-6675.
12. Harker P. T., Vargas L. G. Reply to remarks on the analytic hierarchy process by J. S. Dyer // Management Science. 1990. V.36. No. 3. P. 269–273.
13. Ishizaka A., Labib A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process // Expert systems with applications. 2011. V. 38. No. 11. P. 14336–14345.
14. Miller G. A. *The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information* // The psychological review. 1956. V. 63. P. 81—97.
15. Saaty T.L. Response to Holder’s comments on the analytic hierarchy process // Journal of the operational research society. 1991. V. 42. No. 10. P. 909-929.
16. Saaty T.L. The seven pillars of the analytic hierarchy process // Köksalan M., Zionts S. (eds). Multiple criteria decision making in the new millennium. Lecture notes in economics and mathematical systems. V. 507. Berlin, Heidelberg: Springer. 2001. P. 27-46.
17. Shen Z. Lectures on Finsler geometry. World scientific publishers. 2001. 256 p.
18. Smith J. E., Winterfeldt D. Decision analysis in management science // Management science. 2004. V.50. No 5. P. 561–574.
19. Thurstone L. L. A law of comparative judgement, reprint of an original work published in 1927 // Psychol. Rev.. 1994. P. 266–270.
20. Vaidya O.S., Kumar S. Analytic hierarchy process: An overview of applications // European journal of operational research. 2006. V.169. P. 1–29.
21. Whitaker R. Criticisms of the analytic hierarchy process: why they often make no sense // Mathematical and Computer Modelling. 2007. V. 46. P. 948–961.

UDK 51.7:519.816

**MATHEMATICAL ASPECTS OF IMPLEMENTING
THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS**

Alexander K. Cherkashin

Dr., Professor, Chief Researcher,

Head of the Laboratory "Theoretical geography"

V. B. Sochava Institute of Geography

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

664033, Russia, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya1, akcherk@irnok.net

Abstract. The article discusses current problems of forming metatheoretic foundations of modeling in the implementation of analytic hierarchy process (AHP), namely, issues of mathematical justification of the scale of judgments based on interrelated observations, pairwise comparisons of factors, criteria and alternatives, calculation of priorities and their synthesis in the final estimates. It is shown that the basic AHP rules (axioms) are directly related to the properties of partial derivatives that characterize the marginal rate of factors substitution, and to the Euler differential equation for homogeneous functions of many variables. At the metatheoretic level, these relationships are due to the procedures of fibering spaces and sets over elements of bundle bases with different contents. The AHP methodology is based on bundles of numerical sets, tangent bundles over manifolds, and knowledge bundles on system theories, which provides the universality of its application. Mathematical analysis of AHP procedures highlights the requirement of linearity of the research space and the need to linearize indicators at the beginning of data processing with a further transition from the initial absolute indicators to relative ones in order to form a local coordinate system of the tangent fiber (cluster) as local, linear, metric, and bounded space. The Euler equation relates the values of the coordinates of the local space of the tangent fiber in the form of metric dependencies as linear and nonlinear estimation functions known in AHP. To determine the preference scale at different levels of formalization, natural and integer numbers, rational numbers, real and hyperreal numbers of standard and nonstandard analysis are used. It is determined the restriction in AHP procedures, when having a matrix of paired evaluation and not knowing the type of ranking function, it is possible to calculate priorities and choose the desired solution. The calculated priorities are the relative factors sensitivities of the evaluation functions, and their ratios are the rates of substitution of the considered factors with unit values. Equations are derived for the synthesis of evaluation of the global priority based on local priorities across all criteria. The final evaluation function can be represented as a product of vectors and comparison matrices of different hierarchical levels (polylinear form).

Keywords. Analytic hierarchy process (AHP), mathematical framework, procedure of bundle, tangent bundle, Euler equation, evaluation functions, pairwise comparison matrix

References

1. Gantmaher F.R. Teoriya matric [Matrix theory]. M.: Fizmatlit. 2010. 560 p. (in Russian)
2. Klejner G.B. Proizvodstvennye funkicii. Teoriya, metody, primeneniye [Production function. Theory, methods, application]. M.: Finansy i statistika = Finance and Statistics. 1986. 239 p. (in Russian).
3. Saati T. Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij [Decision making. Analytic hierarchy process]. M.: Radio i svyaz. = Radio and communication, 1993. 278 p. (in Russian).
4. Saati T. Prinyatie reshenij pri zavisimostyah i obratnyh svyazyah: Analiticheskie seti [Decision-making with dependencies and feedbacks: Analytical networks]. M.: Izdatel'stvo LKI. 2008. 360 p. (in Russian)
5. Frolov A. A. Cherkashin A. K. Mikrozonol'naja geomorfologicheskaja differenciacija landshaftov i stepen' serijnosti topogeosistem [Microzonal geomorphological landscape differentiation and the degree of seriality of topogeosystems] // Geografija i prirodnye resursy = Geography and natural resources. 2019. V. 40. № 1. Pp. 90–98 (in Russian).
6. Cherkashin A.K. Metateoreticheskoe sistemnoe modelirovanie prirodnyh i social'nyh processov i yavlenij v neodnorodnoj srede [Metatheoretic system modeling of natural and social processes and phenomena in a heterogeneous environment] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2019. № 1 (13). Pp. 61-84. (in Russian)
7. Cherkashin A.K. Innovacionnaya matematika: poisk osnovanij i ogranichenij modelirovaniya real'nosti [Innovative mathematics: finding the foundations and limitations of reality modeling] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2019. № 2 (14). Pp. 69-87. (in Russian)
8. Cherkashin A.K. Edinaya nauka o prirode i obshchestve [Unified science of nature and society] // Obshchestvo. Sreda. Razvitie = Society. Environment. Development. 2019. № 4. Pp. 3-11. (in Russian)
9. Cherkashin A.K., Krasnoshtanova N.E. Metodika sozdaniya ocenochnyh kart opasnosti krizisnyh situacij na osnove kartograficheskoy informacii [Methodology for creating risk assessment maps of crisis situations based on cartographic information] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2019. № 4 (16). Pp. 75-88.
10. Dyer J.S. Remarks on the analytic hierarchy process // Management science. 1990. V. 36. № 6. Pp. 249–258.
11. Emrouznejad F., Marra M. The state of the art development of AHP (1979–2017): A literature review with a social network analysis // International journal of production research. 2017. V.55. № 22. Pp. 6653-6675.
12. Harker P. T., Vargas L. G. Reply to remarks on the analytic hierarchy process by J. S. Dyer // Management Science, 1990. V.36. № 3. Pp. 269–273.
13. Ishizaka A., Labib A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process // Expert systems with applications, 2011. V. 38. № 11. Pp. 14336–14345.
14. Miller G. A. *The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information* // The psychological review, 1956. V. 63. Pp. 81—97.

15. Saaty T.L. Response to Holder's comments on the analytic hierarchy process // Journal of the operational research society, 1991. V. 42. № 10. Pp. 909-929.
16. Saaty T.L. The seven pillars of the analytic hierarchy process // Köksalan M., Zionts S. (eds). Multiple criteria decision making in the new millennium. Lecture notes in economics and mathematical systems. V. 507. Berlin, Heidelberg: Springer. 2001. Pp. 27-46.
17. Shen Z. Lectures on Finsler geometry. World scientific publishers. 2001. 256 p.
18. Smith J. E., Winterfeldt D. Decision analysis in management science // Management science. 2004. V.50. № 5. Pp. 561–574.
19. Thurstone L. L. A law of comparative judgement, reprint of an original work published in 1927 // Psychol. Rev., 1994. Pp. 266–270.
20. Vaidya O.S., Kumar S. Analytic hierarchy process: An overview of applications // European journal of operational research, 2006. V.169. Pp. 1–29.
21. Whitaker R. Criticisms of the analytic hierarchy process: why they often make no sense // Mathematical and Computer Modelling. 2007. V. 46. Pp. 948–961.

САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ СЕТЕВЫЕ ЭКСПЕРТНЫЕ СРЕДЫ В УПРАВЛЕНИИ РЕГИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

Виноградов Геннадий Павлович,

профессор, wgp272ng@mail.ru;

Воронин Юрий Анатольевич,

аспирант, voronin@volsu.ru

Тверской государственный технический университет,

170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22

Аннотация. Задача системы управления регионом состоит в обеспечении повышения качества жизни проживающего населения путем использования техногенных систем различного уровня сложности, которые создаются для удовлетворения определенных потребностей, определяемых интересами. Концентрация промышленных объектов и усложнение в них технологических процессов, породило проблемы безопасности, роста риска техногенных катастроф. В этой связи проблема безопасности, качества жизни и т.п. должна рассматриваться в контексте интересов использования техногенных систем. *Цель работы:* разработка на основе концепции «приемлемого» риска подхода к управлению региональным развитием при соблюдении обязательного требования по обеспечению техногенной безопасности и качества жизни. Выполнено исследование проблемы принятия решений в активных самоорганизующихся системах, в которых мотивация людей порождает эндогенно цели функционирования. *Методы исследования:* общая методология и методы системного анализа, аналитического моделирования методы теории активных систем. *Результаты:* Предложен подход для оценки качества жизни, уровня безопасности в регионе и изучения складывающихся тенденций на основе использования активных методов и информационных технологий. Показано, что основой их построения являются самоорганизующиеся экспертные среды на базе современных сетевых и телекоммуникационных технологий. Разработана математическая постановка и модель принятия согласованных решений в задаче управления техногенной безопасностью. В отличие от известных подходов предложено для формирования представлений управляющего органа о состоянии объекта управления использовать дополнительные каналы получения информации от сетевых экспертных сред. Разработана концептуальная модель механизма самоорганизации таких сред.

Ключевые слова. Самоорганизация, региональное развитие, экспертная среда, самоорганизация, сетевые технологии, согласование представлений, безопасность

Цитирование: Виноградов Г.П., Воронин Ю.А., Самоорганизующиеся сетевые экспертные среды в управлении региональной техногенной безопасностью // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 1 (17). С. 25–39. DOI 10.38028/ESI.2020.17.1.002

Введение. Интенсивное развитие техносферы в регионах, следствием которого является концентрация промышленных объектов и усложнение в них технологических процессов, породило проблемы безопасности, роста риска техногенных катастроф и выбросов вредных веществ. Все эти проблемы связаны с качеством жизни [4–6]. Как показано в [9, 15, 17] экологическую и техногенную безопасность нельзя рассматривать как основную целевую детерминанту. Задача системы управления, например, регионом состоит в обеспечении выживания и повышения качества жизни проживающего населения путем использования техногенных систем различного уровня сложности, которые создаются для удовлетворения определенных потребностей, определяемых интересами. Тогда проблема безопасности, качества жизни и т.п. должна рассматриваться в контексте интересов использования техногенных систем. В этой связи цель стратегии устойчивого развития – определить способы адаптации к изменениям, вызванным техногенным развитием [11–14]. Это позволяет перейти к концепции «приемлемого» риска и обусловило появление нового подхода к управлению региональным развитием, состоящего в том, что удовлетворение материальных и духовных потребностей населения (качества жизни) должно осуществляться при соблюдении обязательного требования по обеспечению безопасности человека и окружающей его среды [3, 11].

В этих условиях функционирование системы управления региональным развитием должно быть основано на принципах дальновидности, согласованности, адаптивности и самоорганизации, что обеспечивается механизмом управления, определяющим взаимодействие всех субъектов системы [1, 8]. На практике это, в частности, выражается в составлении планов развития предприятий с учетом требований безопасности. При этом осуществляется соответствующая экономическая проработка не только по вопросам технического перевооружения и совершенствования технологических процессов, но и по выполнению компенсационных мероприятий в случае возникновения чрезвычайных ситуаций [1].

Важнейшими ресурсами для этого являются современные методы управления на основе информационных технологий и инноваций. Эффективность новых технологий управления зависит, прежде всего, от того, как люди с их помощью выявляют, воспринимают объективные признаки складывающихся ситуаций, строят оценки, формируют новое знание и на его основе вырабатывают новые формы поведения. Попытки применения известных методов для решения проблемы безопасности показали [13 – 15], что ее нужно рассматривать как проблему принятия решений в активных самоорганизующихся системах, в которых мотивация людей порождает эндогенно цели функционирования [7, 8]. В таких системах люди (в дальнейшем агенты) имеют свои цели, отражающие их интересы, а также возможности их достижения. Автономия при принятии решений, связанная с экономической и юридической ответственностью, общность целей предполагает согласование состояний агентов, субъективного понимания ими обстановки, целей, принимаемых решений, способов действия, получаемых возможных результатов системой в целом и каждым агентом.

В настоящее время развитие организационных систем во все большей степени переходит от эволюционного к проектному [5, 6, 10, 17]. Управление этим процессом предполагает сочетание казуального подхода (причинно-следственного) с телеологическим (целевая детерминация). Движущей силой развития становится деятельность, представленная множеством институциональных построений, ориентированных, прежде всего, на

совершенствование инновационной деятельности [10, 16]. Из них наиболее перспективной формой определения направления его использования становятся саморазвивающиеся сетевые экспертные среды [10]. Элементарной частью такой среды является эксперт-профессионал, владеющий современными телекоммуникационными технологиями, средствами Интернета. Интеграция в сетевой структуре естественных интеллектов образует коллективный стратегический субъект, который является средством синергии знаний и действий в процессе развития.

В связи с этим ведущим направлением в теории управления в настоящее время следует считать проблематику организации саморазвивающихся инновационных сред, составной частью которых являются самоорганизующиеся сетевые экспертные среды. Необходима разработка методологических основ организации подобных сред и управления ими. Центральным аспектом в этом становится оценка субъектами (в дальнейшем агенты) ценности, полезности нового знания и технологий, оценка рисков, определение механизма их исключения, соотнесения нового знания с целями и задачами развития. Это требует, в свою очередь, новых моделей формирования представлений агентов о предметной области при определении направления развития.

1. Математическая постановка и описание задачи принятия согласованных решений в задаче управления безопасностью

Существуют три основные области научного обеспечения безопасности в природно-техногенной сфере [11, 13]:

- теоретическая – получение новых знаний, понимания природы явлений, выработки рекомендаций по предупреждению аварийных ситуаций;
- прикладная – оценка степени устойчивости и продления ресурса безопасной эксплуатации стареющих технических объектов, проектирование и создание новых (по критериям безопасности) техногенных систем, а также получение своевременной упреждающей информации для принятия мер по снижению ущерба от стихийных бедствий;
- управленческая – разработка и внедрение элементов нормативно-законодательного и экономического регулирования и управления на региональном, отраслевом уровне.

Пусть задана иерархическая структура системы управления безопасностью перечислением входящих в нее агентов, описанием их прав и интересов, в соответствии с которыми они принимают решения. Кроме того, пусть определена регламентация процедур доступа, обработки и передачи информации. Будем считать, что возможности и права агентов в системе не одинаковы (что позволяет говорить об их неоднородности [8, 12]). Неоднородность проявляется в различной степени влияния агентов друг на друга.

Для целей анализа будем рассматривать базовую модель иерархической системы, состоящей из центра (агент верхнего уровня) и агентов нижнего уровня [3, 6] (рис. 1).

Согласно [16] разделим цели верхнего уровня условно на следующие группы:

1. Определение и согласование целей выживания и развития системы в целом в условиях неопределенности и динамики рынка;
2. Формирование согласованного восприятия внешней и внутренней среды системы;
3. Формирование согласованного представления о ситуации целеустремленного состояния

4. Разработка согласованного плана действий, учитывающего интересы всех подсистем;
5. Оптимизация по возможности обобщенных показателей эффективности функционирования системы, представляющих собой функции от параметров всех подсистем (агентов).

Решение последних двух задач может быть записано следующим образом [15, 16]:

$$(u, v) \in \Omega, \quad (1)$$

где u – управление центра, $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ – вектор управлений агентов, Ω – множество таких управлений, которые переводят систему в одно из состояний множества X (X – область желаемых состояний системы).

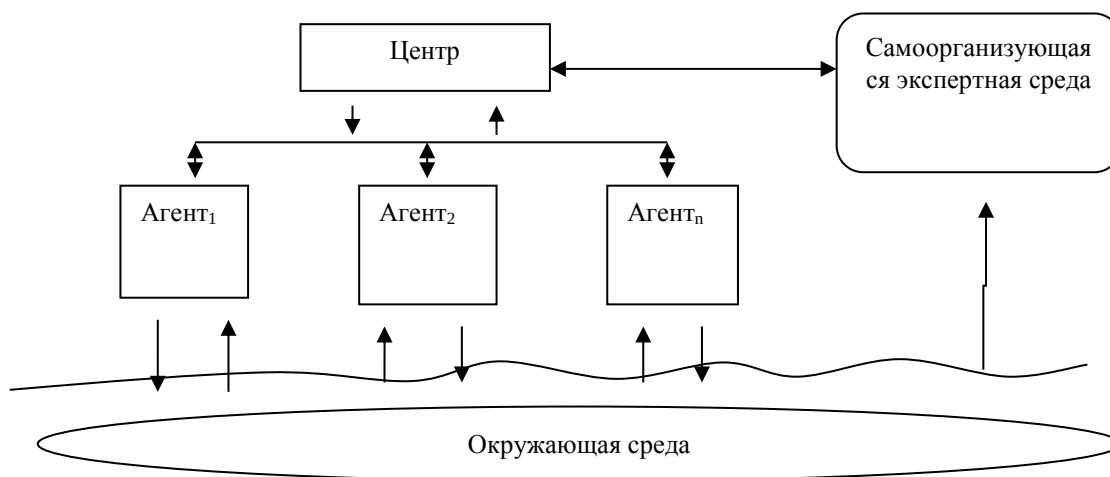


Рис. 1. Базовая иерархическая системы управления региональной безопасностью

Условие (1) может быть выполнено лишь на основе некоторой совокупности предположение о поведении и информированности всех агентов системы. Примем следующие предположения:

- 1) центр может сформулировать желаемое состояние системы в виде некоторого набора обобщенных показателей, которые являются функциями параметров агентов. Конкретные зависимости центру в общем случае неизвестны, но для их определения он может использовать данные прошлых периодов функционирования системы, информацию о результатах, полученных конкурентами в данном сегменте рынка и результаты сетевой экспертизы. Такое предположительное знание будем называть представлениями центра о возможностях агентов и направлении развития системы;
- 2) на основе представлений о возможностях агентов и желаемых состояниях центр определяет свое управление (план действий и информационный запрос) $u \in U$ и сообщает его агентам;
- 3) при известном управлении u i -й агент выбирает свое управление $v_i \in V_i(u_i)$, которое переводит его в состояние $y_i \in Y_i$, где Y_i – множество возможных состояний. Будем считать, что агенты взаимозависимы по выбору своих состояний. Это предполагает при выборе учет глобальных ограничений $Y^{2л}$. Следовательно, при выполнении условия (1) система может находиться в одном из следующих состояний

$Y = Y^{\mathcal{L}} \cap (\bigcap_{i=1}^n Y_i)$. Здесь $\bigcap_{i=1}^n Y_i$ – это множество, определяемое локальными

ограничениями, например, по объему выпуска, качеству, затратам и т.д.

- 4) пусть поведение агента соответствует гипотезе рационального поведения. Тогда выбор агента будет сделан так, чтобы максимизировать свой субъективно понимаемый критерий эффективности $G_i(u, v_i)$;
- 5) центр, в общем случае, приблизительно знает пространство управлений и критерии эффективности агентов, поэтому он должен для создания представлений о желаемых состояниях агентов организовать с ними обмен информацией. Для этого он запрашивает у агентов оценки выпуска продукции и услуг, объемов вредных выбросов, качества жизни населения y_i^* и желаемые состояния u_i , уточняет их интересы в окрестности полученного решения в обмен на стимулирование за получения встречной информации;
- 6) получив новую информацию, центр пересчитывает решение и задает новые вопросы агентам до тех пор, пока не будет получено точное или близкое к нему решение;
- 7) при наличии неопределенности факторов центр стремится в соответствие с принципом детерминизма снизить ее уровень за счет применения процедур, повышающих степень полезности своих представлений [5, 6].

Описанная модель формирования плана регионального развития предполагает, что агенты, как управляющие своими подсистемами, так и использующие ее на уровне своих представлений хорошо знают и «чувствуют» свои объекты управления и могут с достаточной степенью точности ответить на запросы центра.

Эти предположения позволяют определить множество допустимых управлений центра следующим образом

$$U^0 = \left\{ u \in U \mid V(u) = \bigcap_{i=1}^n V_i(u) \neq \emptyset, (u, v) \in \Omega, \forall v \in R(u) = \bigcap_{i=1}^n R_i(u) \right\}, \quad (2)$$

где $R_i(u) = \text{Arg} \max_{v_i \in V_i(u)} G_i(u, v_i)$.

Если у центра имеется критерий эффективности $F(u, v)$, то оптимальным гарантирующим управлением является такое $u^0 \in U^0$, что

$$F^0 = \sup_{u \in U^0} \inf_{v \in R(u)} F(u, v) \quad (3)$$

Общность интересов центра и агентов определяется условиями на суммарное вознаграждение

$$\sum_{i=1}^n \Xi_i(G(u_i, v_i) + F^0) \leq C(\bar{Y}) \quad (4)$$

где $\bar{Y}$ – «доход», получаемый регионом, $\Xi_i(\cdot)$ – оценки агентами удовлетворенности своего состояния, $C(\cdot)$ – оценки риска от техногенной деятельности.

Таким образом, при согласовании модели регионального развития в системе с не противоположными интересами необходимо рассматривать интеграционный тип возможного компромисса, поскольку величина распределяемого ресурса согласно (4) является величиной переменной, зависящей от их суммарных усилий. Поэтому цель согласования состоит в достижении суммарного выигрыша, и он может быть получен путем сообщения достоверной информации и совместным решением проблем. В системах, где агенты связаны общими интересами и целью, справедлив принцип запрета эгоизма, так как какой-либо агент может нанести ущерб системе, только если при этом он наносит ущерб себе.

Пусть объект управления i -го агента описывается уровнем затрат y_i^{ex} , уровнем выпуска y_i^{bly} (объемы выбросов вредных веществ также учитываются) и набором режимных параметров z_i , с помощью которых агент может влиять на ход процесса в своей предметной области. Тогда множество возможных состояний i -го агента можно определить следующим образом

$$Y_i = \left\{ y_i \mid \bar{y}_i^{ex} \leq y_i^{ex} \leq \bar{y}_i^{ex}, y_i^{bly} = w_i(y_i^{ex}, z_i) \in Y_i^{bly}, z_i \in Z_i \right\} \quad (5)$$

Задача (1-5) является задачей поиска максимина со связанными ограничениями.

Обозначим через $y_i^{bly} = w_i^*(y_i^{ex}, z_i) \in Y_i^{bly}$ представление агента о функционировании объекта управления, тогда

$$Y_i^* = \left\{ y_i \mid \bar{y}_i^{ex} \leq y_i^{ex} \leq \bar{y}_i^{ex}, y_i^{bly} = w_i^*(y_i^{ex}, z_i) \in Y_i^{bly}, z_i \in Z_i \right\} \quad (6)$$

можно рассматривать как субъективные представления агента о множестве возможных состояний. Очевидно, оно определяется его знанием, опытом.

В свою очередь центр может иметь собственное представление о возможностях агентов в виде

$$Y_i^* = \left\{ y_i \mid \bar{y}_i^{ex} \leq y_i^{ex} \leq \bar{y}_i^{ex}, y_i^{bly} = w_i^u(y_i^{ex}, z_i) \in Y_i^{bly}, z_i \in Z_i \right\} \quad (7)$$

В случае эффективных производств можно с достаточной степенью точности предположить выполнение гипотезы о полной информированности центра о возможностях, желаемых состояниях агентов и их продуктивности с точностью до параметров. Это означает, что центр располагает всей необходимой информацией о моделях V_i , $i = \overline{1, n}$ агентов, но не знает выбор агентов. В этом случае, как показано в [8], центр, используя это знание, рассчитывает управление $u^0 \in U^0$, а агент делает только один ход, выбирая свое состояние y_i и управление v_i из множества допустимых состояний $B_i(u_i) = Y_i(u_i) \cap Y_i$, пытаясь при этом максимизировать значение своей целевой функции [2]

$$G_i(u_i, v_i) \rightarrow \max_{v_i \in B_i(u_i)} . \quad (8)$$

Тогда результат выбора всех агентов определяется в этом случае как множество $R(D)$

всех ситуаций, где $D = Y^{2L} \cap \bigcap_{i=1}^n B_i(u_i)$ множество возможных состояний всей системы.

Варьируя управление $u = \{u_i, i = \overline{1, n}\}$, центр может проигрывать возможные сценарии поведения системы.

Пусть центр располагает неполной информацией о моделях $V_i, i = \overline{1, n}$ агентов, но считает их форму поведения рациональной. В этом случае он должен создать механизм получения информации не только от агентов, но и с помощью дополнительных каналов, например, путем создания сетевых экспертных сред и систем [1, 9, 14].

2. Механизм самоорганизации сетевых экспертных систем. Саморазвитие предполагает вовлечение через использование сетевых технологий продвинутых потребителей товаров и услуг в инновационный процесс улучшения качества жизни, получения идей или контента путем обращения к их креативным способностям в обмен на вознаграждение, соответствующее вкладу [9]. Для его реализации разработаны соответствующие технологии. Однако их прямая реализация приводит появлению большого количества информационного шума и мусора, содержащего, как правило, бездоказательные критические высказывания. Поэтому необходима система, обеспечивающая направление поиска решений и идей, а также обеспечивающая фильтрацию, обобщение информации, определение ее ценности и перспективности. Способом построения является синтез технологий краудсорсинга и сетевой экспертизы (рис. 2) [1, 10, 13, 14].



Рис. 2. Сетевая экспертиза на основе краудсорсинга

По сравнению с традиционными технологиями поиска решения эти два подхода обладают следующими преимуществами [13, 14]:

Самоорганизация. Создание идей, предложений по совершенствованию продукции и услуг практически неограниченным числом экспертов.

Независимость. Возможность получения информации, отражающей различные точки зрения с объяснением позиции.

Малобюджетность. Люди участвуют в подготовке предложений и выполняют оценки, как правило, безвозмездно или за небольшое вознаграждение, варьирование уровня вознаграждения в зависимости от результата.

Поскольку модели принятия решений в сетевой экспертизе должны строиться достаточно быстро, то задачи по извлечению информации, очистки и предварительной обработки (выделению признаков, семантическая кластеризация, построение онтологий и т.п.) необходимо выполнять средствами краудсорсинга.

Центр формирует запросы, оформляют их дизайн, дорабатывают семантическую кластеризацию и онтологию предметной области. Цикл взаимодействия центра с экспертами будет продолжаться до тех пор, пока вклад новой информации в рост полезности сформированных представлений будет несущественным. Полученная модель представлений предметной области используется для формирования модели способа действия. Анализ удовлетворенности от принятого решения позволяет корректировать как модель представлений, так и модель способа действия (решения).

3. Алгоритм построения агентом множества согласованных состояний.

Как известно, общие принципы мышления субъекта включают три основные фазы. Восприятие, в процессе которого осуществляется построение модели-представления о ситуации [2, 7, 17]. Познание, когда формируется сценарий действий субъекта для достижения поставленных целей. Исполнение, в процессе которого происходит реализация намеченного сценария с постоянным сопоставлением ожидаемых и наблюдаемых результатов [7]. Это позволило предложить модель обстановки, воспринимаемой субъектом.

Агент, обладая более детализированной информацией, может при создании центром более привлекательных условий u_k путем решения задачи (8) определять для себя такой вектор $x_k^{(h)}$, который позволяет расширить множество $X_k^{(h)}$ представлений центра о его возможностях, h – шаг итерационного процесса. Примем, что агент демонстрирует свойство рационального поведения [2].

Обозначим через $\omega_k = \{\omega_k^{(h)}, h = \overline{1, H}\} \in A_k$ – вектор параметров состояния, определяющий значения вектора действий $x_k^{(h)} = \{x_{kj}^{(h)}, j \in \overline{1, m_k}\} \in X_k^{(h)}$. Можно считать, что этот вектор описывает знание агента возможностей контролируемого им объекта управления. Здесь A_k – множество возможных значений вектора состояния. Будем считать, что агент обладает способностями, знаниями, которые гарантируют существование $\Psi_k: A_k \rightarrow X_k^{(h)}$.

Доступный агенту уровень знаний о конструктивных особенностях потребляемой продукции и услуг делают справедливым предположение о существовании для k -го агента предельного множества параметров состояния. Обозначим через

$O_k^* = \{o_k^* | o_k(x_k), x_k \in X_k^{(h)}(\omega_k^{(h)}), \omega_k^{(h)} \in A_k\}$ – множество достижимости или множество предельных возможностей.

Будем предполагать, что агент за счет своих креативных способностей, способности к самообучению и поиску новой информации при соответствующем стимулирующем воздействии центра способен определять такие состояния $\omega_k^{(1)} \in A_k$ и $\omega_k^{(2)} \in A_k$, что возможно $\omega_k^{(2)} \succ \omega_k^{(1)}$, где символ $\succ$ означает «более значимо» и при этом $X_k^{(1)}(\omega_k^{(1)}) \subseteq X_k^{(2)}(\omega_k^{(2)})$. Следовательно, существует такая последовательность $\omega_k^{(1)}, \omega_k^{(2)}, \omega_k^{(3)}, \dots$, что $\lim_{h \rightarrow \infty} o_k^{(h)}(x_k^{(h)}(\omega_k^{(h)})) = O_k^*$. То есть агент путем изучения объекта управления способен определить его предельные возможности для достижения желаемого состояния [10]. Последовательность $\omega_k^{(1)}, \omega_k^{(2)}, \omega_k^{(3)}, \dots$ будем называть последовательностью вскрытия резервов от потенциальных конструктивных решений за счет их доработки и упрощения в обслуживании.

Такая способность агента формировать расширяющееся множество способов действия позволяет определить следующие свойства целевой функции агента и областей достижимости:

$$\forall \omega_k^{(1)}, \omega_k^{(2)} \in A_k, \omega_k^{(2)} \succ \omega_k^{(1)}, X_k^{(1)}(\omega_k^{(1)}) \subseteq X_k^{(2)}(\omega_k^{(2)}) \mapsto E\varphi_k(x_k^{(2)}) > E\varphi_k(x_k^{(1)})$$

Это условие означает, что поведение агента при выполнении принципа рациональности соответствует закону повышающихся потребностей, который в литературе по психологии поведения определяет мотивированность и целеустремленность агента.

В реальных условиях агент при превышении некоторого порога значимости $\Delta = E\varphi_k(x_k^{(2)}) - E\varphi_k(x_k^{(1)})$ изменения ценности ситуации целеустремленного состояния по результату способен идентифицировать предпочтительные способы действия и видит открывающиеся возможности при изменении структуры своей информированности (знания).

Выработка решения при таком подходе заключается в реализации совокупности последовательных процедур, предназначенных для поиска промежуточных решений, на основании которых агент уточняет свои возможности и формирует окончательное решение. Полный цикл его формирования k -м агентом состоит в выполнении следующих шагов на этапе h [16]:

1. Формирование множеств A_k и $X_k^{(h)}$ на основе знаний, опыта, интуиции и располагаемой информацией о параметрах состояния $\omega_k^{(h)}$. Просмотр множества A_k и формирование точки $O_k^{(h)*} = \{o_k^{(h)*} | o_k^{(h)*}(x_k^{(h)}), x_k^{(h)} \in X_k^{(h)}(\omega_k^{(h)}), \omega_k^{(h)} \in A_k\}$. Проверка, существует ли $x_k^{(h)*}$ такое, что $o_k^{(h)}(x_k^{(h)*}) = o_k^{(h)*}$. Если – да, то $x_k^{(h)*}$ – это компромиссное решение, а $o_k^{(h)*}$ – прогнозируемая ситуация, в противном случае переход к п.2.

2. Решение задачи поиска потенциально-предпочтительного набора действий $x_k^{(h)*} \in X_k^{(h)}(\omega_k^{(h)})$, позволяющего сформировать вектор $\bar{o}_k^{(h)}$ предельных значений критериев при использовании имеющегося на данный момент знания о правиле $\Psi_k^{(h)}$ и структуре множества A_k . Так как компоненты $\bar{o}_{ki}^{(h)}, i = \overline{1, N}$ порознь достижимы, а вместе – нет, то делается попытка найти компромиссное решение. Если агент не согласен попытаться найти компромиссное решение за счет компенсаторных уступок по каждому критерию, которые несколько хуже решения $\bar{o}_k^{(h)}$, то переход к п. 3, иначе к п. 5.

3. Исследование направлений возможного расширения множества A , организация процедур поиска новой информации (знания) о $\omega_k^{(h)} \in A_k$ и правиле $\Psi_k: A_k \rightarrow X_k^{(h)}$.

4. Если расширение множества A_k возможно, то переход к п. 1, иначе фиксация ситуации, что компромиссное решение не может быть найдено при выбранном векторе $\bar{o}_k^{(h)*}$.

5. Получение сведений от агента достаточных для определения вектора $\underline{o}_k^{(h)} \prec \bar{o}_k^{(h)*}$, где $\underline{o}_k^{(h)}$ минимальные требования агента к принимаемым им во внимание результатам.

6. Выполнение процедуры поиска минимально-предпочтительной точки в пространстве критериев по направлению предпочтения $\underline{o}_k^{(h)}, \bar{o}_k^{(h)*}$, определение вектора $\omega_k^{(h)*} \in A_k$ и $x_k^{(h)*} \in X_k^{(h)}(\omega_k^{(h)*})$ – минимального значения плановых показателей, соответствующих значениям компонент вектора $\underline{o}_k^{(h)}$.

7. Если полученные значения для $x_k^{(h)*}, \underline{o}_k^{(h)*}$ принимаются как компромиссное решение, то процедура останавливается, в противном случае переход к п. 8.

8. Для ограничений на $\underline{o}_k^{(h)}$ определяется приоритетная координата $i \in \overline{1, N_k}$, по которой делается расширение множеств A_k и $X_k^{(h)}$, так чтобы $\bar{o}_{ki}^{(h)}(x_k^{(h)}) = \bar{o}_{ki}^{(h)} + \Delta_{ki}^{(h)}$, где $\Delta_{ki}^{(h)}$ минимально возможное улучшение, которое является значимым для агента и определяется по его высказываниям о “гибкости” ограничения на основе выполнения процедур поиска дополнительной информации. Переход к п. 1.

Описанный алгоритм использует три типа механизмов, применение которых порождает интерактивный процесс для построения компромиссного решения.

Механизм анализа – это механизм, с помощью которого агент в момент r обрабатывает сведения, полученные на шаге $r-1$ для построения множеств P_k и X_k с целью определения x_k, y^{O*}, c^*, z^* . Здесь сопоставляются результаты, полученные на момент r с результатами на

шаге $r-1$. формируется представление о значениях вектора o^{O*} и значений уступок по его компонентам. Строится предварительное представление о желательных значениях показателей $E\phi_k(o(y^{O*}))$ и $EE_k(o(y^{O*}))$.

Механизм целеполагания – это механизм, который по результатам анализа определяет условия возможности достижения желательных значений $x_k, y^{O*}, c^*, z^*, E\phi_k(o(y^{O*})), EE_k(o(y^{O*}))$. Рассчитывается идеальная точка в пространстве оценок o , связанная с множествами P_k и X_k – это точка $\bar{o}^*$, имеющая координаты $\bar{o}_i^* = \max_{p \in P_k, x \in X_k} o_i(x(p))$, $i = \overline{1, L}$. То

есть $\bar{o}^*$ – наибольшее значение оценки по координате i , которое может быть получено с помощью намеченных действий. Эта точка образует центр области поиска предпочтительных состояний. Если при найденном значении координат точки $\bar{o}^*$ ограничения не выполняются, то агент рассматривает возможность расширения множеств P_k, X_k и C_k за счет включения дополнительных переменных, осуществления структурных изменений и т.п. для ослабления наиболее жестких ограничений так, чтобы выполнялось включение $P_k(r) \subseteq P_k(r+1)$ и $X_k(r) \subseteq X_k(r+1)$. Если это невозможно, то формируется сведения о координатах $\bar{o}_i^* < o_i$ точки $\bar{o}_i^* \neq o_i$, которая была бы достижимой и лучшим компромиссом в окрестности точки $\bar{o}^*$. Путем минимизации потерь $\sum_{i=1}^L |o_i - o_i^{O*}|$ определяются величины $p_i = o_i - o_i^{O*} \neq 0$ примерно эквивалентные, небольшие и значащие для агента.

Механизм самоорганизации – это механизм, который приводит к получению знаний о правилах Δ и Ψ для расширения множеств P_k, X_k и C_k . Он может иметь различные формы: 1) проведение экспериментальных исследований на объекте с целью улучшения своего представления о его функционировании; 2) анализ обстановки v_{-k} ; 3) привлечение экспертов для подготовки рекомендаций по улучшению режимов ведения процесса; 4) процедуры опроса персонала; 5) процедуры голосования и т.п.

Выводы. В статье приведены соображения, являющиеся основанием для перехода от простого сбора информации для оценки уровня безопасности и риска и пассивного изучения складывающихся тенденций на использование активных методов. Основой их построения следует считать создание самоорганизующихся экспертных сред на базе современных сетевых и телекоммуникационных технологий. Такой подход означает также активное использование различных средств информационного управления для создания соответствующих информационных структур при продвижении региональных программ развития. Эффектом от применения предлагаемой технологии может быть расширение степени привлечения населения к решению проблем регионального развития в цифровой экономике.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта №17-01-00728 «Моделирование принятия решений интеллектуальным агентом с выбираемыми моделями представлений об окружении, структуры интересов и предпочтений»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеева З. К., Лепский В. Е., Райков А. Н., Ильин Н. И., Колин К., Зацаринный А., Малинецкий Г. и др. Стратегическое целеполагание в ситуационных центрах развития / Рук.: В. Е. Лепский. М. : Когнито-Центр, 2018. 320 с.
2. Автономов В.С. Модель человека в экономической науке. СПб.: Экономическая школа. 1998. 230 с.
3. Андронникова Н.Г., Баркалов С.А., Бурков В.Н. Котенко А.М. Модели и методы оптимизации региональных программ развития. М.: ИПУ РАН. 2001. 60 с.
4. Багриновский К.А., Лемешев М.Я. О планировании экономического развития с учетом требований экологии // Экономика и математические методы. 1976. № 4. С. 681 – 691.
5. Бурков В.Н., Щепкин А.В. Экологическая безопасность. М.: ИПУ РАН. 2003. 92 с.
6. Бурков, В.Н., Д.А. Новиков, А.В. Щепкин Механизмы управления эколого-экономическими системами / Под ред. академика С.Н. Васильева. М.: Издательство физико-математической литературы. 2008. 244 с.
7. Виноградов Г.П., Кузнецов В.Н. Моделирование поведения агента с учетом субъективных представлений о ситуации выбора // Искусственный интеллект и принятие решений. № 3. С. 58-72.
8. Виноградов, Г.П. Методы и алгоритмы принятия решений в автоматизированных системах управления производствами с непрерывной технологией на основе субъективных представлений: монография. Тверь: ТГТУ. 2013. 256 с.
9. Виноградов Г.П., Виноградова Н. Г. Самоорганизующиеся сетевые экспертные среды в системах с эндогенным принципом целеуказания // Онтология проектирования. 2016. Т. 6. № 1(19). С. 39-54. DOI: 1018287/223–9537–2016–6–1–39–54.
10. Виноградов Г.П., Палюх Б.В. Механизмы управления эволюцией организационно-технологической системы // Программные продукты и системы. № 2. С. 3–8.
11. Глобальные проблемы как источник чрезвычайных ситуаций. (Доклады и выступления международной конференции. М.: УРСС. 1998
12. Новиков, Д. А. Математические модели формирования и функционирования команд. М.: Физматлит. 2008.
13. Райков А.Н. Конвергентное управление и поддержка решений. М.: Издательство ИКАР. 2009. 245 с.
14. Райков А.Н. Компьютерная поддержка рефлексивных процессов в управлении. Сб. "Психология и ее приложения". Ежегодник Российского психологического общества. Т. 9. Вып. 1. М. 2002. С. 52 - 53.
15. Шубенкова А.Ю., Райков А.Н., Ефимов А.Б. Оптимизация распределения полномочий в рамках региональной информатизации // Информационное общество. 2015. № 2-3. С. 68-79.
16. Gubanov, D., Korgin, N., Novikov, D., Raikov, A. E-Expertise: Modern Collective Intelligence, Springer. Series: Studies in Computational Intelligence, Vol. 558, 2014, XVIII, 112 p.
17. Vinogradov, G. Decision Making based of Subjective Conceptions of Decision situation / Vinogradov G. // Interactive Systems and Technologies:the Problems of Human-Computer Interaction. Collection of Scientific papers. Uljanovsk. 2011. Pp. 403-414.

SELF-ORGANIZING NETWORK EXPERT ENVIRONMENTS IN THE MANAGEMENT OF REGIONAL TECHNOGENIC SECURITY

Gennady P. Vinogradov,

Professor, wgp272ng@mail.ru

Yuri A. Voronin,

graduate student, voronin@volsu.ru

Tver State Technical University,

170026, Tver, emb. Afanasiy Nikitin, 22

Abstract. The task of the regional management system is to ensure the improvement of the quality of life of the living population by using man-made systems of various levels of complexity, which are created to meet certain needs determined by interests. The concentration of industrial facilities and the complexity of technological processes in them has created safety problems and increased risk of man-made disasters. In this regard, the problem of safety, quality of life, etc. should be considered in the context of the interests of using man-made systems. Objective: to develop an approach to managing regional development based on the concept of "acceptable" risk, while complying with the mandatory requirement to ensure technological safety and quality of life. A study of the problem of decision-making in active self-organizing systems in which people's motivation generates endogenous goals of functioning is performed. Research methods: General methodology and methods of system analysis, analytical modeling methods of the theory of active systems. Results: an approach is proposed for assessing the quality of life, the level of security in the region and studying emerging trends based on the use of active methods and information technologies. It is shown that the basis of their construction is self-organizing expert environments based on modern network and telecommunication technologies. A mathematical formulation and model for making coordinated decisions in the problem of technogenic safety management is developed. In contrast to the known approaches, it is proposed to use additional channels for obtaining information from network expert environments to form representations of the governing body about the state of the control object. A conceptual model of the mechanism of self-organization of such environments is developed.

Keywords. Self-organization, regional development, expert environment, self-organization, network technologies, coordination of views, security

Acknowledgments. The study was carried out with the financial support of the Russian Fund of Basis Research in the framework of the project № 17-01-00728 "Modeling decision-making by an intelligent agent with selectable models of ideas about the environment, structure of interests and preferences"

References

1. Avdeeva Z. K., Lepskij V. E., Rajkov A. N., Il'in N. I., Kolin K., Zaccarinnyj A., Malineckij G. i dr. Strategicheskoe celepolaganie v situacionnyh centrakh razvitiya [Strategic goal setting in situational centers of development] / Ruk.: V. E. Lepskij. M. : Kognito-Centr = Hands: V.E. Lepsky. M.: Cognito-Center. 2018. 320 p. (in Russian)
2. Avtonomov V.S. Model' cheloveka v ekonomicheskoy nauke [The model of man in economic science]. SPb.: Ekonomicheskaya shkola= SPb.: Economic School. 1998. – 230 p. (in Russian)
3. Andronnikova N.G., Barkalov S.A., Burkov V.N. Kotenko A.M. Modeli i metody optimizatsii regional'nyh programm razvitiya [Models and methods for optimizing regional development programs]. M.: IPU RAN = M.: Institute for Control Problems of the RAS. 2001. – 60 p. (in Russian)
4. Bagrinovskij K.A., Lemeshev M.YA. O planirovanii ekonomicheskogo razvitiya s uchetom trebovanij ekologii [On planning economic development taking into account environmental requirements] // Ekonomika i matematicheskie metody = Economics and Mathematical Methods. 1976. № 4. Pp. 681 – 691 (in Russian)
5. Burkov V.N., Shchepkin A.V. Ekologicheskaya bezopasnost' [Environmental Safety]. – M.: IPU RAN = M.: Institute for Control Problems of the RAS. 2003. 92 p. (in Russian)
6. Burkov, V.N., D.A. Novikov, A.V. Shchepkin Mekhanizmy upravleniya ekologo-ekonomicheskimi sistemami [Control mechanisms of ecological and economic systems] / Pod red. akademika S.N. Vasil'eva. / M.: Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury = Ed. academician S.N. Vasiliev. M.: Publishing house of physical and mathematical literature. 2008. 244 p. (in Russian)
7. Vinogradov G.P., Kuznecov V.N. Modelirovanie povedeniya agenta s uchetom sub"ektivnyh predstavlenij o situacii vybora [Modeling agent behavior taking into account subjective ideas about the situation of choice] // Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij = Artificial Intelligence and Decision Making. № 3. Pp. 58-72 (in Russian)
8. Vinogradov, G.P. Metody i algoritmy prinyatiya reshenij v avtomatizirovannyh sistemah upravleniya proizvodstvami s nepreryvnoj tekhnologiej na osnove sub"ektivnyh predstavlenij: monografiya [Decision-making methods and algorithms in automated production control systems with continuous technology based on subjective representations: a monograph]. Tver': TGTU, 2013. 256 p. (in Russian)
9. Vinogradov G.P., Vinogradova N. G. Samoorganizuyushchiesya setevye ekspertnye sredy v sistemah s endogennym principom celeukazaniya [Self-organizing network expert environments in systems with the endogenous principle of target designation] // Ontologiya proektirovaniya = Design Ontology. 2016. T. 6. № 1(19). Pp. 39-54. DOI: 1018287/223–9537–2016–6–1–39–54 (in Russian)
10. Vinogradov G.P., Palyukh B.V. Mekhanizmy upravleniya ehvoljutsiej organizatsionno-tekhnologicheskoy sistemy [Mechanisms for managing the evolution of the organizational and technological system] // Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems. № 2. Pp. 3–8 (in Russian)
11. Global'nye problemy kak istochnik chrezvychajnyh situacij. (Doklady i vystupleniya mezhdunarodnoj konferencii) [Global issues as a source of emergency. (Papers and speeches of an international conference)]. M.: URSS, 1998 (in Russian)

12. Novikov, D. A. Matematicheskie modeli formirovaniya i funkcionirovaniya komand [Mathematical models of the formation and functioning of teams]. M.: Fizmatlit. 2008 (in Russian)
13. Rajkov A.N. Konvergentnoe upravlenie i podderzhka reshenij = Converged management and decision support]. M.: Izdatel'stvo IKAR = M.: Publishing house IKAR. 2009. 245 p. (in Russian)
14. Rajkov A.N. Komp'yuternaya podderzhka reflektivnyh processov v upravlenii/ v sb. "Psihologiya i ee prilozheniya". Ezhegodnik Rossijskogo psihologicheskogo obshchestva [Computer support for reflexive processes in management. Sat "Psychology and its applications". Yearbook of the Russian Psychological Society]. T. 9, vyp. 1 = Vol. 9. Issue 1. M.: 2002. Pp. 52 – 53 (in Russian)
15. Shubenkova A. Yu., Rajkov A. N., Efimov A. B. Optimizaciya raspredeleniya polnomochij v ramkah regional'noj informatizacii [Optimization of the distribution of full powers in the framework of regional informatization] // Informacionnoe obshchestvo = Information Society. 2015. № 2-3. Pp. 68-79 (in Russian)
16. Gubanov, D., Korgin, N., Novikov, D., Raikov, A. E-Expertise: Modern Collective Intelligence. Springer. Series: Studies in Computational Intelligence. Vol. 558. 2014. XVIII, 112 p.
17. Vinogradov, G. Decision Making based of Subjective Conceptions of Decision situation // Interactive Systems and Technologies: the Problems of Human-Computer Interaction. Collection of Scientific papers. Uljanovsk. 2011. Pp. 403-414.

ПАТТЕРНЫ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ СИСТЕМАМИ

Виноградов Геннадий Павлович, профессор, wgp272ng@mail.ru

Прохоров Алексей Александрович, зав. отделением, forworkap@mail.ru

Шепелев Георгий Андреевич, аспирант, shepelevgeorg@gmail.com

ЗАО НИИ Центрпрограммсистем, 170024 г. Тверь, пр. 50 лет Октября, 3а

Аннотация. Роботизированный комплекс (РТК) следует рассматривать, как киберфизический объект, представляющий собой информационно связанную совокупность физических компонентов, бортовых измерительных систем, бортовых исполнительных систем, бортовой вычислительной системы, где реализованы алгоритмы управления, и пункта управления с информационно-управляющим полем. Такой объект должен обладать свойством самодостаточного поведения, гарантирующего выполнения некоторой миссии. Требование интеллектуализации поведения заставляет пересмотреть логические и математические абстракции, положенные в основу построения их бортовых систем управления. Актуальной является проблема разработки таких систем на базе теории паттернов. Показано, что это обеспечивает перенос эффективного опыта в систему управления РТК и обеспечивает совместимость теологического подхода и подхода, основанного на причинно-следственных связях. Рассматриваются проблемы идентификации и построения моделей паттернов. Предложено для этих целей использовать четыре позиции обработки информации, разработан метод логического вывода на паттернах.

Ключевые слова: принятие решений, целеустремленные системы, нечеткое суждение, ситуация выбора, РТК.

Цитирование: Виноградов Г.П., Прохоров А.А., Шепелев Г.А. Паттерны в системах управления автономными системами // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 1 (17). С. 40 –54. DOI: 10.38028/ESI.2020.17.1.003

Введение. Роботизированный комплекс (РТК) следует рассматривать как киберфизический объект, представляющий собой информационно связанную совокупность физических компонент, бортовых измерительных систем, бортовых исполнительных систем, бортовой вычислительной системы, где реализованы алгоритмы управления, и пункта управления с информационно-управляющим полем. Такой объект должен обладать свойством самодостаточного поведения, гарантирующего выполнения некоторой миссии. Достичь желаемого резкого повышения эффективности подобных комплексов в неопределенной и плохо формализуемой среде возможно, главным образом, путем совершенствования интеллектуальной составляющей их системы управления. Однако следует отметить, что подавляющее число исследований в этой области остается на теоретическом уровне. Существует разрыв между примитивными моделями поведения искусственных существей,

например, в роевой робототехнике, моделями их взаимодействия и ожиданиями со стороны практики [2, 3, 8].

К настоящему времени становится ясно, что достичь желаемого резкого повышения эффективности робототехнических комплексов возможно, главным образом, путем направления усилий конструкторов и ученых на совершенствование интеллектуальной составляющей системы управления: 1) совокупности алгоритмов бортовых систем управления; 2) алгоритмов деятельности экипажа, осуществляющего управление РТК. Эти компоненты образуют «кооперативный интеллект» РТК, который позволяет из набора разрозненных систем бортового оборудования создать функционально целостный объект, нацеленный на выполнение задачи текущего сеанса функционирования робототехнического комплекса.

Автономной интеллектуальной системой (в дальнейшем агент), проявляющей поведение, подобное человеческому, будем называть систему, имеющую в своем составе (рис. 1):

- бортовые измерительные устройства (или комплекс бортовых измерительных устройств), выполняющих роль сенсоров, позволяющих получить информацию о состоянии внешней среды и собственном состоянии;
- бортовые исполнительные устройства (или комплекс бортовых исполнительных устройств), с помощью которых система воздействует на внешнюю среду и на саму себя, выполняющие роль эффекторов;
- средства коммуникации с другими системами;
- «бортовой интеллект», составляющими которого могут быть бортовые вычислительные машины, их программное обеспечение, а также операторы пункта управления, являющиеся носителем набора алгоритмов для решения задач предметной области, полученный за счет обучения, тренировок и накопления опыта.

Такая система существует во времени и пространстве, взаимодействует с другими агентами, со средой при выполнении боевых задач и обязательств с помощью доступных ему способов действия. Агент выполняет поставленные задачи, исходя из понимания своего состояния и субъективных представлений о состоянии среды и развитии боевой ситуации, а также информации, полученной через модуль коммуникации. Агент способен прогнозировать изменение среды от своих действий и оценивать их полезность.

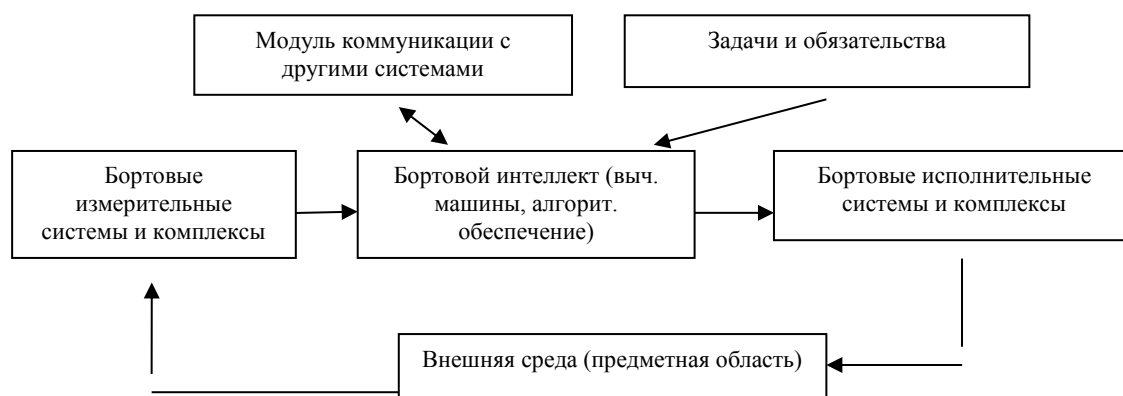


Рис. 1. Укрупненная схема интеллектуальной автономной системы

1. Требования к автономии и интеллектуальности киберфизических систем. Роль автоматизированных систем при выполнении боевых задач должна рассматриваться с позиции их влияния на человека. Они должны помогать командиру, упрощая и повышая эффективность его работы. Командир при этом должен и обязан быть элементом системы управления (*human in the loop control*) РТК. Их взаимодействие должно обеспечивать передачу опыта как от человека к машине, так и в обратном направлении, обеспечивая тем самым приспособительное поведение. Например, главной сложностью для любой автономной системы является распознавание ситуаций в окружающей среде. Сложность и многочисленность ситуаций, возникающих при выполнении миссии, делают невыполнимой задачу их выявления по результатам множественных испытаний и формирование на их основе базы знаний. Следовательно, необходимо реализовать дополнительную схему мониторинга за киберфизической системой для выявления классов ситуаций и успешных способов действия для формирования моделей поведения (паттернов) на основе данных, получаемых в реальных условиях. Данная схема гарантирует управляемую эволюцию самодостаточности, при решении задач боевыми подразделениями, имеющими в своем составе автономные РТК.

2. Исходные предположения и гипотезы. Как правило, ситуации, возникающие перед автономной системой, достаточно сложны для конструктивной формализации их традиционными формальными методами, но они хорошо описываются средствами естественного языка и для них имеется опыт их лучшего разрешения и описания, например, средствами нечеткой логики. Носитель такого опыта называется лидером. Опыт лидеров передается с помощью средств коммуникации на выбранном языке. Примем гипотезу, что переживания/поведение человека следует рассматривать, как функцию взаимодействия ситуации и человека. Ситуацию можно интерпретировать как компонент причины, которая порождает субъективное отражение ее у человека. Человек, выбирая определенное поведение на основе субъективного представления ситуации, оказывает влияние на ситуацию, изменяя ее. В то же время процессы, происходящие в сознании человека при выполнении определенных действий, приводят к расширению его структуры способностей (знания, опыт). Модель поведения РТК также должна учитывать этот феномен взаимовлияния. При таком подходе конструктивным оказалось понятие «*типовая ситуация*» (ТС) [1, 6]. Это функционально замкнутая с четко обозначенной значимой целью часть работы РТК, которая как единое целое встречается в различных (реальных) сеансах, конкретизируясь в них по условиям протекания и по доступным способам разрешения возникающих в ТС проблемных субситуаций [8]. При полной интеллектуализации РТК ТС и способы действия, как реакция на нее, образуют индивидуальный паттерн поведения. Человек, осваивая свой опыт, также нацелен на агрегирование его путем создания моделей паттернов. Следовательно, модель паттерна следует рассматривать как единицу человеческого опыта, для которой в ситуации, схожей с типовой (кластер), у человека сформирована определенная степень уверенности в получении желаемых состояний. В. Финн показал, что идеальная интеллектуальная система должна иметь 13 видов способностей [9]. На современном этапе только часть из этих способностей можно реализовать и только в интерактивном режиме во взаимодействии с человеком. Например, «это порождение последовательности «цель-план-действие», способность к рефлексии, способность к интеграции знаний, способность к уточнению неясных идей, способность к изменению системы знаний при получении новых знаний». Он

отмечает, что исключить человека из этого режима нельзя. Поэтому интеллектуальная система для военных целей не может быть полностью автономной и должна рассматриваться как партнерская человеко-машинная система, единицей знаний которой должен быть паттерн. *Определение.* Паттерн – это результат активности естественной или искусственной сущности, связанный с действием, принятием решений, его реализацией и т.п., осуществленный в прошлом, и рассматриваемый как шаблон (образец) для повторных действий или как обоснование действий по этому шаблону.

3. Модель нечеткого описания паттерна поведения. Поведение в ТС связано с выбором, который происходит в ситуации целеустремленного состояния [2]. Рассмотрим модель поведения в виде нечеткого описания модели ситуации выбора. Возможный вариант такой конструкции предложено строить путем “парадигмальной прививки” идей, транслируемых из других наук, например [2, 7]. Целеустремленное состояние складывается из следующих компонентов:

- Субъект, осуществляющий выбор (агент), $k \in K$.
- Окружение выбора (S), под которым понимается множество элементов и их существенных свойств, изменение в любом из которых может стать причиной или продуцировать изменение состояния целеустремленного выбора. Часть этих элементов может не являться элементами системы и образует внешнюю среду для нее. Воздействие внешней среды описывается с помощью некоторого набора переменных.
- Доступные способы действий $c_j^k \in C^k$, $j = \overline{1, n}$ k -го агента, которые ему известны и могут быть использованы для достижения i -го результата (их еще называют альтернативами). Каждый способ этого множества характеризуется набором параметров, которые называются управляющими воздействиями.
- Возможные при окружении S результаты, существенные для агента – $o_i^k \in O^k$, $i = \overline{1, m}$. Оценка результатов производится с помощью некоторого набора параметров, которые называются выходными параметрами ситуации целеустремленного состояния.
- Способ оценки свойств получаемых результатов в результате выбора способа действия. Очевидно, что оценки результата должны отражать ценность результата для агента и тем самым отражать его индивидуальность.
- Ограничения, отражающие требования, накладываемые ситуацией выбора на выходные переменные и управляющие воздействия.
- Модель предметной области, которая представляет собой множество соотношений, описывающих зависимость управляющих воздействий, параметров и возмущений с выходными переменными.
- Модель ограничений агента. Она подробно описана в работе [6]. Независимо от используемого вида описания ограничений будем предполагать наличие у агента определенной степени уверенности о возможности изменения части ограничений в сторону расширения множество возможных вариантов (альтернатив) выбора.

Введем для описанных компонентов меры, которые будут использоваться для оценки целеустремленного состояния.

А. Будем считать, что агент способен выделять факторы – характеристики окружения $X^k = \{x_i^k, i = \overline{1, N}\}$. Влияние каждого фактора агент оценивает с помощью лингвистической переменной степень влияния фактора $\mu_x^k(x_i^k): x_i^k \rightarrow [0,1]$. Введем параметр, с помощью которого агент оценивает свою ситуационную осведомленность в ситуации целеустремленного состояния

$$Es^k = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_x^k(x_i^k) x_i^k}{\sum_{i=1}^N \mu_x^k(x_i^k)}.$$

Можно определить следующее ограничение:

$$\sigma^k(Es^k) \geq \sigma_0^k,$$

где σ_0^k – некоторый пороговый уровень осведомленности агента от использования собственных источников информации.

В. Будем предполагать, что для описания влияния выделенных факторов на результаты $o_i^k, i = \overline{1, m}$ агент использует аппроксимацию в виде продукционных правил, которые имеют вид:

$$\text{Если } x_1 \text{ есть } A_{r1}^k \text{ и если } x_2 \text{ есть } A_{r2}^k \text{ и } \dots \text{ и если } x_N \text{ есть } A_{rN}^k, \text{ то} \\ o_i^k = f_{ir}^k(x_1, x_2, \dots, x_N), r = \overline{1, R}, i = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где R – количество продукционных правил, r – номер текущего продукционного правила, $o_i^k = f_{ir}^k(x_1, x_2, \dots, x_N)$ – четкая функция, отражающая представление агента о причинно-следственной связи входных факторов с возможными результатами для r -го правила; A_{ri}^k – нечеткие переменные, определенные на $X^k = \{x_i^k, i = \overline{1, N}\}$.

В качестве функции $f_{ir}^k(\bullet)$ могут использоваться, например, как математические модели, так и словесное описание, графики, таблицы, алгоритмы т.д.

Поскольку c_j^k является функцией параметров состояния внешней среды, принимаемых во внимание свойств системы, то набор предположений об их возможных значениях образует сценарий возможного состояния внешней среды, функциональных возможностей системы. Реализация сценариев, например, с помощью правил (2) позволяет сформировать представление о возможных результатах o_i^k . Неравнозначность при выборе способа действия можно описать, как степень уверенности необходимости его применения для получения результата o_i^k . Эту оценку можно описать лингвистической переменной

$$\psi_j^k = \psi_j^k(c_j^k \in C^k | s_i \in S \rightarrow o_i^k) \in [0,1].$$

Эта мера является индивидуальной характеристикой агента, которая может меняться в результате обучения и приобретения опыта, а также в результате коммуникационного взаимодействия агентов между собой и с оператором. Поэтому

$\psi_j^k = \psi_j^k(c_j^k \in C^k \mid s_i \in S, I^k \rightarrow o_i^k) \in [0,1]$, где I^k - информация, которой располагает агент на момент времени tk .

С. Выбор способа действий c_j^k при принятии решения агентом в ситуации целеустремленного состояния для достижения результата o_i^k связан, как показано в [2], с построением количественной оценки свойств выбираемого решения. Список свойств и параметров формируется на основе опыта, знания, интеллекта и глубины понимания им ситуации принятия решения. Правильное описание свойств и параметров способа действий – одно из основных условий того, что выбор c_j^k приведет к достижению результата o_i^k . Выбор перечня свойств и параметров, их характеризующих, целиком зависит от агента (его индивидуальности). Представим возможные результаты при заданном окружении выбора агента в виде $o_i^k \in \left\{ o_{ij}^k, j = \overline{1, J} \right\}$, где o_{ij}^k – множество возможных результатов при выборе j -го способа действия $i \in I$ – множество результатов, принимаемых во внимание k -м агентом. Очевидно, что $o_{ij}^k = o_{ij}^k(s_i), s_i \in S$.

Д. Ценность результатов o_i^k . Поскольку $o_{ij}^k = o_{ij}^k(s_i)$, а $s_i = S(c_j^k)$, то ценность i -го вида результата можно оценить следующей лингвистической переменной $\phi_i^k(o_i^k(c_j^k)) \in [0,1]$. Функция $\phi_i^k(o_i^k(c_j^k))$ для результата o_i^k будет монотонным преобразованием, так как $\phi_i^k(\bullet)$ переводит область значений функции $o_i^k(c_j^k)$ в множество значений лингвистической переменной. Так как базовому значению лингвистической переменной соответствуют нечеткие переменные, то это преобразование переводит область значений функции o_i^k в область значений базовых нечетких переменных.

Е. Эффективность способа действия с точки зрения результата – это уверенность получения данного результата этим способом действия при известных (или предполагаемых) затратах на его реализацию. Степень уверенности E_{ij}^k в том, что некоторый способ действия c_j^k будет приводить к результату o_i^k в окружении S , если агент выберет именно его: $E_{ij}^k = E_{ij}^k(o_i^k \mid A \text{ выберет } c_j^k \text{ в } S) \in [0, 1]$.

Степень уверенности является лингвистической переменной и выражает индивидуальную оценку агента последствий выбора с точки зрения затрат.

4. Модель выбора агента при реализации паттерна. Введенные три лингвистические переменные $\mu_i^k(x_i^k)$, ψ_{ij}^k , E_{ij}^k образуют модель представлений агента о ситуации целеустремленного выбора.

Поскольку c_j^k можно описать в терминах X_i^k , и агент имеет представление о зависимости в виде базы правил, которая связывает c_j^k и ценность возможного i -го результата

o_i^k , то можно определить ценность целеустремленного состояния по i -му результату o_i^k для k -го агента в соответствии с правилом [8]:

$$E\varphi_i^k = \frac{\sum_{j \in J} \varphi_{ij}^k(o_{ij}^k(c_j^k)) \bullet o_{ij}^k(s^k)}{\sum_{j \in J} \varphi_{ij}^k(o_{ij}^k(c_j^k))}.$$

По аналогии можно оценить ценность целеустремленного состояния для k -го агента по эффективности для i -го вида результата:

$$EE_i^k = \frac{\sum_{j \in J} EE_{ij}^k(o_i^k(c_j^k)) \bullet \psi_i^k(c_j^k)}{\sum_{j \in J} \psi_i^k(c_j^k)}.$$

Оценка агентом желательности целеустремленного состояния по i -му результату и эффективности его достижения в ситуации выбора задается в виде лингвистической переменной [10]:

$$\chi_{i1}^k = \chi_1^k(E\varphi_i^k) \in [0,1], \quad \chi_{i2}^k = \chi_2^k(EE_i^k) \in [0,1].$$

Можно определить следующие ограничения:

$$\sum_i \chi_{i1}^k(E\varphi_i^k) \geq \chi_1^0 \text{ и } \sum_i \chi_{i2}^k(EE_i^k) \geq \chi_2^0,$$

где χ_1^0 и χ_2^0 - ожидания агента от выполнения миссии, которые отражают баланс между затратами и достигнутыми результатами o_i^k .

Моделью ситуации выбора агента в ТС будем называть множество структурных и функциональных свойств, которыми, по его убеждению, обладает ситуация выбора и которые влияют на его удовлетворенность или неудовлетворенность ситуацией.

Есть еще одна группа факторов, которые определяют реализацию результата: воля, склонность к рискам, самооценка, мотивированность. Эти факторы позволяют говорить о таком показателе, как уверенность $\rho_i^k(o_i^k)$ в получении результата o_i^k в ситуации выбора при использовании одного из возможных способов действия $c_j^k \in C^k$.

В соответствии с гипотезой о рациональном поведении агент формирует решение в соответствии с

$$\begin{aligned} P_i^k(s \in S) &= \text{Arg max}_{c_j^k} (\sum_{j \in J} E\varphi_i^k(o_i^k(c_j^k)) - EE_i^k(o_i^k(c_j^k))) \\ c_j^k &\in C^k(I_t^i), \quad I_t^i \subseteq M, \quad o_i^k \in O^k \\ \sum_i \chi_{i1}^k(E\varphi_i^k) &\geq \chi_1^0, \quad \sum_i \chi_{i2}^k(EE_i^k) \geq \chi_2^0 \\ \sigma^k(Es^k(X)) &\geq \sigma_0^k \end{aligned} \quad (4)$$

Поскольку выбор связан с представлениями агента о ситуации выбора, то в (4) необходимо включить базу знаний (3).

Соотношения (4) описывают паттерн поведения агента (киберфизической системы) при стремлении достичь i -го результата. Агент рассматривает (4) паттерн как способ описания

задачи, принцип и алгоритм ее решения, которая часто возникает, причем таким образом, что ее решение можно использовать много раз, ничего не изобретая заново.

Показатели: ценность целеустремленного состояния по результату $E\phi_i^k$ и ценность целеустремленного состояния по эффективности EE_i^k являются элементами интегрального показателя ценности целеустремленного состояния для k -го индивида – $\sum_i E\phi_i^k \bullet EE_i^k$.

Учитывая его степень уверенности в получении результата ζ_i^k , можно получить показатель ожидаемой удельной ценности

$$EV_k = \frac{\sum_i (E\phi_i^k - EE_i^k) \bullet \zeta_i^k}{\sum_i \zeta_i^k} \quad (5)$$

Это означает, что если два субъекта находятся в одной и той же ситуации выбора, то разница в их поведении должна проявляться в значениях оценок удельной ценности по результату и эффективности и в степени уверенности достижения цели.

Соотношения (4–5) означают, что когда агент хочет получить какой-либо результат, то располагает для этого несколькими альтернативными способами достижения с разной эффективностью, которыми он может попытаться достичь желаемого результата, и его уверенность в получении желаемого результата значительна.

Такая модель индивидуального поведения автономного агента предполагает формирование базы знаний путем обучения на основе экспериментального опыта, что позволяет реализовать эволюцию «кооперативного интеллекта» благодаря использованию искусственного когнитивного процесса, аналогичного тому, что имеет место у естественных существ [4, 5]. Отметим, что эта возможность отсутствует в системах на основе знаний, так как в ней отсутствует компьютерная модель адаптивного поведения. Таким образом, общие принципы мышления агента являются вполне традиционными и включают следующие три основные фазы (рис. 2):

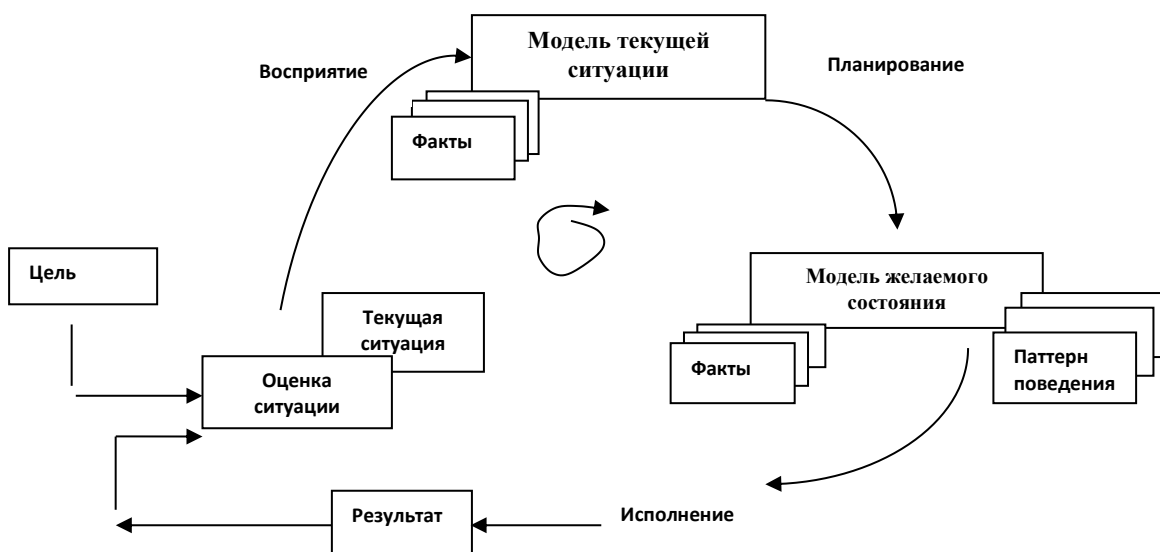


Рис. 2. Схема мышления интеллектуального агента (модель TOTE)

- восприятие – получение данных и построение модели сцены в загруженном мире;

- познание – анализ и формирование сценария действий субъекта для достижения поставленных целей;
- исполнение намеченного сценария с постоянным сопоставлением ожидаемых и наблюдаемых результатов.

В отличие от других подобных систем, в рассматриваемой системе реализация этих фаз осуществляется через два базовых механизма: абстрагирования и конкретизации, тесно связанных между собой.

5. Моделирование паттернов. Базовые позиции моделирования. Моделирование паттернов выполняется с ограниченным подмножеством естественного языка, в том числе и моделирование рассуждений на паттернах (*case based reasoning*), что образует специфическую часть человеческого опыта – *метаопыт*. Для реализации описанного подхода разработана программная система, позволяющая выполнять моделирование среды (контекста) и паттерна поведения агента с различных позиций. Выделены четыре базовые позиции восприятия, с которых осуществляются сбор и интерпретация информации для идентификации модели паттерна поведения: первая позиция (собственная точка зрения человека), вторая позиция (восприятие ситуации с точки зрения другого человека), третья позиция (рассмотрение ситуации с точки зрения незаинтересованного наблюдателя), четвертая позиция восприятия подразумевает рассмотрение ситуации с точки зрения системы, задействованной в ситуации.

Поскольку предполагается, что каждая позиция использует разные представления о ситуации и о возможных способах действия, то интегрирование точек зрения и их согласование позволяют агенту расширить свое понимание ситуации целеустремленного состояния и паттерна поведения в ней.

Моделирование из первой позиции заключается в том, что человек, обладающий опытом выполнения миссии, реализует его в системе самостоятельно и исследует используемый при этом паттерн(ы). Испытуемый реализует свое поведение, осуществляя голосовое управление «аватаром» (рис. 3).

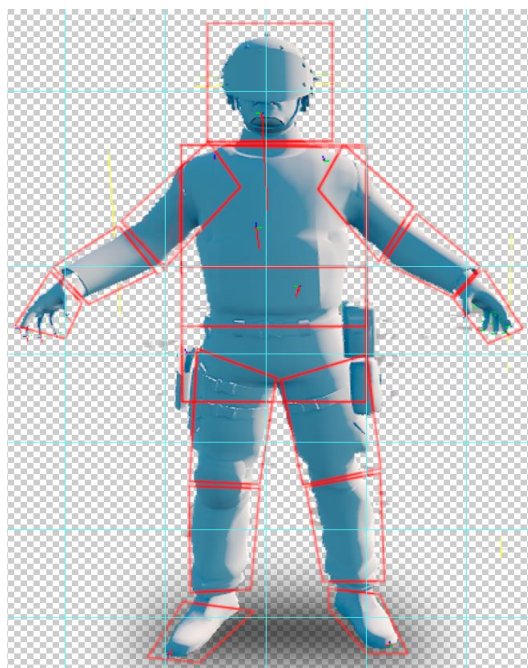


Рис. 3. Упрощенное представление трехмерной модели–аватара

Сплошными (красными) линиями обозначены прямоугольники, и то, как они располагаются по аватару. Минус этого способа в том, что снижается точность распознавания объекта, но, одновременно, этот способ позволяет экономить аппаратные ресурсы и время на вычисление пересечений. Так же эта схема определения пересечений будет использоваться и для реализации попадания в случае огневого контакта. Испытуемый выполняет действия в соответствии со схемой, приведенной на рис. 4.

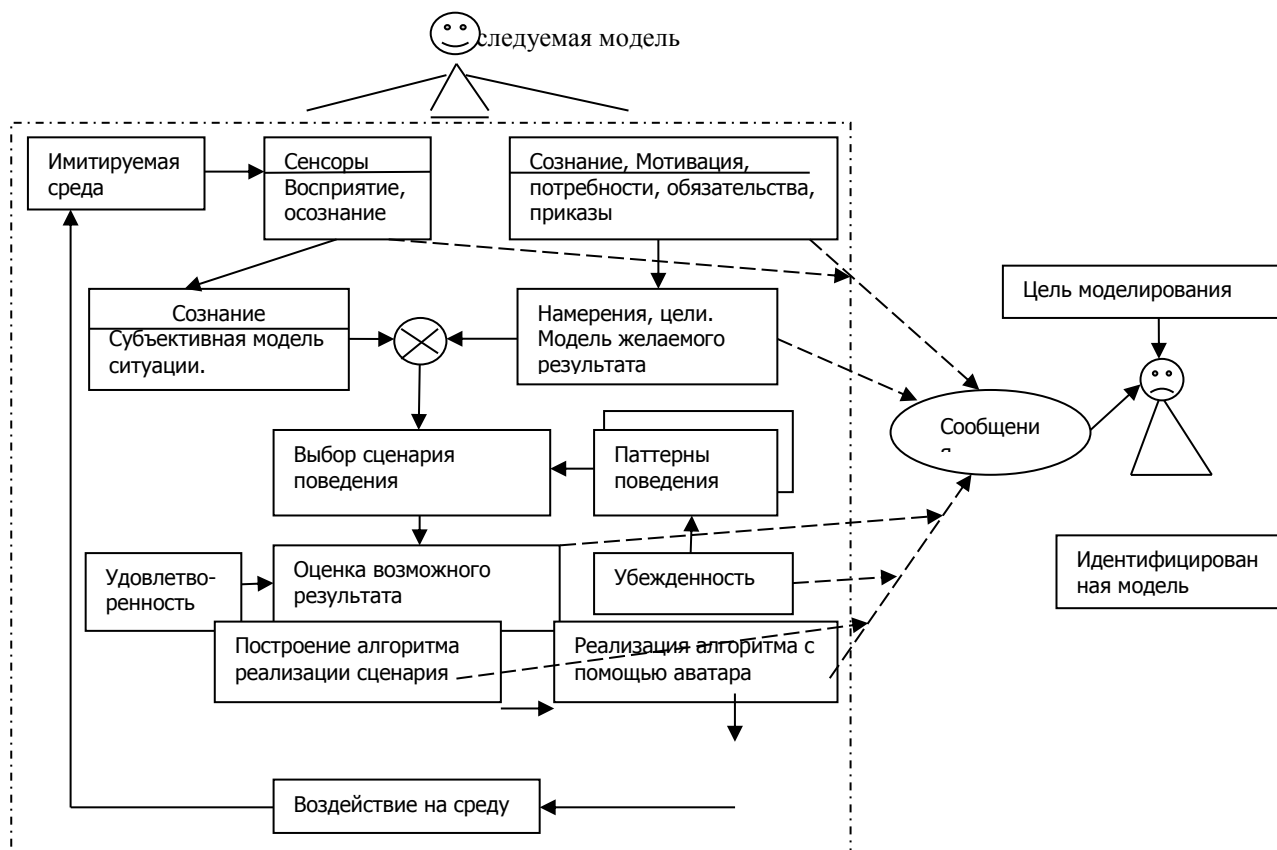


Рис. 4. Схема рефлексивного подхода при идентификации модели паттерна поведения с первой позиции. Пунктирными стрелками обозначены информационные потоки.

Реализация зрительной функции модели агента представляет видение объектов через простые формы, например, в данном случае кубы и их вершины, и игнорирование объектов, которые не представляют для модели ценности, например, стены и прочие.

Глаз реализован как пустой объект, использующийся в качестве конечной точки для построения зрительного луча, находящийся на уровне головы, и для реалистичности он так же будет анимирован, для случаев поворота головы в процессе анимации персонажа.

Вся зрительная часть сводится к 3-м основным функциям:

- 1) определение, попал ли объект в поле зрения;
- 2) определение дистанции до объекта;
- 3) построение векторов от упрощенной модели объекта к объекту, отвечающего за глаза агента.

Эти функции служат для сортировки, и тем самым для ускорения процесса обработки объекта.

6. Функция обнаружения предмета в области видимости глаза. Функция применяется для того, чтобы рассматривать те объекты, которые попали в зону видимости

глаза, тем самым позволив снизить затраты на подробную обработку всех объектов. Схематичная реализация области видимости показана на рис. 5.

Синим (самый нижний сектор) – показано местоположение агента в мире. Угол зрения составляет 120 градусов.

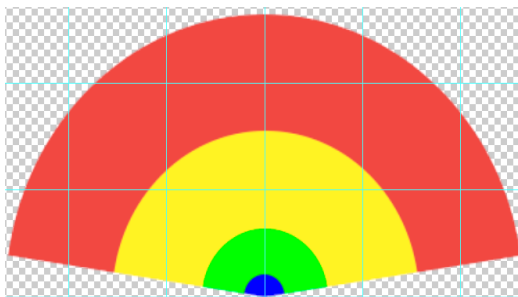


Рис. 5. Зона видимости глаз

7. Функция обнаружения предмета на расстоянии видимости глаза. Еще одна функция для сортировки объектов и экономии времени просчета, представляет собой область, разбитую на приоритеты, см. рис. 3.

Зеленый (второй сектор, над синим) – высокий приоритет, объекты в этой области будут выбираться всегда. Сейчас он равен 20-ти метрам. Так же в этой зоне будет производиться наименование объектов.

Желтая (следующий сектор) и красная (верхний сектор) зоны приоритетов будут выбраны в случае, если нет объектов в зоне зеленого приоритета. Сейчас эти зоны равны 50 метров и 100 метров соответственно.

В дальнейшем её можно улучшить и по временным затратам, объекты, которые расположены дальше от глаза, могут потребовать большего времени фокусировки.

8. Функция обнаружения пересечения между объектом и глазом. Работает по принципу нахождения пересечения между точками огрубленной модели объекта и «глазом». Между двумя точками строится луч, если на луч попадает какой-то объект, то эту точку «глаз» не видит. Если глаз видит хотя бы одну точку объекта, то объект видим весь.

Анализ паттерна действия выполняется с точки зрения исследователя. Важно подчеркнуть, что для выполнения описания агентом уже произведенных действий по собственному паттерну (рис. 4), рассматриваемый субъект должен выйти из своей прежней позиции деятельности и перейти в новую позицию, внешнюю как по отношению к уже выполненным действиям, так и по отношению к будущей, проектируемой деятельности. Это называется рефлексией первого уровня: новая позиция агента, характеризующаяся относительно прежней позиции, будет называться рефлексивной позицией, а знания, вырабатываемые в ней, будут рефлексивными знаниями, поскольку они берутся относительно знаний, выработанных в первой позиции. Приведенная схема рефлексивного выхода будет служить первой абстрактной модельной характеристикой рефлексии в целом.

Вторая позиция предполагает, возможно, полную имитацию поведения агента, когда исследователь используя модель, полученную в первой позиции, пытается думать и действовать максимально приближенно к мыслям и поступкам агента. Такой подход позволяет понять на интуитивном уровне существенные, но неосознанные аспекты мыслей и

действий моделируемого агента и уточнить модель. Моделирование с третьей позиции заключается в наблюдении за поведением моделируемого агента в качестве незаинтересованного наблюдателя. В третьей позиции предполагается построение модели способа действия с точки зрения конкретной научной дисциплины, связанной с предметной областью агента. Четвертая позиция предполагает своего рода интуитивный синтез всех полученных представлений с целью получить модель, характеризующую максимальными значениями показателей удельной ценности по результату и эффективности.

Этот подход предполагает использование имплицитной и эксплицитной информации. Дело в том, что возможна ситуация, в которой агент знает или понимает суть некоторой деятельности, однако не способен осуществлять ее (осознанная некомпетентность). И, наоборот, агент способен хорошо выполнять некоторые действия, но не понимает, как это делается (неосознанная компетентность). Владение навыком в совершенстве подразумевает как способность «делать то, что знаешь», так и способность «знать, что делаешь». Тем не менее, многие поведенческие и психологические элементы, обеспечивающие успешность действий агентов, остаются по большей части неосознанными и лишь интуитивно понятными для них самих. В результате они неспособны напрямую описать механизмы, лежащие в основе каких-либо способностей. Более того некоторые агенты умышленно избегают размышлений о том, что они делают и как они это делают, опасаясь, что это знание помешает интуитивным действиям. Поэтому одной из целей моделирования является выявление и идентификация *неосознанной компетентности* и доведение ее до сознания с целью лучшего понимания, совершенствования и передачи навыка.

Когнитивная и поведенческая компетентность могут быть смоделированы либо «имплицитно», либо «эксплицитно». *Имплицитное моделирование* предполагает занятие второй позиции по отношению к субъекту моделирования, с тем, чтобы добиться интуитивного понимания субъективных переживаний данного человека. *Эксплицитное моделирование* состоит в переходе в третью позицию с целью описать явную структуру переживаний моделируемого агента так, чтобы ее можно было передать другим. Имплицитное моделирование является в первую очередь индуктивным процессом, с помощью которого мы принимаем и воспринимаем структуры окружающего мира. Эксплицитное моделирование, по существу, является дедуктивным процессом, с помощью которого мы описываем и осуществляем это восприятие. Оба процесса необходимы для успешного моделирования. Без «имплицитной» стадии не может быть эффективной интуитивной базы, на основе которой можно построить «эксплицитную» модель. С другой стороны, без «эксплицитной» фазы смоделированная информация не сможет воплотиться в приемах или средствах и быть переданной другим. Имплицитное моделирование само по себе помогает человеку развивать личное, неосознанное умение в связи с желаемым поведением (так обычно учатся маленькие дети). Однако создание техники, механизма или навыка, которому можно научить или который можно передать другим, в каком-то смысле требует применения эксплицитного моделирования.

Результатом должна быть модель, в которой синтезированы: а) интуитивное понимание способностей агента, б) непосредственные наблюдения за работой агента, и в) эксплицитные познания исследователя в предметной области агента.

Заключение. Экспериментальные исследования произведены для сравнительно простых поведенческих и когнитивных моделей паттернов, например, при управлении

автономным подводным аппаратом, оценки боеготовности сил специального реагирования и ряда других. В результате реализации предлагаемых процедур были получены модели, в которых синтезированы: а) интуитивное понимание способностей агента, б) непосредственные наблюдения за работой агента, и в) эксплицитные познания исследователя в предметной области агента.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта №17-01-00728 «Моделирование принятия решений интеллектуальным агентом с выбираемыми моделями представлений об окружении, структуры интересов и предпочтений».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов П.А., Виноградов Г.П., Семенов Н.А. Интеграция нейросетевых алгоритмов, моделей нелинейной динамики и методов нечеткой логики в задачах прогнозирования. Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. №1. С. 78-84.
2. Виноградов Г.П. Моделирование принятия решений интеллектуальным агентом. Программные продукты и системы. 2010. № 3. С. 45-51.
3. Виноградов Г.П., Кузнецов В.Н. Моделирование поведения агента с учетом субъективных представлений о ситуации выбора // Искусственный интеллект и принятие решений. № 3. С. 58-72.
4. Городецкий В.И. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 2. С. 92-120.
5. Городецкий В.И. Самоорганизация и многоагентные системы. II. Приложения и технология разработки // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 3. С. 102-123.
6. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. М.: Радио и связь. 1996.
7. Роберт Дилтс. Моделирование с помощью НЛП. Издательство: Питер. 1998.
8. Федунев Б.Е. Конструктивная семантика для разработки алгоритмов бортового интеллекта антропоцентрических объектов. Известия РАН. Теория и системы управления. 1998. №5.
9. Финн В.К. Чертова дюжина идеального интеллекта. Доступ: <https://stimul.online/articles/science-and-technology/chertova-dyuzhina-idealnogo-intellekta-beseda-pervaya/> (Дата доступа 19.11.2019).
10. G.P. Vinogradov. A Subjective Rational Choice. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series 803 (2017) 012176 DOI: 10.1088/1742-6506/803/1/012176.

PATTERNS IN CONTROL SYSTEMS BY AUTONOMOUS SYSTEMS

Gennady P. Vinogradov, professor, wgp272ng@mail.ru

Alexey A. Prokhorov, head of branch, forworkap@mail.ru

Georgy A. Shepelev, graduate student, shepelevgeorg@gmail.com

Closed Joint-Stock Company Research Institute «Centerprogrammsystem»

170024 Tver, pr. 50 years of October, 3a

Abstract: A robotic complex should be considered as a cyber-physical object, which is an information-related set of physical components, on-Board measurement systems, on-Board Executive systems, on-Board computer system, where control algorithms are implemented, and a control point with an information-control field. Such an object must have the property of self-sufficient behavior that guarantees the fulfillment of a certain mission. The requirement to intellectualize behavior makes us reconsider the logical and mathematical abstractions that are the basis for building their onboard control systems. The problem of developing such systems based on pattern theory is relevant. It is shown that this ensures the transfer of effective experience and ensures the compatibility of the theological approach and the approach based on cause-and-effect relationships. Problems of identification and construction of pattern models are considered. It is proposed to use four information processing positions for this purpose, and a method of logical inference on patterns is developed.

Key words: decision making, purposeful systems, fuzzy judgment, choice situation, RTC.

Acknowledgments. The study was carried out with the financial support of the Russian Fund of Basis Research in the framework of the project № 17-01-00728 "Modeling decision-making by an intelligent agent with selectable models of ideas about the environment, structure of interests and preferences"

References

1. Borisov P.A., Vinogradov G.P., Semenov N.A. Integraciya nejrosetevy`x algoritmov, modelej nelinejnoj dinamiki i metodov nechetkoj logiki v zadachax prognozirovaniya [Integration of neural network algorithms, nonlinear dynamics models and fuzzy logic methods in forecasting problems]. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy` upravleniya = Proceedings of the RAS. Theory and control systems. 2008. №1. Pp. 78-84 (in Russian).
2. Vinogradov G.P. Modelirovanie prinyatiya reshenij intellektual`ny`m agentom [Decision modeling by an intelligent agent]. Programmny`e produkty` i sistemy` = Software products and systems.. 2010. № 3. Pp. 45-51(in Russian).
3. Vinogradov G.P., Kuznecov V.N. Modelirovanie povedeniya agenta s uchetom sub`ektivny`x predstavlenij o situacii vy`bora [Modeling agent behavior taking into account subjective ideas about the situation of choice] // Iskusstvenny`j intellekt i prinyatie reshenij = Artificial Intelligence and Decision Making. № 3. Pp. 58-72 (in Russian).
4. Gorodeczkij V.I. Samoorganizaciya i mnogoagentny`e sistemy`. I. Modeli mnogoagentnoj samoorganizacii [Self-organization and multi-agent systems. I. Models of multi-agent self-

- organization] // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy` upravleniya = Proceedings of the RAS. Theory and control systems. 2012. № 2. Pp. 92-120 (in Russian).
5. Gorodeczkij. V.I. Samoorganizaciya i mnogoagentny`e sistemy`. II. Prilozheniya i texnologiya razrabotki [Self-organization and multi-agent systems. II. Applications and development technology] // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy` upravleniya = Proceedings of the RAS. Theory and control systems. 2012. № 3. Pp. 102-123 (in Russian).
 6. Zade L. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ee primenenie k prinyatiyu priblizhenny`x reshenij [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions]. M.: Radio i svyaz`= M.: Radio and communication. 1996 (in Russian).
 7. Robert Diltz. Modelirovanie s pomoshh`yu NLP [Modeling with help of NLP]. Izdatel`stvo: Piter = Publish House : Peter. 1998 (in Russian).
 8. Fedunov B.E. Konstruktivnaya semantika dlya razrabotki algoritmov bortovogo intellekta antropocentricheskix ob`ektov [Constructive semantics for developing onboard intelligence algorithms for anthropocentric objects.]. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy` upravleniya = Proceedings of the RAS. Theory and control systems. 1998. №5 (in Russian).
 9. Finn V.K. Trinadcat' harakteristik ideal'nogo intellekta [Thirteen characteristics of ideal intellect] Availabe at: <https://stimul.online/articles/science-and-technology/chertovadyuzhina-idealnogo-intellekta-beseda-pervaya-/> Access date 11.19.2019 (in Russian).
 10. Vinogradov G.P. A Subjectve Rational Choice. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series 803 (2017) 012176. DOI: 10.1088/1742-6506/803/1/012176.

**МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ВЛИЯНИЯ
РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ
НА СПРОС И ЦЕНУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РЕГИОНЕ**

Гальперова Елена Васильевна

К.т.н., доцент, старший научный сотрудник,
зав. лабораторией «Взаимосвязи энергетики и экономики»
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН
664033, г. Иркутск, Россия, ул. Лермонтова, 130
e-mail: galper@isem.irk.ru

Гальперов Василий Ильич

К.т.н., младший научный сотрудник
отдела «Системы искусственного интеллекта в энергетике»
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН
664033, г. Иркутск, Россия, ул. Лермонтова, 130
e-mail: galperov@gmail.com

Аннотация. Развитие цифровых технологий меняет свойства систем электроснабжения и стирает границу между производителями и потребителями электроэнергии. В статье представлен метод формирования стоимости электроэнергии в региональной энергосистеме, который является составной частью подхода к оценке влияния развития интеллектуальных систем энергетики на спрос на электроэнергию в регионе. Определение стоимости электроэнергии в системе состоит в последовательном согласовании требуемых объемов потребления электроэнергии и возможностей производителей, стремящихся к достижению своих лучших экономических показателей. Каждый производитель описывается в виде оптимизационной модели, которая является отдельным агентом в многоагентной модели энергосистемы.

Ключевые слова: цифровые технологии, интеллектуальные сети, активный потребитель, оптимизация, агентный подход, спрос на электроэнергию, цена.

Цитирование: Гальперова Е. В., Гальперов В.И. Методический подход к исследованию влияния развития интеллектуальных систем энергетики на спрос и цену электроэнергии в регионе // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 1 (17). С. 55 – 67. DOI: 10.38028/ESI.2020.17.1.004

Введение. Исследование и прогнозирование перспективной динамики объемов и изменения структуры спроса на топливно-энергетические ресурсы (ТЭР) являются одними из важнейших задач при разработке и принятии стратегических решений в области энергетической и экономической безопасности страны и регионов и политики, направленной на повышение качества жизни населения. В Доктрине энергетической безопасности Российской Федерации¹ среди рисков, связанных с внутренними вызовами и угрозами

¹ Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 13 мая 2019 г. № 216

энергетической безопасности, указывается «отсутствие в долгосрочной перспективе определенности относительно спроса на продукцию и услуги организаций топливно-энергетического комплекса в субъектах Российской Федерации». Кроме того, представление о динамике и структуре спроса на энергоносители необходимо иметь при разработке эффективных направлений развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) страны и регионов, надежности энергоснабжения территорий, долгосрочных программ деятельности энергетических компаний и др.

Сложности в исследовании и прогнозировании спроса на энергоносители обусловлены многозначностью и взаимосвязанностью факторов, определяющих уровни и структуру потребности в ТЭР, высокой их вариативностью и изменением во времени. Попытки преодоления этих сложностей обусловили разработку довольно большого количества подходов, методов и моделей прогнозной оценки спроса на топливо и энергию, как у нас в стране, так и за рубежом. Это эвристические методы (экспертные оценки, мозговой штурм, Делфи и др.), основанные на знаниях и опыте специалистов, работающих в этой области (см., например, [9, 28]), методы экстраполяции и выявления долгосрочных тенденций и закономерностей в изменении энергопотребления в зависимости от основных макроэкономических показателей развития разных стран (см., например, [1, 12, 13, 19]), а также построения различных моделей (имитационных, оптимизационных, балансовых) (см., например, [17, 24, 31, 32]. Модели используются как для решения самостоятельных задач прогноза потребности в ТЭР, так и входят составной частью в состав модельных комплексов для определения направлений развития энергетики [11, 27, 30, 33].

Несмотря на наличие значительного количества разработанных методов, они не учитывают или не в полной мере учитывают изменения условий формирования перспективного спроса на энергоресурсы, в частности, бурного развития и применения цифровых технологий в производстве и потреблении энергии. При создании интеллектуальных систем наибольшие изменения коснутся регионального уровня, где происходит согласование интересов производителей и потребителей энергии. Появление активных потребителей, способных управлять собственным энергопотреблением, имеющих возможности хранения и производства электроэнергии, смещает фокус прогнозов на региональный уровень, повышает его значимость в определении суммарного спроса на уровне страны и требует дальнейшего развития методов исследования и прогнозирования перспективной потребности в ТЭР.

Цифровые технологии в производстве и потреблении энергии. Развитие и внедрение цифровых технологий способствуют появлению новых свойств систем электроснабжения. Основными из них являются: 1) умное управление спросом; 2) появление небольших распределенных ресурсов электроэнергии, в том числе на основе возобновляемых источников энергии; 3) внедрение интеллектуальной зарядки для электромобилей.

Управление спросом (demand responds). Это механизм, который дает возможность потребителям электроэнергии реагировать на параметры системы для обеспечения надежного энергоснабжения при минимальных затратах. Цифровые технологии учета, управления и связи позволяют потребителю непрерывно контролировать использование энергии своими приборами и оборудованием, передавать эти данные поставщику электроэнергии и получать от него информацию для оптимизации собственного спроса в соответствии с имеющимся в энергосистеме предложением. В часы, когда электроснабжение ограничено или сети

перегружены, подключенные устройства, такие, как интеллектуальные электрические обогреватели и кондиционеры, промышленные котлы и интеллектуальные бытовые приборы, могут автоматически отключаться или работать при более низкой нагрузке, причем делать это таким образом, чтобы не влиять на комфорт и условия работы потребителя [7, 10, 23, 25].

Развитие небольших распределенных энергоресурсов (distributed generation) позволяет снижать потери при передаче и распределении энергии, более гибко реагировать на изменение спроса, а также во многих случаях повышать надежность энергоснабжения. К распределенным (малым) источникам энергии относят совокупность технологий, представленных небольшими или даже микро-установками, которые позволяют генерировать энергию рядом с местом ее потребления, например, домашние солнечные фотоэлектрические системы [2, 4, 14, 18]. Распространение цифровых технологий дает возможность потребителям иметь собственное производство и/или технологии хранения электроэнергии, продавать и/или покупать ее как у отдельного продавца, так и энергосистемы.

Интеллектуальная зарядка для электромобилей (smart charging) позволяет подключенным электромобилям заряжаться в соответствии с ценовыми и/или другими управляющими сигналами в энергосистеме. Например, потреблять энергию, когда имеется производство дешевого электричества, или находится в режиме ожидания, когда сеть перегружена. Если имеется возможность двунаправленной зарядки аккумуляторной батареи, помимо интеллектуальной зарядки, электромобили могут обеспечить более высокую гибкость системы, путем продажи электроэнергии сетевому оператору или использовать ее для удовлетворения потребности в собственном доме (*Vehicle-to-grid*). Этот двусторонний обмен энергией дает ряд экономических, экологических и эксплуатационных преимуществ [21, 22, 26, 29].

В условиях растущего числа разнородных устройств, владельцев и операторов в интеллектуальных энергосистемах их координацию, а также автоматизацию торговли может помочь решить *технология распределенного реестра (blockchain)*² [3, 8, 15, 16, 20].

Использование цифровых технологий в энергетике способствует развитию интеллектуальных систем и сетей, цифровизации систем контроля, учета, управления энергоснабжением и преобразует сетевую инфраструктуру в новую киберфизическую платформу для гибкого и эффективного энергообеспечения различного рода потребителей. Учет этих особенностей в методах и моделях долгосрочного прогнозирования спроса на энергоносители позволит улучшить качество прогнозов, повысить обоснованность перспективных вариантов развития ТЭК и стратегических решений в области энергетической и экономической безопасности страны и регионов.

Предлагаемый подход к оценке формирования цены электроэнергии в регионе с учетом цифровых технологий. Данная статья является последовательным продолжением и развитием методического подхода по оценке влияния развития интеллектуальных систем на спрос на электроэнергию в регионе, основные положения которого были описаны в [5, 6].

² Блокчейн - это децентрализованная структура данных, в которой цифровая запись событий (таких, как транзакция или генерация солнечной энергии) собирается и связывается с помощью криптографии в «блок» с меткой времени и другими событиями. Этот блок затем сохраняется вместе как «цепочка» на распределенных компьютерах. Любой участник блокчейна может прочитать его или добавить новые данные.

Особенность подхода состоит в имитации поведения потребителей и производителей электроэнергии в соответствии с их собственными интересами и оценке влияния этого поведения на спрос и цену электроэнергии в региональной энергосистеме.

Подход исходит из следующих основных положений: (1) региональная энергетическая система состоит из централизованной электрической сети и подключенных к ней потребителей, (2) централизованная электрическая сеть состоит из набора крупных источников электроэнергии (электростанции на угле, газе, атомные и проч.) с соответствующими технико-экономическими показателями (расход топлива, себестоимость и т.д.), (3) структура производства электроэнергии (доля отдельных электростанций в общем объеме) определяет значение ее стоимости в сети. Рассматриваются три категории потребителей: (s) стабильный (пассивный), который не может менять свое энергопотребление из-за технологических или иных особенностей, (a) активный, имеющий возможность изменять (снижать) энергопотребление, (p) просьюмер³, который, может управлять своим энергопотреблением, имеет возможности производства, хранения и поставки электроэнергии в централизованную сеть.

Алгоритм оценки влияния поведения потребителей на спрос в региональной энергосистеме подробно описан в [6] и позволяет итеративным путем, на основе изменения объемов использования электроэнергии активными потребителями и просьюмерами в ответ на изменение ее стоимости в энергосистеме, оценить максимально возможное снижение объемов использования энергии в энергосистеме.

Ниже описывается метод формирования стоимости электроэнергии в региональной системе на основе имитации поведения отдельного производителя. Метод базируется на оптимизации основных экономических показателей отдельной электростанции. В зависимости от ситуации в системе критерием оптимизации может быть: максимум прибыли, минимум себестоимости, максимум производства и др.

Формирование уровней стоимости электроэнергии в системе состоит в последовательной итерации согласования требуемых объемов ее потребления и возможностей производителей:

$$\sum_i N_i h_i = \sum_j V_j,$$

где N_i – установленная мощность электростанции i , кВт; h_i – число часов использования установленной мощности электростанции i , час; V_j – потребность в электроэнергии потребителя j , кВтч.

Каждый объект производства (электростанция) описывается в виде оптимизационной модели, исходными данными для которой являются:

- установленная мощность станции;
- удельные капиталовложения;
- число часов использования установленной мощности;
- норма амортизации;
- собственные нужды станции;
- удельный расход топлива на производство электроэнергии;

³ producer + consumer

- стоимость топлива;
- штатный коэффициент;
- средняя заработная плата работников.

Каждая станция может работать в разных режимах и, соответственно, с разной себестоимостью производства электроэнергии. Себестоимость производства электроэнергии на КЭС, руб./кВт-ч, определяется по формуле:

$$S = I / (\Theta (1 - \alpha_{\text{сн}}))$$

где I – затраты на производство электроэнергии, руб.; Θ – выработка электроэнергии, кВт-ч, $\alpha_{\text{сн}}$ – коэффициент расхода электроэнергии на собственные нужды, %.

$$I = C_{\text{т}} (b / Q_{\text{н}}^{\text{р}}) N_{\text{у}} h_{\text{у}} + (1 + k_{\text{пр}}) [(n_{\text{ам}} + \beta_{\text{р}}) K + n_{\text{экс}} N_{\text{у}} \Phi]$$

где $C_{\text{т}}$ – цена 1 т топлива, руб/т; b – удельный расход условного топлива на производство электроэнергии, г ут/кВтч; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – теплота сгорания натурального топлива, ккал/кг; $N_{\text{у}}$ – установленная мощность станции, кВт; $h_{\text{у}}$ – число часов использования установленной мощности, ч; $k_{\text{пр}}$ – коэффициент расходов на прочие нужды, обычно принимается $0,2 \div 0,3$ (большее значение коэффициента относится к КЭС небольшой мощности); K – капитальные вложения в КЭС, руб., $n_{\text{ам}}$ – средневзвешенная норма амортизационных отчислений (для КЭС при линейном способе начисления амортизации принимается равной $0,035$); $\beta_{\text{рем}}$ – коэффициент, учитывающий долю затрат на ремонты, в долях от капитальных вложений, принимается равным $0,04-0,05$; Φ – среднегодовой фонд заработной платы одного работника (с учетом отчислений), руб./чел; $n_{\text{экс}}$ – удельная численность персонала, чел./кВт.

Прибыль электростанции (m , руб.) рассчитывается по формуле

$$m = \Theta T - I$$

где T – средняя цена электроэнергии в сети, руб/кВтч,

Предусматривается двухуровневая схема оптимизации, т.е. оптимизируется работа каждой электростанции в отдельности и системы в целом. При этом отдельные электростанции могут оптимизировать свою работу по необходимому им критерию, а оптимизация системы осуществляется по критерию минимума средневзвешенной стоимости 1 кВт.ч.

Сначала определяется максимальная стоимость электроэнергии в сети, для чего все станции оптимизируют свою работу по критерию максимума прибыли. Рассчитывается средневзвешенная стоимость электроэнергии, которая является исходной для оценки влияния поведения потребителей на спрос (см., подробнее, [5]) и оценки ценовой эластичности спроса. Если эта стоимость электроэнергии не устраивает потребителей, они снижают нагрузку в системе и под новое ее значение производится следующий этап расчетов. Для сохранения стабильной работы, станции могут снизить прибыль или уменьшить себестоимость для сохранения прибыли. Часть станций могут оказаться не рентабельными в определенных условиях. Алгоритм формирования цены в региональной энергосистеме показан на рис. 1, а на рис. 2 представлен алгоритм оценки влияния поведения потребителей на спрос на электроэнергию в зависимости от ее стоимости.

Для моделирования прямых и обратных связей объектов в системе используется агентный подход. Модель каждой электростанции является отдельным агентом, решающим свои индивидуальные задачи в условиях энергосистемы. Агентный подход обеспечивает необходимый уровень детализации и абстракции [11, 12].

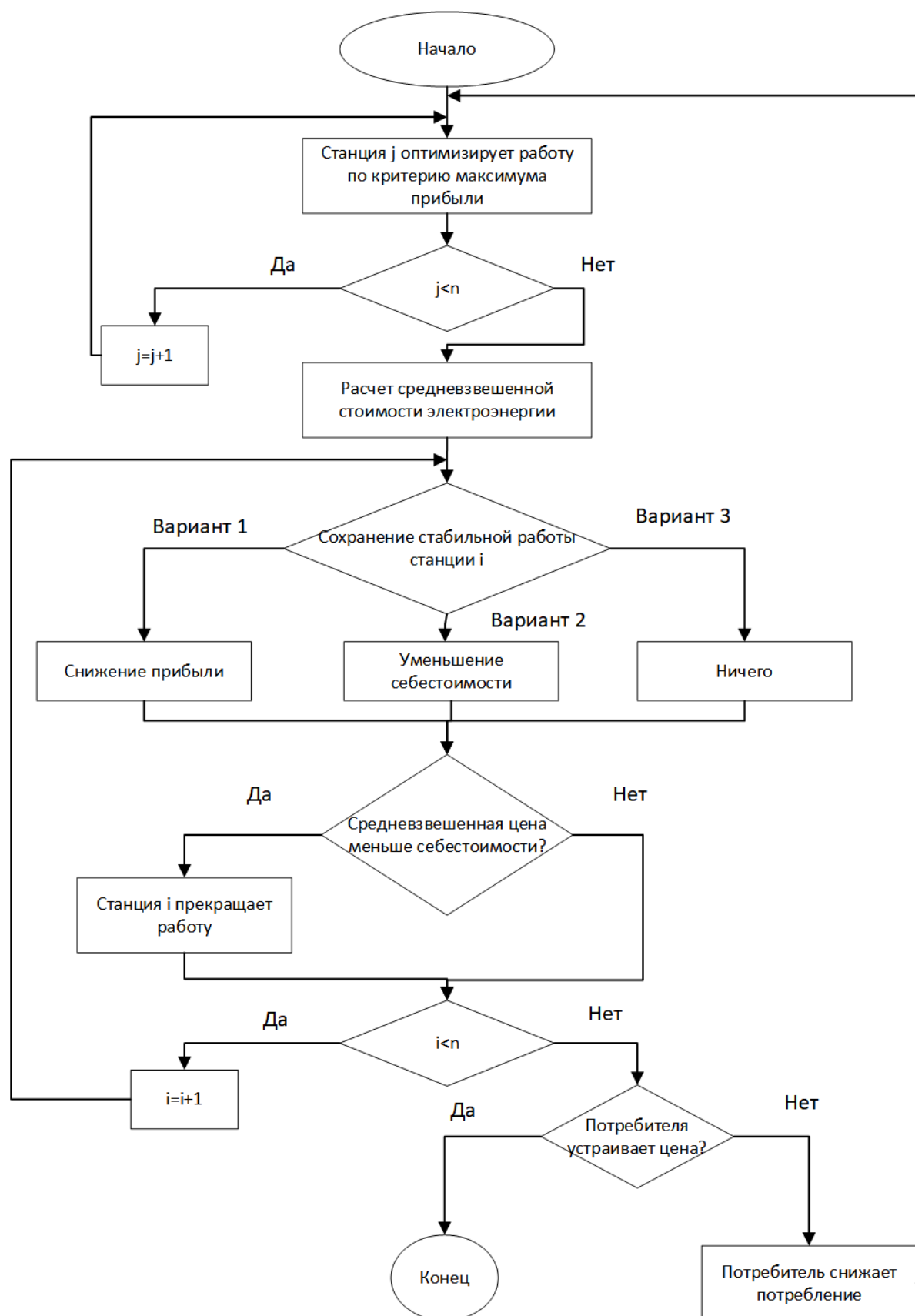


Рис.1. Алгоритм формирования стоимости электроэнергии в региональной энергосистеме на основе индивидуального поведения производителей

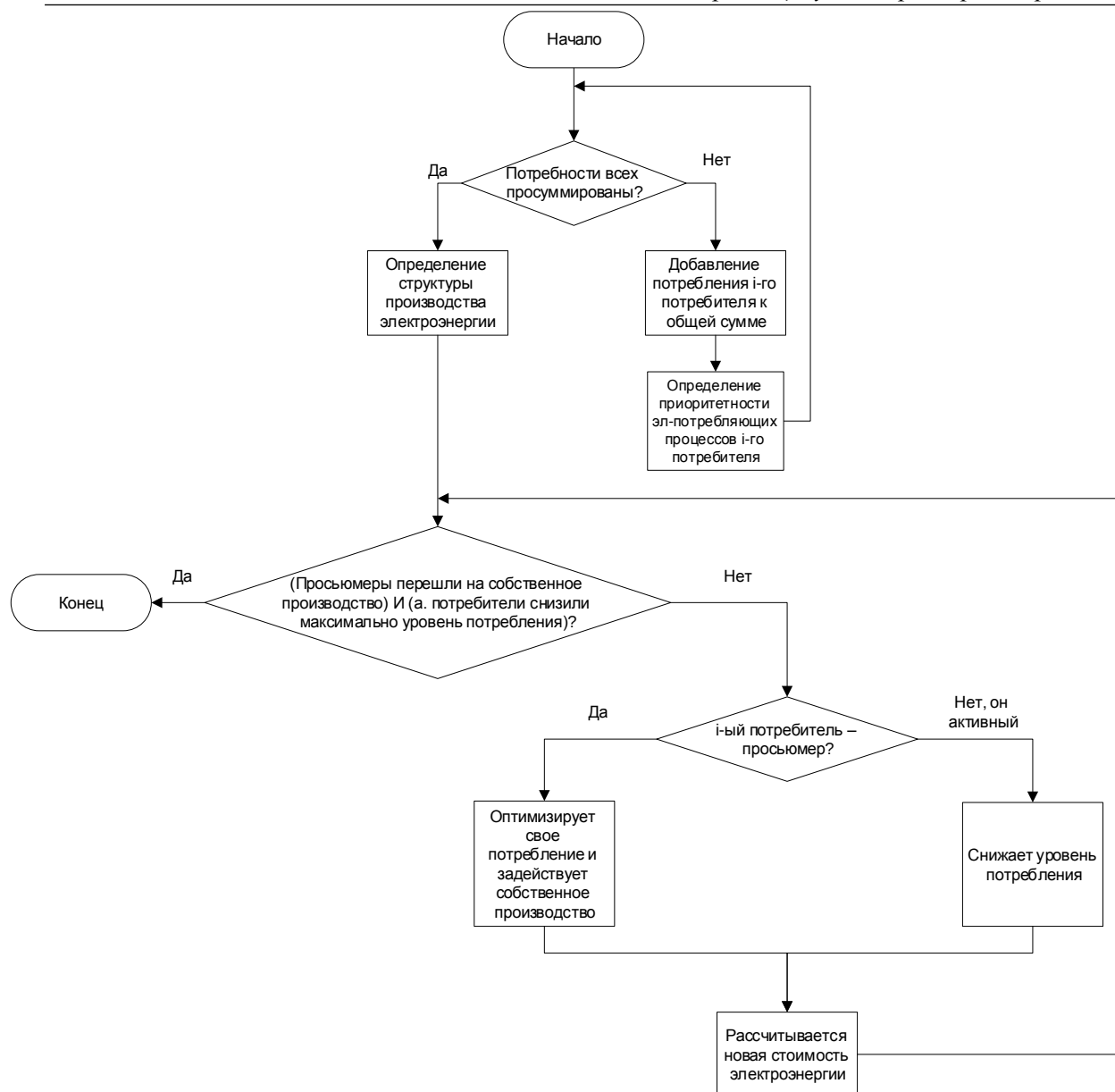


Рис. 2. Алгоритм оценки влияния поведения потребителей на спрос на электроэнергию в региональной энергосистеме

Закключение. Стремительное удешевление и распространение цифровых технологий в производстве энергии (в первую очередь, на основе возобновляемых источников энергии), появление интеллектуальных систем в управлении энергообъектами, изменение роли и места потребителей в энергетических системах кардинально меняют организационно-технологическую структуру энергетики, взаимосвязи между производителями и потребителями электроэнергии и влияют на спрос и цены на региональных энергетических рынках.

Учет этих новых факторов и взаимосвязей в методах прогнозирования спроса на энергоносители позволит улучшить качество прогнозов, повысить обоснованность перспективных вариантов развития ТЭК и стратегических решений в области энергетической и экономической безопасности страны и регионов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания 17.5.2 (рег. № АААА-А17-117030310452-7) фундаментальных исследований СО РАН, отдельные результаты получены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-010-00204.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов Д.Л., Науменко Д.О., Старкова Г.С. Анализ методов и моделей энергопотребления на макроуровне // Научно-технические ведомости СПбГПУ. №4. 2012. Экономические науки. С. 215-219.
2. Андронов М. Распределенная генерация: будущее энергетики или тупик? Деловой журнал Инвест-Форсайт. Доступ: <https://www.if24.ru/budushhee-energetiki> / (дата обращения: 2.03.2020).
3. Блокчейн – новые возможности для производителей и потребителей электроэнергии? 2016. РwС. 48 с. Доступ:
4. https://www.pwc.ru/ru/publications/blockchain/blockchain_opportunity-for-energy-producers%20and-consumers_RUS.pdf (дата обращения: 3.03.2020).
5. В России идет быстрое развитие распределенной энергетики. Но туда ли? Доступ: https://kislod.life/question_answer/v_rossii_idet_bystroie_razvitie_raspredelennoy_energetiki_no_tuda_li/ (дата обращения: 2.03.2020).
6. Гальперова Е.В., Гальперов В.И. Моделирование поведения активного потребителя на основе агентного подхода // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. №4(8). С. 28-38.
7. Гальперова Е.В., Гальперов В.И., Локтионов В.И., Макагонова Н.Н. Применение интеллектуальных методов для моделирования влияния новых факторов в развитии энергетики на спрос на электроэнергию // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 16-29. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-02
8. Demand Response на розничных энергорынках в России может появиться уже в 2019 году. Доступ: https://www.np-ace.ru/news/power_industry/1026/ (дата обращения: 6.02.2020)
9. Калинина А. Блокчейн в энергетике: как по-новому продавать электричество. Доступ: <https://decenter.org/ru/blokcheyn-v-energetike-kak-po-novomu-prodavat-elektrichestvo> (дата обращения: 3.02.2020).
10. Куленов Н.С., Хасенов Ж.Х. Прогнозирование энергопотребления. – Алма-Ата: Наука, 1980.
11. Кулешов М., Рычков С. Концепция функционирования агрегаторов распределенных энергетических ресурсов в составе Единой энергетической системы России. Агрегаторы управления спросом на электроэнергию. Разработано АО «СО ЕЭС». Доступ:
12. https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/docs/dr_agregator_consept.pdf (дата обращения: 6.02.2020).
13. Макаров А.А. Модельно-информационная система для исследования перспектив энергетического комплекса России (SCANER). «Управление развитием крупномасштабных систем». М.: Физматлит. 2012.

14. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. 2-е изд., доп. М.: Наука. 1983.
15. Методы исследования и управления системами энергетики / Л.С. Беляев, Н.И. Воропай, Ю.Д. Кононов и др. Новосибирск: Наука. 1987.
16. Распределенная генерация: потребительский тренд во время кризиса доверия к большой энергетике? Доступ: <https://www.eprussia.ru/epr/307-308/2223659.htm> (дата обращения: 3.03.2020).
17. Сорокин П. Блокчейн в энергетике: будущее или реальность? Доступ: <http://digitalsubstation.com/blog/2018/12/11/blokchejn-v-nbsp-energetike-budushhee-ili-nbsp-reality/> (дата обращения: 3.2.2020).
18. Технология Блокчейн в энергетике. Доступ: <https://aiz.com/documentation/articles/blockchain-energy/> (дата обращения: 3.02.2020).
19. Филиппов С.П. Прогнозирование энергопотребления с использованием комплекса адаптивных имитационных моделей // Известия РАН. Энергетика. 2010. № 4. С. 41–55.
20. Хохлов А., Веселов Ф. Internet of Energy: как распределенная энергетика повлияет на безопасность, цены на электричество и экологию. Доступ: <http://www.forbes.ru/biznes/351485-internet-energy-kak-raspredelennaya-energetika-povliyaet-na-bezopasnost-ceny-na> (дата обращения: 03.02.2020).
21. Шапот Д.В. Опыт развития методологии и разработки управленческих моделей межотраслевого баланса / Д.В. Шапот, В.А. Малахов. М.: Издательский дом МЭИ, 2018. 176 с.
22. Юсуфов Р., Чаленко Е., Пердеро А., Кривошея Е. Блокчейн в электроэнергетике: ландшафт проектов и инвесторов. 2019. Сколково. 43 с. Доступ: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_RU_MINDSMITH_blockchain_investment_landscape2019.pdf (дата обращения: 03.02.2020).
23. Daim T.U., Wang X., Cowan K. and Shott T. Technology roadmap for smart electric vehicle-to-grid (V2G) of residential chargers // Daim et al. Journal of Innovation and Entrepreneurship (2016) 5:15 DOI 10.1186/s13731-016-0043-y
24. Digitalization & Energy. International Energy Agency OECD/IEA, 2017, [Online]. Доступ: <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy> (дата обращения: 3.03.2020).
25. Energy Technology Perspectives 2017. Доступ: <https://www.iea.org> (дата обращения: 24.06.2019).
26. Finon, D. and B. Lapillonne, 1983, Long term forecasting of energy demand in developing countries. European Journal of Operations Research. 13(1). Pp. 12-28.
27. Grunewald Ph., Diakonova M. Flexibility, dynamism and diversity in energy supply and demand: A critical review // Energy Research & Social Science. 38 (2018). Pp. 58–66.
28. IRENA (2019), Innovation landscape brief: Electric-vehicle smart charging. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. 24 p.
29. Long range Energy Alternatives Planning (LEAP) System. Доступ: [https://openei.org/wiki/Long_range_Energy_Alternatives_Planning_\(LEAP\)_System](https://openei.org/wiki/Long_range_Energy_Alternatives_Planning_(LEAP)_System) (дата обращения: 3.03.2020)

30. Makkonen M., Patari S., Jantunen A., Viljainen S. Competition in the European electricity markets – outcomes of a Delphi study // *Energy Policy*. 44 (2012). Pp. 431–440.
 31. O'Connor P., Jacobs M. Charging Smart. Drivers and Utilities Can Both Benefit from Well-Integrated Electric Vehicles and Clean Energy. May 2017. Доступ: www.ucsusa.org/smartcharging (дата обращения: 6.02.2020)
 32. POLES: Prospective Outlook on Long-term Energy Systems. Доступ: <https://www.enerdata.net/solutions/poles-model.html>. (дата обращения: 3.03.2020)
 33. Subhes C., Bhattacharyya Govinda R., Timilsina. Energy Demand Models for Policy Formulation. A Comparative Study of Energy Demand Models. The World Bank Development Research Group, Environment and Energy Team. March 2009.
 34. Suganthi L., Anand A. Samuel. Energy models for demand forecasting – A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16 (2012). Pp. 1223-1240.
 35. The National Energy Modeling System: An Overview 2018. – U.S. Energy Information Administration. Washington, DC 20585. 75 p. Доступ:
 36. [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581\(2018\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581(2018).pdf) (дата обращения: 03.02.2020)
-

UDK 338.27:004.021

**A METHODOLOGICAL APPROACH TO THE ASSESSMENT OF THE IMPACT OF
INTELLIGENT ENERGY SYSTEMS DEVELOPMENT ON REGIONAL ELECTRICITY
PRICE AND DEMAND**

Elena V. Galperova

PhD., Associate Professor, Senior Researcher. Department of "Energy Security",
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
664033, Irkutsk, Lermontov st. Russia,
e-mail: galper@isem.irk.ru

Vasiliy I. Galperov

PhD., Junior Researcher. Department of "Systems of Artificial Intelligence in Energy"
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
664033, Irkutsk, Lermontov st. Russia,
e-mail: galperov@gmail.com

Abstract. The development of digital technologies is changing the properties of power supply systems and blurring the line between power producers and consumers. This study presents the method of the cost of electricity formation in the regional power system, which serves as a component of the approach to assessing the impact of intelligent systems development on the demand for electricity in the region. Determining the cost of electricity in the system is essentially a matter of the consistent alignment of the required amount of electricity consumption with the capabilities of producers seeking to achieve their best economic performance. Each producer is described as an optimization model, which is a standalone agent in a multi-agent power system model.

Keywords: digital technology, smart grids, active consumer, optimization, agent-based approach, power demand, price.

Acknowledgments. The research was carried out under State Assignment 17.5.2 (reg. № AAAA-A17-117030310452-7) of the Fundamental Research of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, some results were obtained with partial funded by RFBR project № 20-010-00204.

References

1. Andrianov D.L., Naumenko D.O., Starkova G.S. Analiz metodov i modelej energopotrebleniya na makrourovne [Analysis of methods and models of energy consumption at the macro level] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskie nauki. = Scientific and technical statements of SPbSPU. Economics - 2012. № 4. Pp. 215-219 (in Russian).
2. Andronov M. Raspredeleonnaya generaciya: budushchee energetiki ili tupik? [Distributed generation: the future of energy or a dead end?] // Delovoj zhurnal Invest-Forsajt = Business magazine Invest-foresight. [Online]. Available at: <https://www.if24.ru/budushhee-energetiki/> (accessed: 2.03.2020). (in Russian)
3. Blokchejn – novye vozmozhnosti dlya proizvoditelej i potrebitelej elektroenergii? [Blockchain – new opportunities for power producers and consumers?] 2016. PwC. 48 p. [Online]. Available at: https://www.pwc.ru/ru/publications/blockchain/blockchain_opportunity-for-energy-producers%20and-consumers_RUS.pdf (accessed: 3.03.2020). (in Russian)
4. V Rossii idet bystroye razvitiye raspredelennoy energetiki. No tuda li? [Distributed energy is rapidly developing in Russia. But is it there?] [Online]. Available at: https://kislodod.life/question_answer/v_rossii_idet_bystroje_razvitiye_raspredelennoy_energetiki_no_tuda_li/ (accessed: 2.03.2020).
5. Gal'perova E.V., Gal'perov V.I. Modelirovanie povedeniya aktivnogo potrebitelya na osnove agentnogo podhoda [Modeling the active consumer behavior based on the agent approach] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2017. № 4(8). Pp. 28-38 (in Russian).
6. Gal'perova E.V., Gal'perov V.I., Loktionov V.I., Makagonova N.N. Primenenie intellektual'nyh metodov dlya modelirovaniya vliyaniya novyh faktorov v razvitii energetiki na spros na elektroenergiyu [Application of the methods of semantic and agent modeling for assessing of the impact of new factors in energy development on the demand for regional energy markets] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2019. № 1 (13). Pp. 16-29. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-02 (in Russian).
7. Demand Response na roznichnyh energorynkah v Rossii mozhnet poyavit'sya uzhe v 2019 godu. [Demand Response on retail energy markets in Russia may appear as early as 2019] [Online]. Available at: https://www.np-ace.ru/news/power_industry/1026/ (accessed: 6.02.2020) (in Russian).
8. Kalinina A. Blokchejn v energetike: kak po-novomu prodavat' elektrichestvo. [Blockchain in energy: how to sell electricity in a new way] [Online]. Available at:

- <https://decenter.org/ru/blokcheyn-v-energetike-kak-po-novomu-prodavay-elektrichestvo> (accessed: 3.02.2020) (in Russian).
9. Kulenov N.S., Hasenov ZH.H. Prognozirovanie energopotrebleniya [Forecasting energy consumption] Nauka = Science. Alma-Ata: 1980 (in Russian).
 10. Kuleshov M., Rychkov S. Konceptiya funkcionirovaniya agregatorov raspredelennykh energeticheskikh resursov v sostave Edinoj energeticheskoy sistemy Rossii. Agregatory upravleniya sprosom na elektroenergiyu. Razrabotano AO «SO EES». [Concept of functioning of aggregators of distributed energy resources as part of the Unified energy system of Russia. Aggregators for managing electricity demand. Developed by JSC "so UES"] [Online]. Available at: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/markets/dr/docs/dr_agregator_concept.pdf (accessed: 6.02.2020). (in Russian)
 11. Makarov A.A. Model'no-informacionnaya sistema dlya issledovaniya perspektiv energeticheskogo kompleksa Rossii (SCANNER) [Model-information system for studying the prospects of the Russian energy complex (SCANNER)]. Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem = Managing the development of large-scale systems. Moscow: Fizmatlit. 2012 (in Russian).
 12. Melent'ev L.A. Sistemnye issledovaniya v energetike. 2-e izd., dop. [System studies in the energy sector. 2nd ed., additional] Nauka = Science. Moscow. 1983 (in Russian).
 13. Metody issledovaniya i upravleniya sistemami energetiki / L.S. Belyaev, N.I. Voropai, Yu.D. Kononov i dr. [Methods of research and management of energy systems]. Nauka = Science. Novosibirsk. 1987 (in Russian).
 14. Raspredelennaya generaciya: potrebitel'skij trend vo vremya krizisa doveriya k bol'shoj energetike? [Distributed generation: consumer trend during the crisis of confidence in centralized energy?] [Online]. Available at: <https://www.eprussia.ru/epr/307-308/2223659.htm> (accessed: 3.03.2020) (in Russian).
 15. Sorokin P. Blokchejn v energetike: budushchee ili real'nost'? [Blockchain in the power industry: future or reality?] [Online]. Available at: <http://digitalsubstation.com/blog/2018/12/11/blokchejn-v-nbsp-energetike-budushhee-ili-nbsp-realnost/> (accessed: 3.2.2020) (in Russian.)
 16. Tekhnologiya Blokchejn v energetike. [The Blockchain technology in the energy sector] Available at: <https://aiz.com/documentation/articles/blockchain-energy/> (accessed: 3.02.2020) (in Russian).
 17. Filippov S.P. Prognozirovanie jenergopotrebleniya s ispol'zovaniem kompleksa adaptivnykh imitacionnykh modelej [Energy forecasting using a complex adaptive simulation models]// Izvestiya RAN. Seriya Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series. 2010. № 4. Pp. 41–55.(in Russian).
 18. Hohlov A., Veselov F. Internet of Energy: kak raspredelennaya energetika povliyaet na bezopasnost', ceny na elektrichestvo i ekologiyu [Internet of Energy: how distributed energy will affect security, electricity prices, and the environment] [Online]. Available at: <http://www.forbes.ru/biznes/351485-internet-energy-kak-raspredelennaya-energetika-povliyaet-na-bezopasnost-ceny-na> (accessed: 03.02.2020) (in Russian).
 19. SHapot D.V. Opyt razvitiya metodologii i razrabotki upravlencheskikh modelej mezhotraslevogo balansa [Experience in developing methodology and developing

- management models for cross-industry balance] / D.V. SHapot, V.A. Malahov. Izdatel'skiy dom MEI = MEI publishing house, Moscow: 2018. 176 p. (in Russian).
20. YUusufov R., CHalenko E., Perdero A., Krivosheya E. Blokchejn v elektroenergetike: landshaft proektov i investorov [Blockchain in the power industry: the landscape of projects and investors], 2019. Skolkovo. 43 p. [Online]. Available at: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_RU_MINDSMITH_blockchain_investment_landscape2019.pdf (accessed: 03.02.2020). (in Russian)
 21. Daim T.U., Wang X., Cowan K. and Shott T. Technology roadmap for smart electric vehicle-to-grid (V2G) of residential chargers // Daim et al. Journal of Innovation and Entrepreneurship (2016) 5:15 DOI 10.1186/s13731-016-0043-y.
 22. Digitalization & Energy. International Energy Agency OECD/IEA, 2017, [Online]. Available at: <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy> (accessed: 03.02.2020).
 23. Energy Technology Perspectives 2017. [Online]. Available at: <https://www.iea.org> (accessed: 24.06.2019).
 24. Finon, D. and B. Lapillonne, 1983, Long term forecasting of energy demand in developing countries, European Journal of Operations Research, 13(1), pp. 12-28.
 25. Grunewald Ph., Diakonova M. Flexibility, dynamism and diversity in energy supply and demand: A critical review // Energy Research & Social Science 38 (2018) 58–66.
 26. IRENA (2019), Innovation landscape brief: Electric-vehicle smart charging, International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. 24 p.
 27. Long range Energy Alternatives Planning (LEAP) System. [Online]. Available at: [https://openei.org/wiki/Long_range_Energy_Alternatives_Planning_\(LEAP\)_System](https://openei.org/wiki/Long_range_Energy_Alternatives_Planning_(LEAP)_System) (accessed: 3.03.2020).
 28. Makkonen M., Patari S., Jantunen A., Viljainen S. Competition in the European electricity markets – outcomes of a Delphi study // Energy Policy 44 (2012). Pp. 431–440.
 29. O'Connor P., Jacobs M. Charging Smart. Drivers and Utilities Can Both Benefit from Well-Integrated Electric Vehicles and Clean Energy. May 2017. [Online]. Available at: www.ucsusa.org/smartcharging (accessed: 6.02.2020)
 30. POLES: Prospective Outlook on Long-term Energy Systems. [Online]. Available at: <https://www.enerdata.net/solutions/poles-model.html>. (дата обращения: 3.03.2020)
 31. Subhes C. Bhattacharyya Govinda R. Timilsina. Energy Demand Models for Policy Formulation. A Comparative Study of Energy Demand Models. The World Bank Development Research Group. Environment and Energy Team. March 2009.
 32. Suganthi L., Anand A. Samuel. Energy models for demand forecasting – A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012). Pp. 1223-1240.
 33. The National Energy Modeling System: An Overview 2018. – U.S. Energy Information Administration. Washington, DC 20585. 75 p. [Online]. Available at: [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581\(2018\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581(2018).pdf) (accessed: 03.02.2020)

УДК 621.311 : 004.056

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ДАННЫХ SCADA И WAMS ПРИ КИБЕРАТАКАХ НА ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННУЮ ИНФРАСТРУКТУРУ ЭЭС¹

Колосок Ирина Николаевна

Д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории «Управление функционированием электроэнергетических систем», e-mail: kolosok@isem.irk.ru

Гурина Людмила Александровна

К.т.н., доцент, старший научный сотрудник лаборатории «Управление функционированием электроэнергетических систем», e-mail: gurina@isem.irk.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

664130 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130

Аннотация. Надежное функционирование электроэнергетических систем (ЭЭС) зависит от качества данных SCADA и WAMS, являющихся частью информационно-коммуникационной инфраструктуры киберфизических ЭЭС. Возрастающие угрозы кибербезопасности ЭЭС указывают на необходимость разработки методов анализа данных, учитывающих последствия кибератак на системы сбора, передачи и обработки информации. Проведенные исследования показали влияние кибератак на качество данных. Выявлена взаимозависимость нарушения свойств кибербезопасности и низкого качества данных. Предложен алгоритм оценки качества данных SCADA и WAMS с учетом свойств кибербезопасности информационно-коммуникационной инфраструктуры ЭЭС.

Ключевые слова: качество данных, SCADA, WAMS, кибербезопасность, нечеткая логика.

Цитирование: Колосок И. Н., Гурина Л. А. Оценка качества данных SCADA и WAMS при кибератаках на информационно-коммуникационную инфраструктуру ЭЭС // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 1 (17). С. 68 –78 DOI: 10.38028/ESI.2020.17.1.005

Введение. Переход к моделям киберфизических электроэнергетических систем (ЭЭС) обусловлен цифровой трансформацией электроэнергетики на основе новых информационно-коммуникационных технологий и цифровых моделей [7]. При этом проблемы устойчивости таких систем с позиций кибербезопасности не только остаются, но и, из-за повышенной уязвимости к кибератакам информационно-коммуникационных подсистем [13], выходят на первый план с точки зрения требований надежности [1]. Актуальность обеспечения своевременной и достоверной информацией задач управления ЭЭС подчеркивает необходимость разработки новых методов и моделей обработки данных на основе технологий искусственного интеллекта.

¹ Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.4.2. программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310438-1.

В настоящее время, при управлении ЭЭС наряду с измерениями SCADA (Supervisory for Control and Data Acquisition) используются синхронизированные векторные измерения, поступающие от измерительных устройств системы WAMS (Wide Area Measurement Systems). Качество измерений системы SCADA и WAMS имеет решающее значение для бесперебойного функционирования ЭЭС. Под качеством информационных потоков данных понимается степень полноты и достоверности информации, обеспечивающих требуемую точность решения задач управления режимами ЭЭС.

В работе предложен алгоритм оценки качества данных при кибератаках на SCADA и WAMS на основе теории нечетких множеств. При разработке правил систем нечеткого вывода принимались во внимание такие требования кибербезопасности SCADA и WAMS, как своевременность, целостность, доступность, киберустойчивость, конфиденциальность. С учетом [11, 15, 17], проанализированы свойства киберфизических ЭЭС, выявлены возможные кибератаки, снижающие качество информационных потоков данных.

В [3] показано, что кибератаки на систему SCADA и WAMS приводят к выработке и реализации неправильных управляющих воздействий и к неблагоприятным последствиям при функционировании ЭЭС, поэтому крайне важно учитывать влияние кибератак на полноту и достоверность информации, используемой при управлении ЭЭС.

Предлагаемый алгоритм может быть использован как предварительный этап обработки информации в качестве барьера поступления «плохих» данных при решении такой важной задачи, как оценивание состояния ЭЭС.

Использование технологий искусственного интеллекта при анализе и обработке информационных потоков позволит повысить эффективность управления и надежность функционирования ЭЭС.

Цифровая трансформация свойств киберфизических электроэнергетических систем. Управление киберфизической ЭЭС осуществляется на основе единой цифровой среды (модель CIM), внедрения технологий кибербезопасности и применения интеллектуальных методов управления с целью повышения надежности и прозрачности функционирования ЭЭС.

Модель CIM (Common Information Model) на основе формата данных ODM (Open Model for Exchanging Power System Simulation Data) позволяет строить модели различной сложности, которые потом могут быть конвертированы в любой известный либо новый формат данных, используя дополнительно подключаемые модули. ODM - открытая модель для обмена данными при моделировании энергосистем, является международным открытым стандартом обмена данными для моделирования и расчета ЭЭС, поддерживает динамические расчеты [2]. На основе CIM-моделей ИТ-инфраструктура, интегрирующая интеллектуальную информационную, вычислительную и телекоммуникационную среды [6], должна обеспечить двустороннюю связь информационно-коммуникационной и технологической подсистем киберфизической ЭЭС.

Прозрачность функционирования ЭЭС требует реализации новых систем сбора, передачи и обработки потоков информации, развития технологий и методов моделирования исследуемых процессов, получения достоверных данных в реальном времени о режимах для задач управления ЭЭС.

Переход к интеллектуальному управлению ЭЭС и возрастающие потребности мониторинга и анализа данных указывают на необходимость применения цифровых технологий обработки данных на основе методов искусственного интеллекта:

- искусственные нейронные сети и генетические алгоритмы;
- логическое программирование;
- онтологический инжиниринг;
- нечеткая логика и т.д.

При всех очевидных преимуществах цифровизации ЭЭС отмечена их повышенная уязвимость к кибератакам, связанная с широкомасштабностью (напр., территориальная разрозненность) технологической части и многокомпонентностью (устройства сбора, передачи и обработки информации на всех уровнях управления) информационно-коммуникационной инфраструктуры киберфизических ЭЭС и их информационного взаимодействия [13]. На уровне аппаратного и программного обеспечения задач управления растет реализация скрытых угроз. Интеграция технологий IT-инфраструктуры увеличивает число кибератак.

Управление ЭЭС осуществляется на основе данных, поступающих от системы SCADA и WAMS. Кибератаки, направленные на компоненты этих систем, или двусторонние потоки данных информационно-коммуникационной и технологической систем, могут нарушить не только функции управления, но и вызвать отказы в работе ЭЭС.

В [3] показано влияние низкого качества информации на ложную визуализацию режимов ЭЭС и выработку неправильных управляющих воздействий вследствие кибератак на системы SCADA и WAMS.

Качество данных измерений системы SCADA, WAMS. Для широкомасштабного мониторинга ЭЭС наряду с системами SCADA внедрена WAMS, измерения в которой поступают от устройств PMU. В этих условиях управление ЭЭС может осуществляться на основе:

- измерений системы SCADA;
- измерений WAMS;
- смешанных измерений.

Технологии синхронизированных векторных измерений позволяют повысить наблюдаемость системы и обеспечить задачи управления более точной и своевременной информацией.

Тем не менее, совместное использование измерений, поступающих от системы SCADA и WAMS, требует решения следующих проблем:

- высокая вычислительная нагрузка;
- большие данные;
- плохая обусловленность ковариационной матрицы погрешностей измерений;
- необходимость синхронизации данных.

Возникают серьезные проблемы качества данных и кибербезопасности, имеющих сложное взаимодействие, при кибератаках на систему SCADA и WAMS. Так, снижение качества данных – последствия успешно проведенной кибератаки. Вместе с тем, анализ качества данных может определить тип реализованной кибератаки и выявить неучтенные

уязвимости [14, 16]. Для проверки свойств кибербезопасности необходима разработка методов анализа качества данных SCADA, WAMS.

В этой связи проведен анализ влияния кибератак на качество данных с учетом нарушений свойств кибербезопасности (рис. 1).

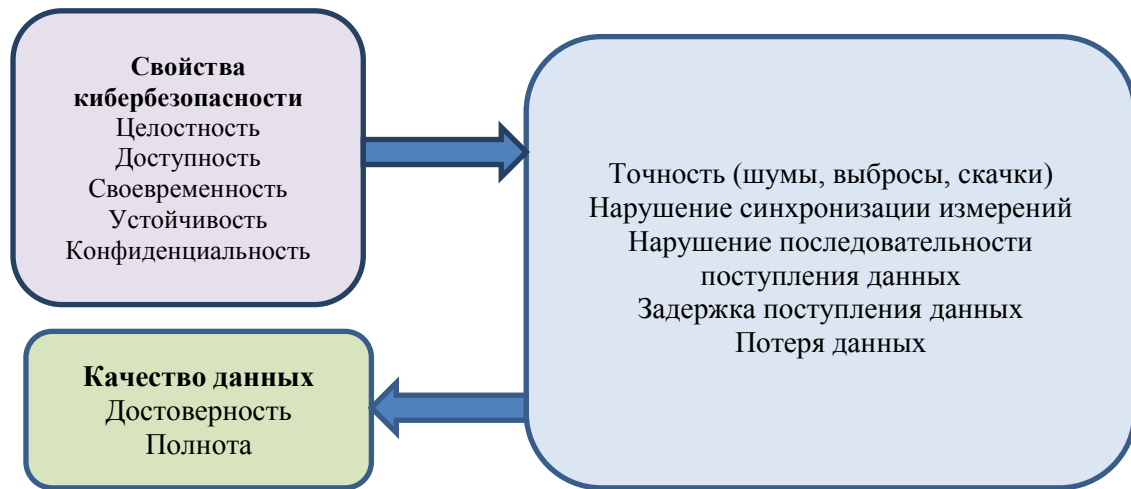


Рис. 1. Влияние кибератак на качество данных.

В [8] введен критерий качества информации и метод его определения на основе теории нечетких множеств. Авторами [5] в зависимости от уровня полноты и достоверности измерений SCADA и WAMS, предложены модели измерений для оценивания состояния ЭЭС. Учет влияния кибератак на полноту и достоверность информации потребовал расширения факторов при оценке качества данных. В работах [10, 12, 18] рассмотрены возможные кибератаки на системы сбора, передачи и обработки информации, выявлены их уязвимости, показано влияние нарушения свойств кибербезопасности системы SCADA и WAMS на функции управления ЭЭС [3]. Данные исследования показали необходимость учета следующих факторов влияния кибератак на качество данных в системах SCADA, WAMS.

- последовательность;
- своевременность поступления данных;
- синхронизация данных.

Своевременность поступления данных учитывает неопределенность информации в реальном времени. Синхронизацию данных необходимо учитывать при совместном использовании измерений SCADA и синхронизированных векторных измерений.

В табл. 1 представлена взаимозависимость качества данных и свойств кибербезопасности при кибератаках на компоненты SCADA и WAMS.

Таблица 1. Взаимозависимость качества данных и свойств кибербезопасности SCADA, WAMS

Компоненты SCADA, WAMS	Качество данных	Свойства кибербезопасности	Кибератаки
PMU, PDC, Super PDC, RTU, MTU	Полнота, достоверность, последовательность, синхронизация	Целостность, конфиденциальность	Атаки внедрения ложных данных, Переполнение буфера, Spoofing, атаки повторного производства, подделка устройства
Система передачи информации	Полнота, последовательность,	Целостность, доступность,	DOS-атаки, Spoofing,

	своевременность, синхронизация	Своевременность, конфиденциальность	Атака «человек посередине», атаки повторного произведения, компрометация маршрутизаторов связи
Приложение EMS	Полнота, достоверность, последовательность, своевременность, синхронизация	Целостность, доступность, своевременность, киберустойчивость, конфиденциальность	Атаки внедрения ложных данных, DOS-атаки, атаки повторного произведения

Нечеткая система обработки информационных потоков данных с учетом свойств кибербезопасности системы SCADA, WAMS. В основе предлагаемого подхода оценки качества данных заложен алгоритм, реализующий следующие этапы:

1. Определение уровня достоверности информации;
2. Определение уровня полноты информации;
3. Оценка качества информации.

Для определения уровней достоверности и полноты информации заданы лингвистические переменные (точность, последовательность, согласованность, своевременность, достаточность), определены терм-множества и дано их семантическое описание. Разработанная нечеткая система оценки качества данных измерений представлена на рис. 2.

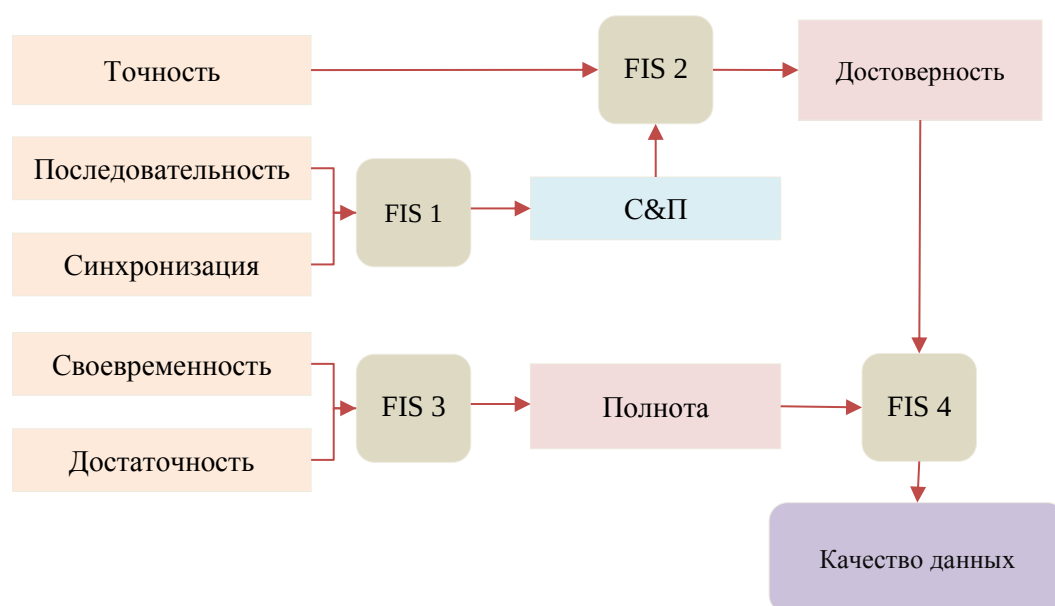


Рис. 2. Нечеткая система оценки качества данных

В зависимости от оценки качества данных выбираются предложенные в [5] модели измерений.

Пример. С учетом проблем оценивания состояния ЭЭС, возникающих при кибератаках на систему SCADA и WAMS [4, 9], построена нечеткая система оценки качества информации.

Семантическое описание входных и выходных лингвистических переменных представлено в таблицах 2-5.

Таблица 2. Уровни факторов, влияющих на достоверность информации

Уровень	Точность	Последовательность	Синхронизация
Низкий 0-0,25	Измерения содержат ошибки, в том числе не обнаруживаемые, полученные в результате кибератак	Нарушена	Данные не синхронизированы
Средний 0,25-0,75	Измерения содержат ошибки в результате кибератак, обнаруживаемые методами достоверизации.	Нарушена, но есть возможность устранения (дублирование, сравнение)	Данные не синхронизированы, но есть возможность дублирования и восстановления
Высокий 0,75-1	Измерения содержат ошибки, полученные из-за погрешности измерительных устройств и т.д, не влияющие на точность ОС ЭЭС	Не нарушена	Данные синхронизированы

Таблица 3. Уровни факторов, влияющих на полноту информации

Уровень	Своевременность	Достаточность
Низкий 0-0,25	Большое запаздывание	Отсутствие данных
Средний 0,25-0,75	Запаздывание с возможностью учета в моделях измерений	Потеря данных не значительна для решения задачи
Высокий 0,75-1	Измерения поступают без задержек	Измерения поступают в достаточном объеме

Таблица 4. Полнота и достоверность информации

Уровень	Полнота	Достоверность
Низкий 0-0,25	Система не наблюдаема	Сомнительные
Средний 0,25-0,75	Возможность дорасчета отсутствующих значений измерений	Ошибочные
Высокий 0,75-1	Избыточный объем измерений	Достоверные

Таблица 5. Качество информации

Уровень	Качество
Низкий 0-0,25	Ненаблюдаемость сети и/или недостоверность измерений
Средний 0,25-0,75	Применение методов достоверизация измерений, фильтрация ошибок, восстановление потоков измерений, учет старения информации позволят оценить состояние ЭЭС с требуемой точностью
Высокий 0,75-1	Полный достоверный поток информации

Полученные трехмерные поверхности полноты, достоверности и качества информации показаны на рис. 3-5.

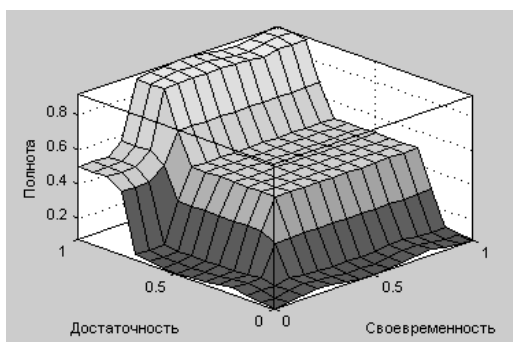


Рис. 3. Зависимость полноты информации от достаточности и своевременности поступления данных

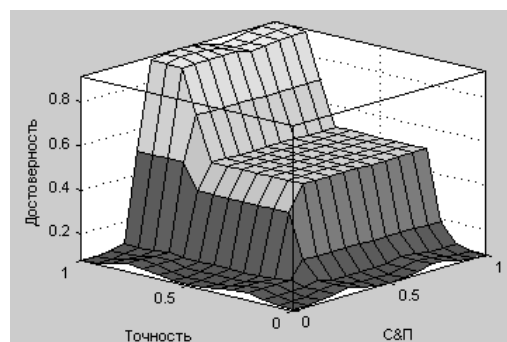


Рис. 4. Зависимость достоверности информации от точности, последовательности и синхронизации данных

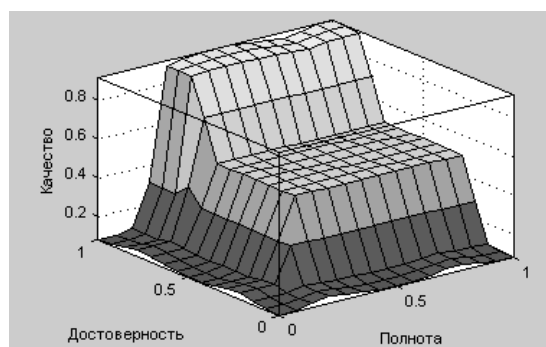


Рис. 5. Качество измерений

Как видно из полученных результатов, низкий уровень любого из входных факторов, вызванный кибератаками, влияет на качество информации (темный цвет на рис. 3-5), особенно это отражается на достоверности измерений.

Тем самым обосновывается необходимость анализа данных при решении задачи оценивания состояния ЭЭС с учетом дополнительных факторов, как предварительный этап обработки данных.

Заключение. Проанализированы свойства ЭЭС, связанные с созданием киберфизической ЭЭС. Проведенные исследования показали повышенную уязвимость таких систем к кибератакам на информационно-коммуникационную инфраструктуру.

Показана взаимозависимость свойств кибербезопасности системы SCADA, WAMS и качества измерений при кибератаках. Предложен алгоритм оценки качества данных с учетом нарушений свойств кибербезопасности как предварительный этап оценивания состояния ЭЭС, который проиллюстрирован приведенным примером.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воропай Н.И., Колосок И.Н., Коркина Е.С., Осак А.Б. Киберугрозы и кибербезопасность в электроэнергетических системах // Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи», Иркутск, Россия, 16-20 сентября 2019. Том 1. С.56-67.
2. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. М.: ИАЦ Энергия. 2010. 208 с.
3. Колосок И.Н., Гурина Л.А. Оценка рисков управления киберфизической ЭЭС на основе теории нечетких множеств // Методические вопросы исследования надежности больших

- систем энергетики: Вып. 70. Методические и практические проблемы надежности систем энергетики. В 2-х книгах. / Книга 1 / отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2019. С. 238-247.
4. Колосок И.Н., Гурина Л.А. Повышение кибербезопасности интеллектуальных энергетических систем методами оценивания состояния // Вопросы кибербезопасности. 2018. № 3(27). С. 63–69.
 5. Колосок И.Н., Гурина Л.А. Прогнозирование параметров режима при мониторинге и управлении электроэнергетической системой // Электричество. 2014. №1. С. 21-27.
 6. Массель Л.В., Колосок И.Н., Гурина Л.А. Обработка информационных потоков при мониторинге и управлении режимами интеллектуальных электроэнергетических систем / Вестник ИрГТУ. №2 (73). 2013. С. 30-35.
 7. Массель Л.В. Методы и интеллектуальные технологии научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики // Энергетическая политика. 2018. №5. С. 30-42.
 8. Савина Н.В., Гурина Л.А. Выбор критерия качества отображения информации при управлении режимами // Сб. трудов третьей Всеросс. Научн.-техн. конф. С международным участием «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов». – Благовещенск, 2003. Том 1. С. 127-132.
 9. Хохлов М.В. Уязвимость оценивания состояния ЭЭС к кибератакам // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 65. Надежность либерализованных систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай, А.Н. Назарычев. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2015. С. 557-566.
 10. Hua. Lin, Yi Deng, Sandeep Shukla, James Thorp, Lamine Mili. Cyber Security Impacts on All-PMU State Estimator – A Case Study on Co-Simulation Platform GECO // In Proc. 5-8 Nov. 2012 Smart Grid Communications (SmartGridComm). 2012 IEEE Third International Conf. 2012. Pp. 587-592
 11. K. Gai, M. Qiu, Z. Ming, H. Zhao, L. Qiu, Spoofing-Jamming Attack Strategy Using Optimal Power Distributions in Wireless Smart Grid Net-works // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. 8 (5). Pp. 2431-2439. doi: 10.1109/TSG.2017.26640.
 12. Longfei Wei, Luis Puche Rondon, Amir Moghadas, Arif I. Sarwat. Review of Cyber-Physical Attacks and Counter Defense Mechanisms for Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid // Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D) 2018 IEEE/PES. 2018. Pp. 1-9.
 13. Mohd Rihan, Mukhtar Ahmad, M. Salim Beg Vulnerability Analysis of Wide Area Measurement System in the Smart Grid // Smart Grid and Renewable Energy [Online] (Sep. 2013). P. 1-7. Available: <http://www.scirp.org/journal/sigre>.
 14. S. Sridhar, A. Hahn and M. Govindarasu. Cyber attack-resilient control for smart grid // 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington, DC. 2012. Pp. 1-3.
 15. S. Sridhar, A. Hanh, M. Govindarasu. Cyber-Physical System Security for the Electric Power Grid // Proceeding of the IEEE. Jan. 2012. Vol. 100. Pp. 210-224.
 16. T.H. Morris, P. Shengyi, U. Adhikari, Cyber Security Recommendations for Wide Area Monitoring, Protection and Control Systems // IEEE Power and Energy Society General Meeting Proceedings. July 2012. Pp. 1-6.

17. Yao Liu, Peng Ning, Michael K. Reiter. False Data Injection Attacks against State Estimation in Electric Power Grids // CCS'09 Proceedings (9-13 November 2009, Chicago, Illinois, USA). Pp. 21-32
 18. Zanoz S., Rogers K. M., Berthier R., Bobba R.B., Sanders W.H, Overbye T.J. SCPSE: Security-Oriented Cyber-Physical State Estimation for Power Grid Critical Infrastructure // IEEE Transactions on Smart Grid. December 2012. Vol.3, no.4. Pp.1790-1799.
-

UDK 621.311 : 004.056

**QUALITY ASSESSMENT OF SCADA AND WAMS DATA IN THE CASE OF
CYBERATTACKS ON INFORMATION AND COMMUNICATION INFRASTRUCTURE
OF EPS²**

Irina N. Kolosok

Professor, Leading Researcher of Laboratory of Electric Power Systems Operation and Control,
e-mail: kolosok@isem.irk.ru

Liudmila A. Gurina

Doctor, Senior Researcher of Laboratory of Electric Power Systems Operation and Control,
e-mail: gurina@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. The reliable operation of the electric power systems (EPSs) depends on the quality of data provided by SCADA and WAMS, which are part of the information and communication infrastructure of cyber-physical EPS. Increasing threats to cyber security of EPS indicate the need to develop data analysis methods capable to take into account the effects of cyberattacks on systems for collecting, transmitting and processing the information. The findings of the studies have shown the impact of cyberattacks on the quality of data. The interdependence between the violation of cybersecurity properties and the low quality of data is revealed. The paper proposes an algorithm for quality assessment of SCADA and WAMS data, taking into account the cybersecurity properties of information and communication infrastructure of EPS.

Keywords: quality of data, SCADA, WAMS, cybersecurity, fuzzy logic.

References

1. Voropaj N.I., Kolosok I.N., Korkina E.S., Osak A.B. Kiberugrozy i kiberbezopasnost' v elektroenergeticheskikh sistemah [Cyber threats and cybersecurity in electric power systems] // Sbornik dokladov vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Elektroenergetika glazami molodezhi" = in Proceedings of the All-Russian Science and Technology al conference "Power

² The research was carried out as part of the scientific project III.17.4.2. of the basic research program SB RAS, reg. number AAAA-A17-117030310438-1.

- Engineering through the Eyes of Youth”, Irkutsk, Rossiya, 16-20 sentyabrya 2019= Irkutsk, Russia, September 16–20, 2019, Tom 1=Vol.1. Pp. 56-67. (in Russian)
2. Kobec B.B., Volkova I.O. Innovacionnoe razvitie elektroenergetiki na baze koncepcii Smart Grid [Innovative development of the electric power industry based on the Smart Grid concept] // M.: IAC Energiya. 2010. 208 p.
 3. Kolosok I.N., Gurina L.A. Ocenka riskov upravleniya kiberfizicheskoy EES na osnove teorii nechetkih mnozhestv [Risk control assessment of cyber-physical power system based on the theory of fuzzy sets] // Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki: Vyp. 70. Metodicheskie i prakticheskie problemy nadezhnosti sistem energetiki. V 2-h knigah. / Kniga 1 / otv. red. N.I. Voropaj. Irkutsk: ISEM SO RAN. 2019. Pp. 238-247.
 4. Kolosok I.N., Gurina L.A. Povyshenie kiberbezopasnosti intellektual'nyh energeticheskikh sistem metodami ocenivaniya sostoyaniya [Improvement of Cybersecurity of Smart Grid by State Estimation Methods] // Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity issues. 2018. № 3 (27). Pp. 63–69. (in Russian)
 5. Kolosok I.N., Gurina L.A. Prognozirovaniye parametrov rezhima pri monitoringe i upravlenii elektroenergeticheskoy sistemoy [Prediction of state variables in monitoring and control of the electric power system] // Elektrichestvo = Electricity. 2014. №1. Pp. 21-27. (in Russian)
 6. Massel' L.V., Kolosok I.N., Gurina L.A. Obrabotka informacionnykh potokov pri monitoringe i upravlenii rezhimami intellektual'nyh elektroenergeticheskikh sistem [Information flow processing when monitor and control Smart Grid regimes] // Vestnik IrGTU = Proceedings of ISTU. 2013. №2(73). Pp. 30-35. (in Russian)
 7. Massel' L.V. Metody i intellektual'nye tekhnologii nauchnogo obosnovaniya strategicheskikh reshenij po cifrovoj transformacii energetiki [Methods and intelligent technologies for scientific substantiation of strategic solutions on digital transformation of energy industry] // Energeticheskaya politika = Energy Policy. 2018. №5. Pp. 30-42. (in Russian)
 8. Savina N.V., Gurina L.A. Vybór kriteriya kachestva otobrazheniya informacii pri upravlenii rezhimami [Selection of a quality criterion for displaying the data when managing modes] // Sb. trudov tret'ej Vseross. Nauchn.-tekhn. konf. S mezhdunarodnym uchastiem “Energetika: upravlenie, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniya energoresursov” = in Proceedings of the third All-Russian Science and Technology Conference with international participation “Energy: Management, Quality and Efficiency of Energy Use”. – Blagoveshchensk, 2003. t. 1. Pp. 127-132.
 9. Hohlov M.V. Uyazvimost' ocenivaniya sostoyaniya EES k kiberatakam [Vulnerability of EPS state estimation to cyberattacks] // Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki. Vyp. 65. Nadezhnost' liberalizovannykh sistem energetiki / otv. red. N.I. Voropaj, A.N. Nazarychev. Irkutsk: ISEM SO RAN. 2015. Pp. 557-566
 10. Hua. Lin, Yi Deng, Sandeep Shukla, James Thorp, Lamine Mili. Cyber Security Impacts on All-PMU State Estimator – A Case Study on Co-Simulation Platform GECO // In Proc. 5-8 Nov. 2012 Smart Grid Communications (SmartGridComm). 2012 IEEE Third International Conf. 2012. Pp. 587-592
 11. K. Gai, M. Qiu, Z. Ming, H. Zhao, L. Qiu, Spoofing-Jamming Attack Strategy Using Optimal Power Distributions in Wireless Smart Grid Net-works // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. 8 (5). Pp. 2431-2439. doi: 10.1109/TSG.2017.26640.
 12. Longfei Wei, Luis Puche Rondon, Amir Moghadasi, Arif I. Sarwat. Review of Cyber-Physical Attacks and Counter Defense Mechanisms for Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid // Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D) 2018 IEEE/PES. 2018. Pp. 1-9.

13. Mohd Rihan, Mukhtar Ahmad, M. Salim Beg Vulnerability Analysis of Wide Area Measurement System in the Smart Grid // Smart Grid and Renewable Energy [Online] (Sep. 2013). P. 1-7. Available: <http://www.scirp.org/journal/sigre>.
14. S. Sridhar, A. Hahn and M. Govindarasu. Cyber attack-resilient control for smart grid // 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Washington, DC. 2012. Pp. 1-3.
15. S. Sridhar, A. Hanh, M. Govindarasu. Cyber-Physical System Security for the Electric Power Grid // Proceeding of the IEEE. Jan. 2012. Vol. 100. Pp. 210-224.
16. T.H. Morris, P. Shengyi, U. Adhikari, Cyber Security Recommendations for Wide Area Monitoring, Protection and Control Systems // IEEE Power and Energy Society General Meeting Proceedings. July 2012. Pp. 1-6.
17. Yao Liu, Peng Ning, Michael K. Reiter. False Data Injection Attacks against State Estimation in Electric Power Grids // CCS'09 Proceedings (9-13 November 2009, Chicago, Illinois, USA). Pp. 21-32
18. Zanoz S., Rogers K. M., Berthier R., Bobba R.B., Sanders W.H, Overbye T.J. SCPSE: Security-Oriented Cyber-Physical State Estimation for Power Grid Critical Infrastructure // IEEE Transactions on Smart Grid. December 2012. Vol.3, no.4. Pp.1790-1799.

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Дунаев Андрей Михайлович

Инженер, e-mail: west-ma@yandex.ru

Дунаев Михаил Павлович

Д.т.н., профессор

Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ),
Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Аннотация. В рамках настоящей статьи представлен способ обеспечения надёжности функционирования сложного электрооборудования на транспорте, основанный на разработке системы интеллектуального диагностирования промышленных преобразователей частоты, входящих в состав частотно-регулируемых электроприводов. Авторами предложена процедура получения оптимального логического алгоритма диагностирования данного оборудования и выполнена программная реализация означенной процедуры. Получен искомый алгоритм, определяющий структуру базы знаний экспертной системы для диагностирования промышленных преобразователей частоты. Корректность и эффективность функционирования экспертной системы, реализованной в соответствии с указанной структурой, подтверждена на практике.

Ключевые слова: промышленный преобразователь частоты; логический алгоритм диагностирования; структура базы знаний; экспертная система.

Цитирование: Дунаев А.М., Дунаев М.П. Диагностирование электрооборудования на транспорте с использованием интеллектуальных систем. // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 1 (17). С.79 – 88. DOI: 10.38028/ESI.2020.17.1.006

Введение. Актуальной задачей в сфере транспорта является обеспечение надёжности функционирования сложного электрооборудования (ЭО). К означенной технике принадлежат промышленные преобразователи частоты (ПЧ), входящие в состав частотно-регулируемых электроприводов [1, 7].

Один из перспективных способов решения вышеизложенной задачи заключается в разработке систем диагностирования оборудования, основывающихся на технологиях искусственного интеллекта, логических методах технической диагностики и эвристических знаниях экспертов [2, 6, 11, 12].

Основная цель данной работы состоит в получении оптимального логического алгоритма диагностирования [10] промышленных преобразователей частоты, определяющего структуру базы знаний экспертной системы для диагностирования указанного оборудования.

1. Анализ объекта диагностирования. Логический алгоритм диагностирования опирается на функциональную схему диагностируемого устройства и представляет собой

описание последовательности выполнения элементарных диагностических проверок над его функциональными блоками [8].

Функциональная схема подключения промышленного преобразователя частоты (ПЧ) к электрической сети [6], представлена на рисунке 1.

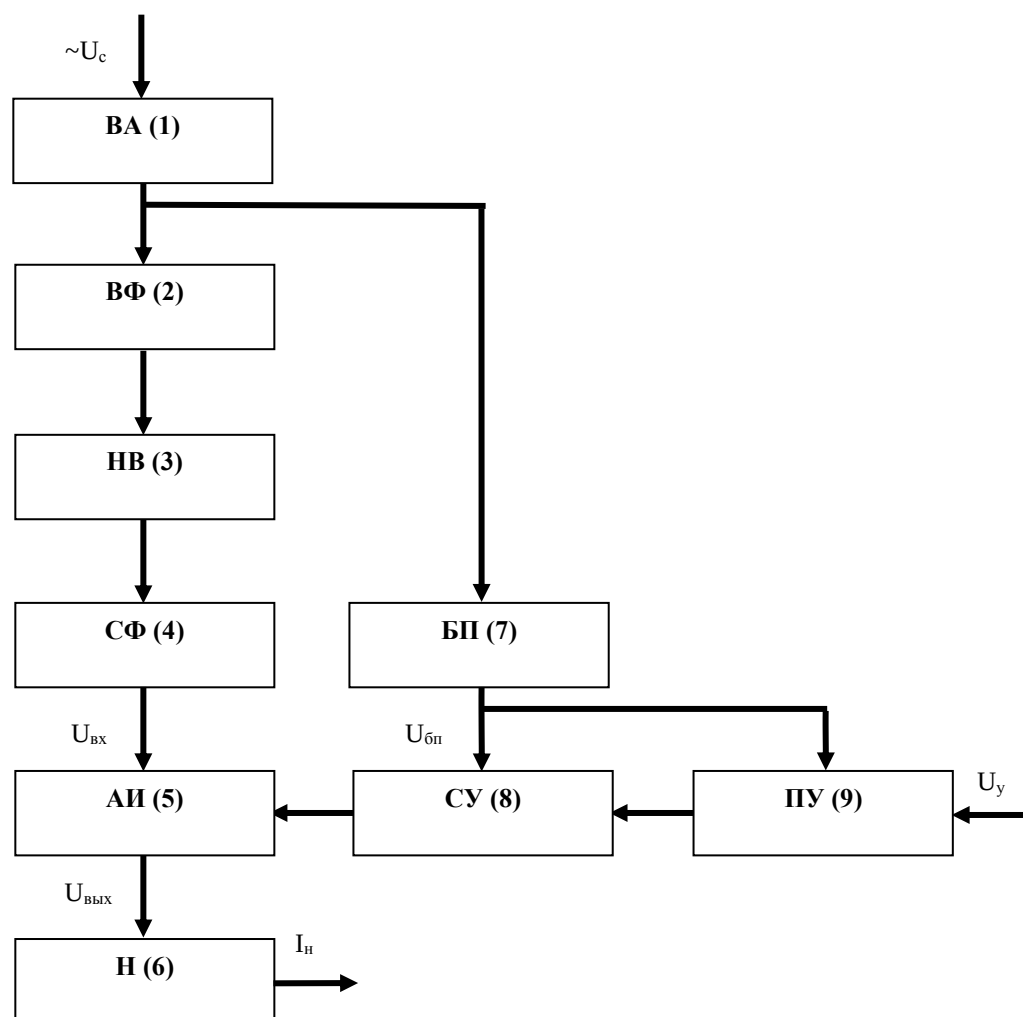


Рис.1. Функциональная схема подключения промышленного ПЧ

На рисунке 1 имеют место следующие условные обозначения: ВА – вводной автоматический выключатель; ВФ – входной фильтр; НВ – неуправляемый выпрямитель; СФ – сглаживающий фильтр; АИ – автономный инвертор; Н – нагрузка преобразователя; БП – блок питания системы управления; СУ – система управления; ПУ – панель управления; $\sim U_c$ – напряжение питающей сети переменного тока; $U_{вх}$ – входное напряжение силовой схемы преобразователя; $U_{вых}$ – выходное напряжение преобразователя; I_n – ток нагрузки; $U_{бп}$ – выходное напряжение блока питания; U_y – сигнал задания выходной частоты.

Характеристики технических состояний промышленного преобразователя частоты – вес технического состояния $p(e_i)$ и время доступа (цена проверки) $t(e_i)$ – указаны в таблице 1 (символом i обозначен номер функционального блока).

Таблица 1. Характеристики технических состояний ПЧ

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p(e_i)$	0,01	0,04	0,05	0,02	0,4	0,1	0,14	0,2	0,04
$t(e_i)$	0,05	0,05	0,1	0,02	0,07	0,06	0,05	0,5	0,1

2. Получение оптимального алгоритма диагностирования. Получение оптимального логического алгоритма диагностирования промышленных преобразователей частоты представляет собой классическую задачу математической оптимизации [3].

Критерием оптимальности логического алгоритма диагностирования является минимальность средних затрат на определение одного технического состояния объекта диагностирования, вследствие чего целевая функция оптимизации может быть описана нижеизложенным выражением:

$$C(Z_0, E_T) = \sum_{i=1}^N [p(e_i) \sum_{z_0}^{z_i} t(e_k)] \rightarrow \min \quad (1)$$

где Z_0 – первая проверка алгоритма диагностирования;

E_T – множество всех технических состояний объекта диагностирования.

Имеющие место функциональные ограничения описываются системой неравенств:

$$\left. \begin{array}{l} 0 < p(e_i) < 1 \\ 0 < t(e_k) < 1 \end{array} \right\} \quad (2)$$

В качестве метода оптимизации выбран алгоритмический регулярный метод прямого перебора [3].

Процедура решения поставленной задачи [5] включает следующие этапы:

- Анализ функциональной схемы подключения диагностируемого оборудования.
- Выбор блока первой диагностической проверки.
- Построение блочных номенклатур ветвей алгоритмического дерева
- Составление полного массива последовательностей проверок (ПМПП).
- Нахождение последовательностей, удовлетворяющих критерию оптимальности.
- Синтез дерева алгоритма из полученных составных частей.

Блок-схема алгоритма составления ПМПП (ключевого этапа) [5] приведена на рис. 2, содержащем следующие условные обозначения: ЛМВП0 – логический массив выполнения проверок, формируемый на случай получения неисправных выходных сигналов; ЛМВП1 – логический массив выполнения проверок, формируемый на случай получения исправных выходных сигналов; МБНВ – множество блочной номенклатуры ветви; У1 – условие, состоящее в сочетании исчерпанности кандидатов младшего уровня с невозможностью формирования из оставшихся кандидатов такой последовательности, которая являлась бы равнозначной номенклатуре ветви без блока, соответствующего элементу МБНВ[1].

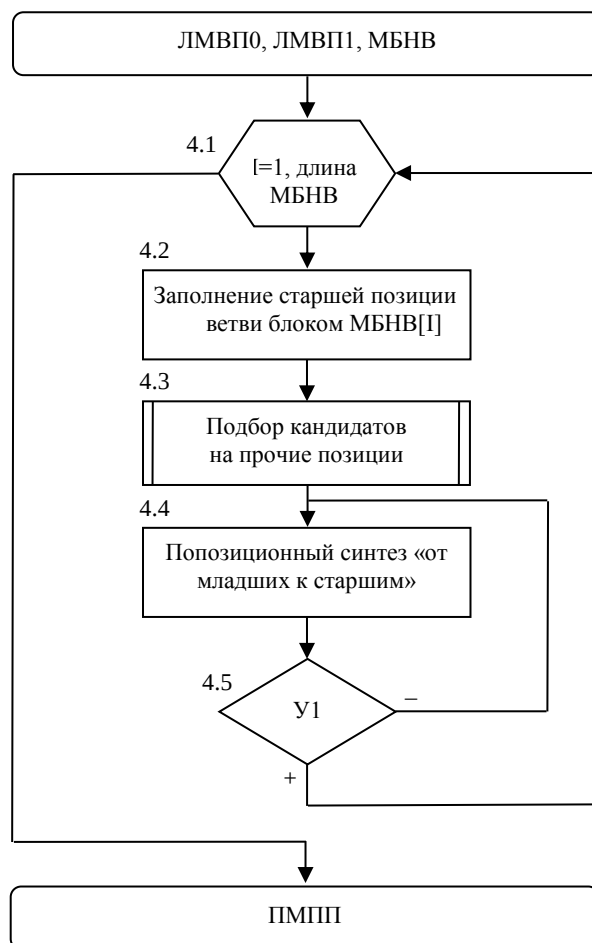


Рис.2. Блок-схема алгоритма составления ПМПП

Процедура реализована для промышленных ПЧ созданием приложения «FC_OPTIM», структура которого показана на рис. 3, содержащем следующие условные обозначения: ТХ – таблица характеристик; ОА – оптимальный алгоритм диагностирования промышленных ПЧ.

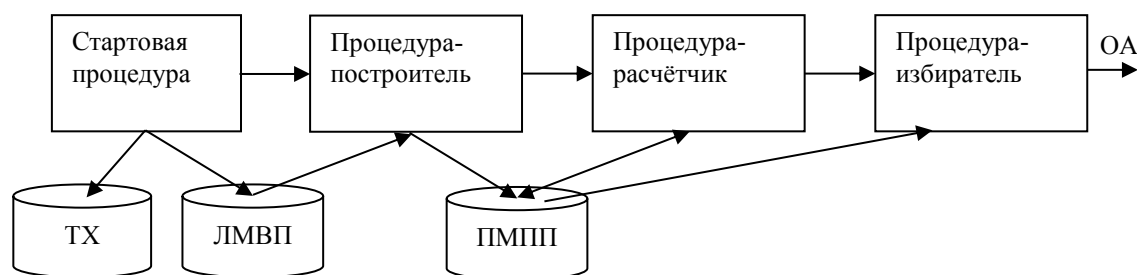


Рис.3. Структура приложения для получения ОА диагностирования ПЧ

Стартовая процедура обеспечивает подготовку формы приложения к работе и исполнение первого этапа. Посредством процедуры-построителя осуществляется выполнение второго, третьего и четвёртого этапов. Процедура-расчётчик и процедура-избиратель служат реализации пятого этапа вышеизложенной методики. Для исполнения её шестого этапа отдельной процедуры не требуется.

На рис. 4 показаны результаты работы приложения «FC_OPTIM».

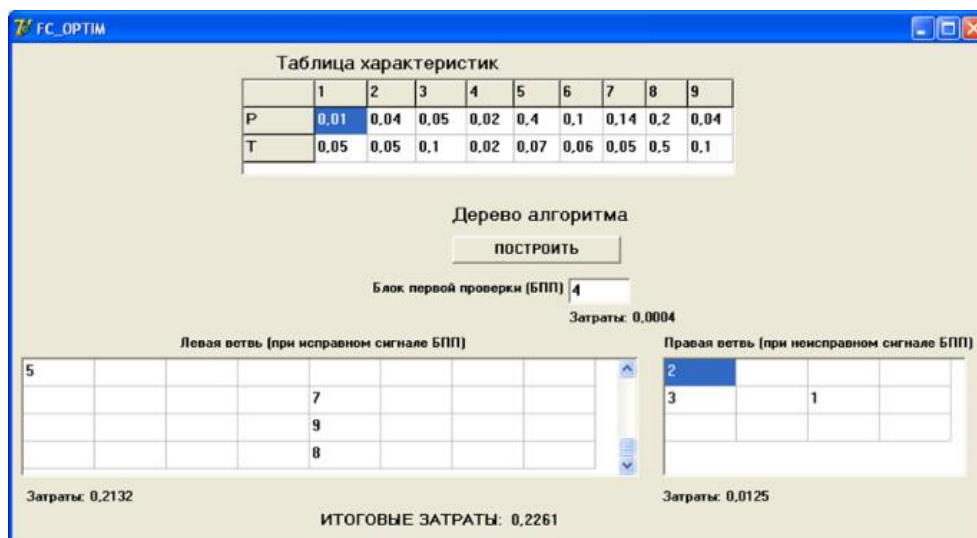


Рис.4. Результаты работы приложения для получения ОА диагностирования ПЧ

Система представления дерева алгоритма в «FC_OPTIM» [5] такова: ячейка с номером блока, подлежащего проверке при получении исправного выходного сигнала (левая дочерняя позиция), располагается на следующей строке таблицы непосредственно под ячейкой с номером блока произведённой элементарной проверки (родительской позиции); ячейка с номером блока, подлежащего проверке при получении неисправного сигнала (правая дочерняя позиция), находится правее левой дочерней позиции на соответственно $1, 2, 2^2, \dots, 2^{n-k}$ ячеек (где n – общее число уровней блоков-кандидатов, k – индекс уровня рассматриваемой родительской позиции, 0 – индекс уровня дочерних позиций БПП).

Полученное представление дерева оптимального алгоритма соответствует размещённому на рис. 5 графу нового МРТ–алгоритма диагностирования.

На рис. 5 имеют место следующие условные обозначения: круги с цифрами внутри – элементарные проверки функциональных блоков, кратко обозначаемых соответствующими номерами (см. рисунок 1); цифры 1 и 0 – результаты означенных проверок блоков (исправен – неисправен); прямоугольники – итоги диагностирования (цифра внутри прямоугольника означает номер неисправного блока).

Первая элементарная проверка при разработке рассматриваемого МРТ–алгоритма, являющегося алгоритмом метода поиска по критерию минимума времени первой проверки и с учётом характеристик технических состояний, должна обладать наименьшим значением времени проверки $t(e_i)$. При равенстве времён элементарных проверок в качестве первой следует выбирать такую проверку, которая контролирует функциональный элемент, расположенный ближе к центральной части функциональной схемы объекта диагностирования. Последующие проверки выбираются с учётом характеристик технических состояний, в порядке убывания значения величины $p(e_i)/t(e_i)$.

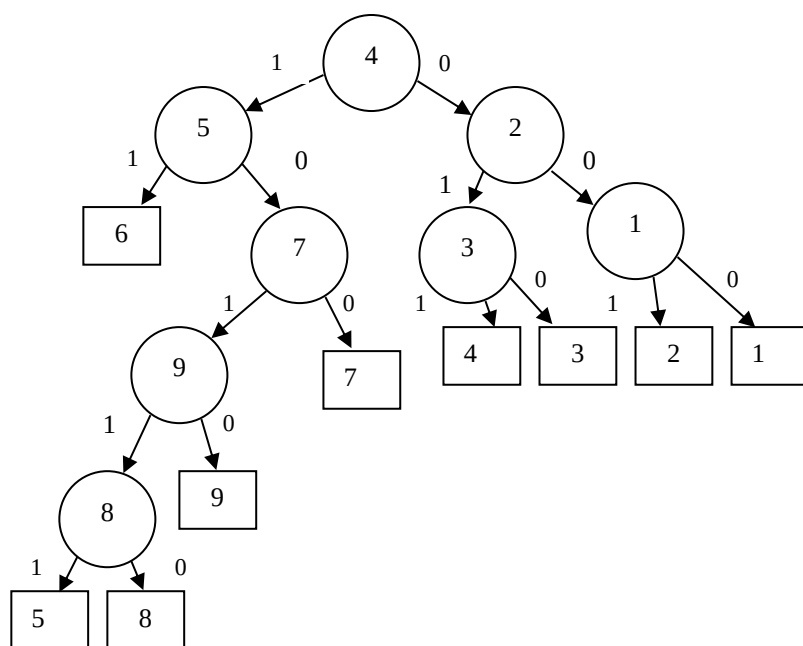


Рис.5. Граф ОА диагностирования ПЧ

3. Реализация диагностической экспертной системы. В соответствии с порядком выполнения элементарных диагностических проверок, регламентированным МРТ-алгоритмом, построена структура базы знаний экспертной системы для диагностирования промышленных преобразователей частоты [4]. Графическое представление означенной структуры приведено на рис. 6.

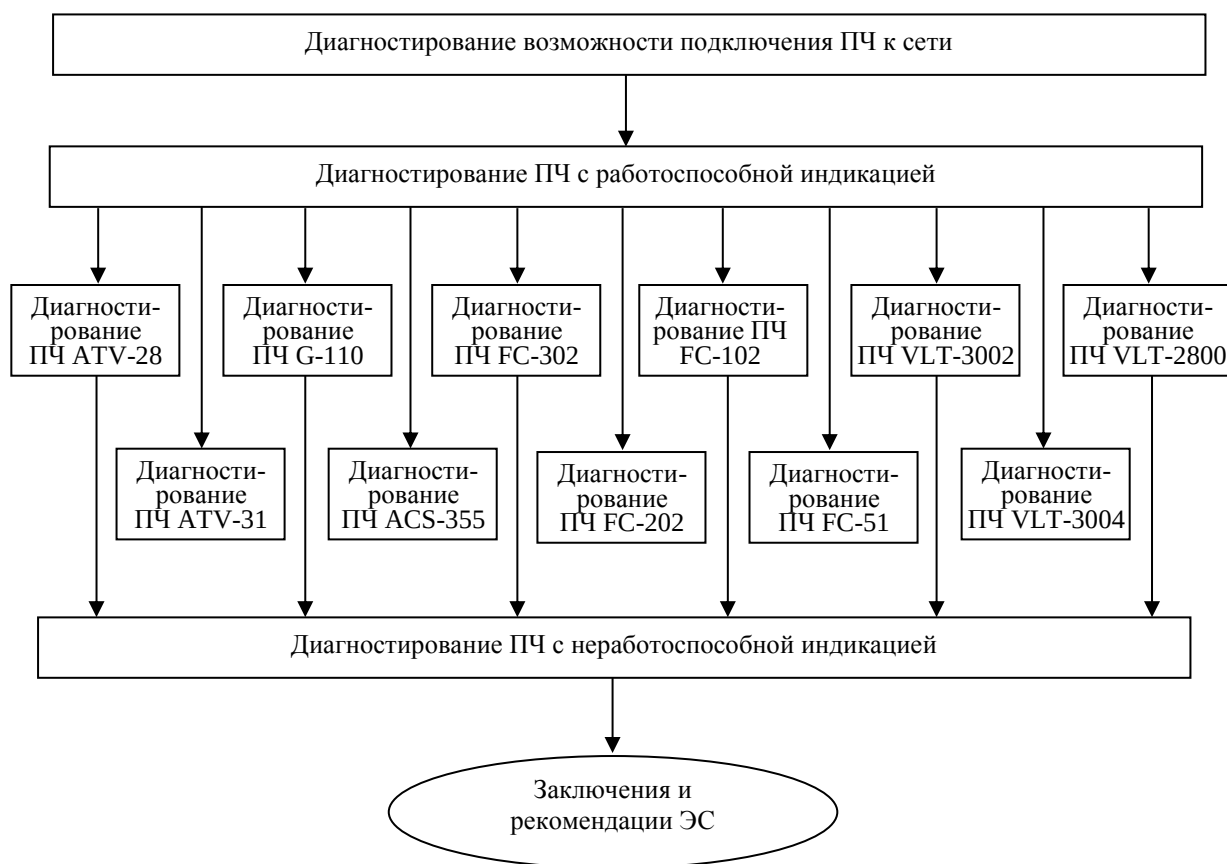


Рис. 6. Наиболее эффективная структура базы знаний ЭС для диагностирования ПЧ

В качестве инструментального средства построения базы знаний ЭС в соответствии с предложенной структурой выбрана разработанная Леонидом Вадимовичем Аршинским система моделирования правдоподобных рассуждений на основе логик с векторной семантикой «Гераклит» [9].

Корректность и эффективность работы реализованной экспертной системы «FCTD1» подтверждена серией экспериментов, проведённых в лабораторных условиях.

Пример функционирования системы проиллюстрирован рис. 7.

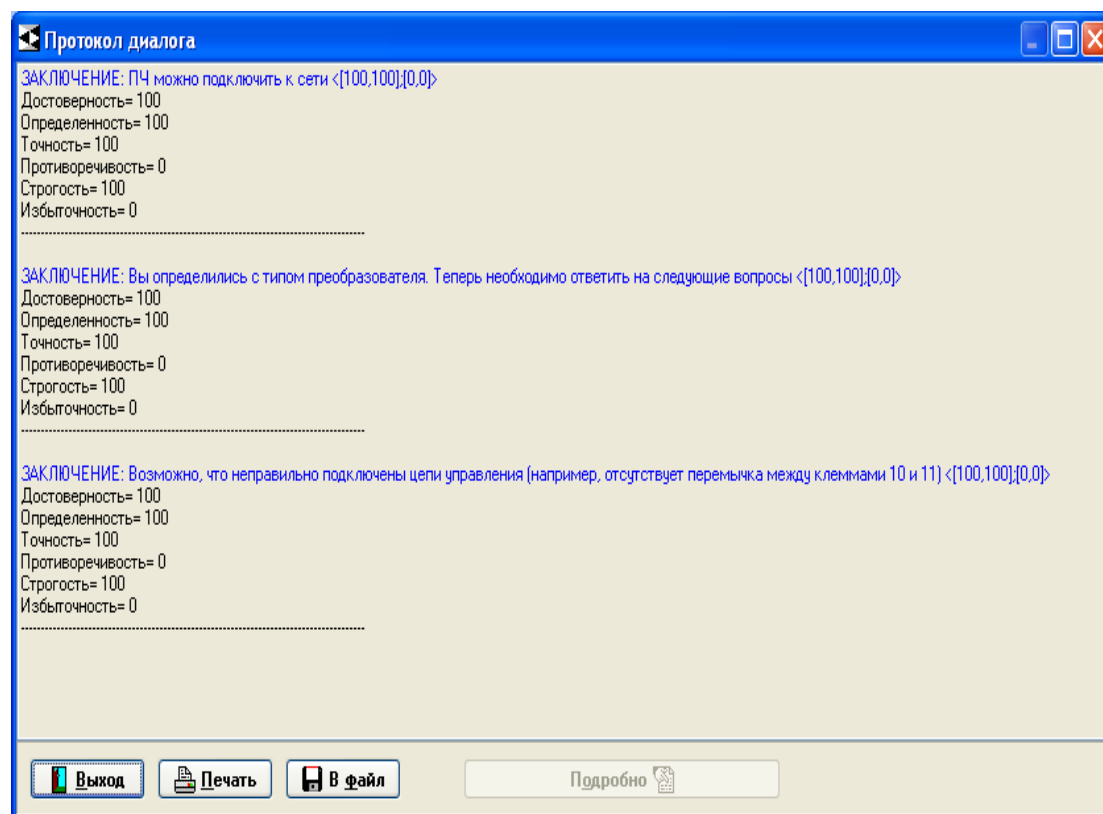


Рис. 7. Пример функционирования ЭС для диагностирования ПЧ

В рассматриваемом случае взаимодействие экспертной системы «FCTD1» с пользователем позволяет ей выявить возможность корректного подключения промышленного преобразователя частоты к электрической сети, работоспособность его предупреждающей индикации, и, наконец, искомую неисправность.

Заключение. В рамках настоящего исследования получен оптимальный логический алгоритм диагностирования промышленных преобразователей частоты, входящих в состав частотно-регулируемых электроприводов на транспорте.

С опорой на порядок выполнения диагностических проверок, предписываемый данным алгоритмом, а также эвристические знания экспертов в сфере диагностирования сложного электрооборудования, построена структура базы знаний экспертной системы для диагностирования промышленных преобразователей частоты.

Корректность и эффективность функционирования экспертной системы «FCTD1», реализованной в соответствии с предложенной структурой, подтверждена на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникин, А.С. Опыт внедрения частотно-регулируемого электропривода на базе преобразователя частоты VACON на самоходный вагон в 15 К / А.С. Аникин // Известия ТулГТУ. Технические науки. 2010. № 3. С. 220-226.
2. Васюченко, П.В. Повышение надёжности работы электрооборудования путём применения методов диагностики / П.В. Васюченко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 5(123). С. 27-34.
3. Вентцель, Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е.С. Вентцель. М. : Гл. ред. физ. мат. лит., 1988. 208 с.
4. Дунаев, А.М. Метод структурирования базы знаний экспертной системы для диагностирования электрического оборудования / А.М. Дунаев, М.П. Дунаев, С.К. Каргапольцев, В.Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1(53). С. 86-89.
5. Дунаев, А.М. Процедура построения оптимального логического алгоритма диагностирования / А.М. Дунаев // Вестник ИрГТУ. 2018. № 9(140). С. 82-90.
6. Дунаев, М.П. Экспертные системы для наладки электропривода / М.П. Дунаев. Иркутск : ИрГТУ, 2004. 138 с.
7. Кузькин, В.И. Высоковольтный преобразователь частоты для питания асинхронных двигателей / В.И. Кузькин, В.Н. Мелешкин, С.В. Мясищев, Д.В. Симоненков, С.Н. Шипаева // Электротехника. 2004. № 10. С. 19-24.
8. Пархоменко, П.П. Основы технической диагностики (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства): учебное пособие / П.П. Пархоменко. М. : Энергия, 1981. 320 с.
9. Свидетельство об официальной регистрации в Реестре программ для ЭВМ программы для ЭВМ «Гераклит 2.X». № 2013616260 от 02.07.2013, Российская Федерация, Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). Система моделирования правдоподобных рассуждений на основе логик с векторной семантикой / Л.В. Аршинский; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения.
10. Фандеев, В.П. Модели, методы и алгоритмы оптимизации диагностирования микромеханических датчиков: учебное пособие / В.П. Фандеев, В.С. Волков, И.Н. Баринов. Пенза : ПГУ, 2013. 56 с.
11. Babak, V.P. Diagnostic Systems For Energy Equipments / V.P. Babak, S.V. Babak, M.V. Myslovych, A.O. Zaporozhets, V.M. Zvaritch. Warsaw : Springer, 2020. 133 p.
12. Recent Advances in Automation, Robotics And Measuring Techniques / Edited by R. Szweczyk [et al.]. Warsaw : Springer, 2014. 744 p.

UDK 621.314.5

**DIAGNOSTICS OF ELECTRICAL EQUIPMENT IN TRANSPORT
USING INTELLIGENT SYSTEMS**

Andrey M. Dunaev

Engineer, e-mail: west-ma@yandex.ru

Mikhail P. Dunaev

D. of T.S., Professor

Irkutsk National Research Technical University (ISTU),
Russian Federation, Irkutsk, Lermontov Str., 83

Abstract. As part of this article, a method for ensuring the reliability of the operation of complex electrical equipment in transport is presented. The method consists in developing an intelligent diagnosis system for industrial frequency converters that are part of frequency-controlled electric drives. The authors proposed a procedure for obtaining the optimal logical algorithm for diagnosis of this equipment and performed a software implementation of this procedure. The desired algorithm is obtained. It determines the structure of the knowledge base of the expert system for diagnosis of industrial frequency converters. The correctness and efficiency of the expert system, implemented in accordance with the specified structure, is confirmed in practice.

Keywords: industrial frequency convertor; logical diagnosis algorithm; knowledgebase structure; expert system.

References

1. Anikin, A.S. Opyt vnedreniya chastotno-reguliruemogo elektroprivoda na baze preobrazovatelya chastoty VACON na samohodnyj vagon v 15 K [Experience in introducing a frequency-controlled electric drive based on a VACON frequency converter to a self-propelled carriage of 15 K] / A.S. Anikin // Izvestiya TulGTU. Tekhnicheskie nauki = News of TulSTU. Technical science. 2010. No. 3. Pp. 220-226. (In Russian).
2. Vasyuchenko, P.V. Povyshenie nadyozhnosti raboty ehlektrooborudovaniya putyom primeneniya metodov diagnostiki [Improving the reliability of electrical equipment through the use of diagnostic methods] / P.V. Vasyuchenko // Ehnergoberezhenie. Ehnergetika. Ehnergoaudit = Energy saving. Energy. Energy audit. 2014. No. 5(123). Pp. 27-34. (In Russian).
3. Ventcel', E.S. Issledovanie operacij: zadachi, principy, metodologiya [Operations research: tasks, principles, methodology] / E.S. Ventcel'. – M. : Gl. Red. Fiz. Mat. Lit. = The Main Red. of Phys. and Math. Lit. Publ., 1988. 208 p. (In Russian).
4. Dunaev, A.M. Metod strukturirovaniya bazy znaniy ekspertnoj sistemy dlya diagnostirovaniya elektricheskogo oborudovaniya [The method of structuring the knowledge base of an expert system for diagnosing electrical equipment] / A.M. Dunaev, M.P. Dunaev, S.K. Kargapol'cev,

- V.E. Gozbenko // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2017. No. 1(53). Pp. 86-89. (In Russian).
5. Dunaev, A.M. Procedura postroeniya optimal'nogo logicheskogo algoritma diagnostirovaniya [The procedure for constructing an optimal logical diagnostic algorithm] / A.M. Dunaev // *Vestnik IrGTU [ISTU Bulletin]*. 2018. No. 9(140). Pp. 82-90. (In Russian).
 6. Dunaev, M.P. Ekspertnye sistemy dlya naladki elektroprivoda [Expert systems for setting up an electric drive] / M.P. Dunaev. – Irkutsk : ISTU = ISTU Publ. 2004. 138 p. (In Russian).
 7. Kuz'kin, V.I. Vysokovol'tnyj preobrazovatel' chastoty dlya pitaniya asinhronnyh dvigatelej [High-voltage frequency converter for powering induction motors] / V.I. Kuz'kin, V.N. Meleshkin, S.V. Myasishchev, D.V. Simonenkov, S.N. Shipaeva // *Elektrotehnika = Electrical Engineering*. 2004. No. 10. Pp. 19-24. (In Russian).
 8. Parhomenko, P.P. Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki (Optimizaciya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturnye sredstva): uchebnoe posobie [Fundamentals of technical diagnostics (Optimization of diagnostic algorithms, hardware): a training manual] / P.P. Parhomenko. M. : Energiya = Energy Publ. 1981. 320 p. (In Russian).
 9. Svidetel'stvo ob oficial'noj registracii v Reestre programm dlya EHVM programmy dlya EHVM «Geraklit 2.X». № 2013616260 ot 02.07.2013, Rossijskaya Federaciya, Federal'naya sluzhba po intellektual'noj sobstvennosti (Rospatent). Sistema modelirovaniya pravdopodobnyh rassuzhdenij na osnove logik s vektornoj semantikoj / L.V. Arshinskij; zayavitel' i patentoobladatel' – Irkutskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya. [Certificate of official registration in the Register of Computer Programs for the computer program "Heraclit 2.X". No. 2013616260 of 02.07.2013, the Russian Federation, the Federal Service for Intellectual Property (Rospatent). A simulation system for plausible reasoning based on logics with vector semantics. Arshinsky; the applicant and the patent holder are the Irkutsk State University of Communications]. (In Russian).
 10. Fandeev, V.P. Modeli, metody i algoritmy optimizacii diagnostirovaniya mikromekhanicheskikh datchikov: uchebnoe posobie [Models, methods and algorithms for optimizing the diagnosis of micromechanical sensors: a training manual] / V.P. Fandeev, V.S. Volkov, I.N. Barinov. Penza : PGU = PGU Publ., 2013. 56 p. (In Russian).
 11. Babak, V.P. Diagnostic Systems For Energy Equipments / V.P. Babak, S.V. Babak, M.V. Myslovych, A.O. Zaporozhets, V.M. Zvaritch. Warsaw : Springer = Springer Publ., 2020. 133 p. (In English).
 12. Recent Advances in Automation, Robotics And Measuring Techniques / Edited by R. Szewczyk [et al.]. Warsaw : Springer = Springer Publ., 2014. 744 p. (In English).

УДК 004.822: (620.9+504.05)

СИСТЕМА ОНТОЛОГИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Ворожцова Татьяна Николаевна,

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

e-mail: tnn@isem.irk.ru

Майсюк Елена Петровна,

к.э.н., с.н.с. лаборатории энергоснабжения децентрализованных потребителей

e-mail: maysyuk@isem.irk.ru

Иванова Ирина Юрьевна

к.э.н., зав. лабораторией энергоснабжения децентрализованных потребителей

e-mail: nord@isem.irk.ru

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

Аннотация. В работе предлагается разработка системы взаимосвязанных онтологий, предназначенных для формализованного описания и согласования терминологии разных предметных областей – энергетики и экологии, при выполнении исследований вредного воздействия объектов энергетики на окружающую среду. Работа выполняется в рамках проекта РФФИ «Методы построения онтологического пространства знаний для интеллектуальной поддержки принятия решений в энергетике и экологии с учетом качества жизни». Выполнен онтологический инжиниринг предметной области исследований. Рассматриваются методические подходы, используемые при исследовании проблемы антропогенного влияния объектов энергетики и проведении соответствующих количественных оценок. Для систематизации экологических оценок и установления зависимостей между основными показателями, описывающими влияние энергетической деятельности на элементы природной среды, предлагаются семантические методы, в частности онтологический инжиниринг предметной области. Онтологический подход систематизирует используемую базовую терминологию и позволяет наглядно представить взаимосвязи между элементами природной среды, объектами энергетики и их характеристиками, факторами воздействия, а также позволяет выстроить последовательность проведения исследований и систематизировать методическое обеспечение, применяемое для оценки влияния энергетики на природную среду.

Ключевые слова: Антропогенное влияние, антропогенный фактор, антропогенное воздействие, антропогенное загрязнение, онтологический инжиниринг, экология, энергетика.

Цитирование: Ворожцова Т.Н., Майсюк Е.П., Иванова И.Ю. Система онтологий для исследования антропогенного влияния объектов энергетики на окружающую среду.

//Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 1 (17). С. 89–104. DOI: 10.38028/ESI.2020.17.1.007

Введение. Оценка воздействия энергетических объектов на окружающую среду, несомненно, является актуальной проблемой. В ИСЭМ СО РАН выполняются работы по использованию семантических методов, в том числе онтологического моделирования данной предметной области. В настоящее время в институте при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований реализуется проект "Методы построения онтологического пространства знаний для поддержки интеллектуального принятия решений в энергетике и экологии с учетом качества жизни населения". Этот проект предполагает системный анализ методологии исследования воздействия энергетики на окружающую среду, существующих методов и моделей исследований, а также анализ источников информации и систематизацию показателей, используемых для реализации этих методов. В предлагаемой работе оценка влияния энергетического сектора означает комплексное рассмотрение взаимосвязи между процессами, происходящими на различных уровнях изучаемых явлений: от воздействия энергетических объектов, которое впоследствии создает антропогенное загрязнение, до последствий в виде изменения компонентов природной среды.

Онтологический инжиниринг предполагает разработку онтологий, обеспечивающих анализ и согласование терминологии предметных областей энергетики и экологии, пересекающихся в данном исследовании, установление взаимосвязей между используемыми терминами и структурирование необходимой для этого информации. Онтологический инжиниринг, выполненный ранее в области исследования взаимодействия энергетики и геоэкологии [7], отражает многообразие антропогенных факторов на различных стадиях процесса производства тепловой и электрической энергии. Антропогенное воздействие включает в себя все виды воздействия, производимого деятельностью человека на окружающую среду.

В статье выполняется анализ существующих методов оценки влияния объектов энергетики на окружающую среду с целью структурирования необходимого для этого методического обеспечения и основное внимание уделяется влиянию генерирующих объектов энергетики [6].

1. Влияние энергетики на природную среду и классификация антропогенных факторов.

Антропогенное загрязнение природной среды в последние десятилетия носит глобальный характер. Современное воздействие человека на природу сводится к следующим основным формам, связанным с изменениями [4, 15, 22, 23]:

- ландшафта и структуры земной поверхности;
- состава биосферы;
- теплового баланса планеты или ее отдельных районов;
- растительного и животного мира.

Антропогенное воздействие приводит к изменению состояния природной среды, в составе которой появляются новые компоненты – загрязнения. Объектами загрязнений служат атмосфера, почва, вода, растения, животные, микроорганизмы. Источниками загрязнений являются промышленные предприятия, в том числе энергетические и коммунально-бытовые объекты.

Топливо-энергетический комплекс является одним из наиболее серьезных источников загрязнений. Антропогенное воздействие энергетики на биосферу проявляется на

всех стадиях производства энергии – при извлечении и транспортировке ресурсов, при производстве, передаче и потреблении энергии.

Функционирование предприятий энергетики оказывает влияние на все элементы природной среды – атмосферу, водные объекты, растительный и животный мир, человека. Добыча энергоресурсов связана с изменением ландшафта, образованием карьеров и отвалов. Транспортировка угля приводит к распространению вредных веществ в атмосфере и почве. При сжигании твердого органического топлива характерными вредными примесями являются сажа, зола, оксиды углерода, серы, азота, соединения тяжелых металлов, водяной пар и другие вещества, в том числе канцерогенные. При передаче электроэнергии вблизи линий электропередачи образуются электромагнитные поля. Работа энергетических установок всегда связана с выбросами тепловой энергии. Кроме того, из хозяйственного пользования изымаются большие площади земель. В целом оценка вредного влияния объектов энергетики на природную среду выполняется на основе системного анализа всех взаимосвязанных процессов на различных этапах производства тепловой и электрической энергии.

В этой связи необходимо учитывать виды, источники, уровни влияния различных антропогенных явлений и факторов. Существует множество классификаций антропогенных факторов по разным признакам – по характеру и объекту воздействия, по природе и количественным характеристикам воздействия [22]. Например, по общему характеру воздействия – это изменение ландшафтов, изъятие природных ресурсов, загрязнение окружающей среды. Объектами воздействия являются поверхность земли и ее недра, почва и растительность, водные объекты и атмосфера, а также, микроклимат среды обитания, животный мир, человек. Количественные характеристики воздействия включают пространственные масштабы (глобальные, региональные, локальные), силу воздействия, степень опасности и другие.

В общем случае в литературе [23] встречается классификация антропогенных факторов по следующим признакам:

- по природе – механический, физический, химический, ландшафтный;
- по физическим свойствам – вещество, процесс, явление, объект;
- по устойчивости вызываемых изменений в природе – временные обратимые изменения, относительно необратимые изменения, абсолютно необратимые изменения, антропогенный стресс экосистем;
- по способности накапливаться – только в момент производства, длительное время;
- по периодичности – непрерывно действующий фактор, периодический фактор, спорадический фактор;
- по способности к миграции – не мигрирующий, мигрирующий с потоками воды и воздуха, мигрирующий со средствами производства, мигрирующий самостоятельно.

2. Базовая терминология предметной области

Для решения проблемы оценки влияния энергетики на природную среду необходимо согласовать терминологию, отражающую взаимосвязи предметных областей исследования: экологии природной среды и энергетики.

В данном исследовании рассматриваются следующие базовые понятия, связанные с влиянием энергетики на природную среду: энергетический объект, энергетический ресурс, элемент природной среды, на который осуществляется влияние вследствие возникновения

антропогенного фактора. На основе выполненного анализа существующих методов оценки этого влияния авторами предлагается отдельно рассматривать понятия антропогенного фактора, антропогенного воздействия, антропогенного загрязнения и последствий от этого загрязнения.

Далее приведены определения этих базовых понятий.

Энергетический объект – совокупность энергетических установок и вспомогательных устройств, объединенных территориально и технологически и предназначенных для совместного выполнения производственно-технических задач.

Энергетический ресурс – энергоноситель, который при данном уровне техники или в обозримой перспективе ее развития используется или может быть использован в энергетике.

Элемент природной среды – это все, что помогает обеспечивать и поддерживать благоприятные условия для сохранения жизни на Земле. В эту категорию входят: земля, недра, почва, флора и фауна, мировой океан, атмосфера и околоземное космическое пространство.

Антропогенный фактор – причина антропогенного воздействия на природную среду, обусловленная процессом и условиями функционирования объекта, его характерными особенностями. Применительно к энергетическим объектам под антропогенными факторами понимаются эмиссии, отходы, излучение, шум, вибрация, радиация и т.п. Антропогенный фактор зависит от типа и вида энергоресурса и типа технологий энергетического объекта.

Антропогенное воздействие – следствие антропогенного фактора, процесс влияния хозяйственной или иной деятельности человека на элементы природной среды. Антропогенные факторы энергетических объектов оказывают физические, химическое, биологическое, электромагнитное, шумовое, радиационное воздействие на различные элементы природной среды. Уровень антропогенного воздействия определяется антропогенной нагрузкой, которая зависит от величины фактора, природных условий и длительности воздействия.

Антропогенное загрязнение – результат изменения в элементах природной среды, вызываемый антропогенным воздействием. Степень загрязнения зависит от антропогенной нагрузки и обуславливает концентрацию вредных веществ в элементах природной среды. Степень загрязнения определяется составом вредных веществ, способностью адаптироваться к антропогенному воздействию и его продолжительностью.

Последствие – результат антропогенного загрязнения. Это может быть изъятие территории, истощение земель, нарушение ландшафта, уничтожение растительного покрова, закисление почвы, заболевание животных и человека, высыхание водных объектов и т.п. Рисунок 1 демонстрирует основные взаимосвязи базовых понятий.

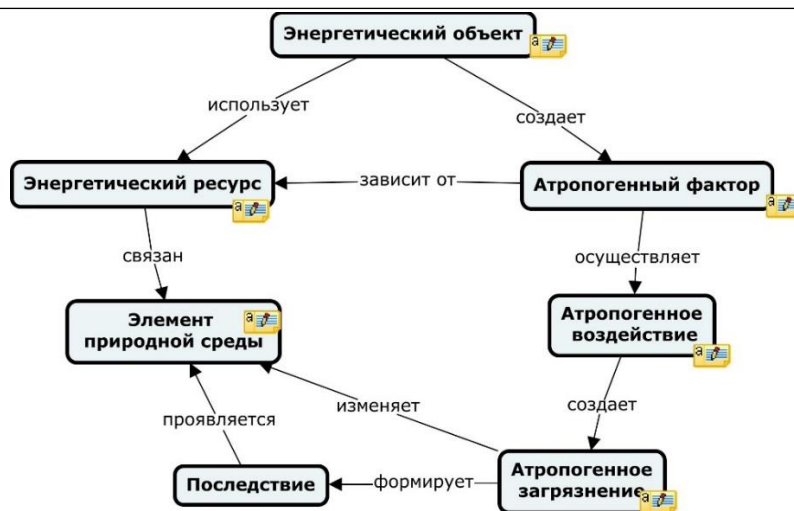


Рис. 1. Метаонтология влияния энергообъектов на природную среду

В выполняемом исследовании эти понятия рассматриваются как базовые классы метаонтологии, являющейся основой для более детального рассмотрения понятий следующих уровней разрабатываемой системы онтологий.

Таким образом, тщательное изучение каждого понятия дает возможность учесть все детали при изучении предметной области, классифицировать их и установить взаимосвязи для получения соответствующей информации.

3. Методическое обеспечение исследований влияния энергообъектов на природную среду

В данном исследовании под методическим обеспечением подразумевается методы количественной оценки взаимосвязей между понятиями и явлениями, отражающими влияние объектов энергетики на природную среду.

Рассматривая последовательно метаонтологию (рис. 1) необходимо пояснить, что в качестве антропогенного фактора рассматривается функционирование объектов энергетики, в результате которого изменяются состав, структура и свойства элементов природной среды: атмосферы, водных объектов, почв и живых организмов. В этой связи, первоочередным возмущением от деятельности объектов энергетики является эмиссия – поступление несвойственных примесей в элементы природной среды. Соответственно, эмиссия является количественной мерой антропогенного фактора. Для каждого элемента природной среды она выражается своим набором характеристик/показателей и имеет свои единицы измерения. Методическим обеспечением для количественной оценки могут служить существующие утвержденные методики расчета выбросов, сбросов, отходов и пр. (рисунок 2).

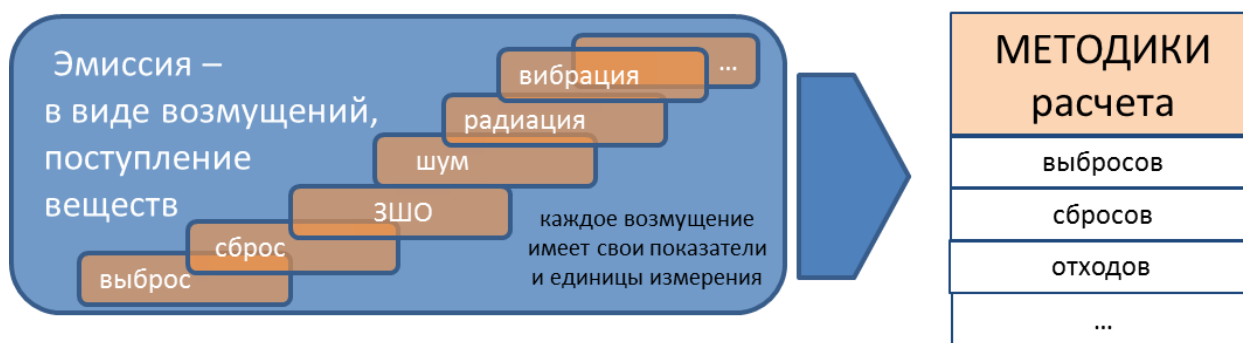


Рис. 2. Методическое обеспечение для количественной оценки антропогенного фактора

Антропогенный фактор влияния деятельности объектов энергетики выражается в антропогенном воздействии через показатели эмиссии. По сути, антропогенным воздействием является изменение элементов природной среды от поступивших возмущений (эмиссии). При этом количественные показатели эмиссии в совокупности с характеристиками свойств элементов природной среды позволяют определить, имеется ли для конкретного элемента природной среды воздействие, высокое оно или незначительное.

Свойства и состояние элементов природной среды описываются климатическими моделями, а «поведение» поступивших примесей описываются моделями их распространения. Количественной мерой воздействия является антропогенная нагрузка, которая оценивается на качественном уровне, как «высокая», «средняя» или «низкая».

Методическое обеспечение для исследования антропогенного воздействия связано со сбором и анализом данных о текущем состоянии с использованием Государственных докладов о состоянии природной среды. Также методическое обеспечение включает определенные климатические «поведенческие» модели, описывающие физические, термодинамические, химические процессы в элементах природной среды для конкретной территории.

Методическое обеспечение содержит следующие методы оценки:

- существующего (фонового) состояния элемента природной среды;
- анализа и сбора информации о загрязняющем веществе, его свойствах, опасности/вредности;
- способности элементов природной среды к адаптации, самоочищению, самовосстановлению.

Фактически в зависимости от силы воздействия (антропогенной нагрузки) и его продолжительности формируется загрязнение элементов природной среды. Степень или уровень загрязнения определяются составом вредных веществ, классом опасности загрязняющего вещества, способностью адаптироваться к антропогенному воздействию и его продолжительностью.

Оценка степени загрязнения элементов природной среды в результате воздействия связана с определением того количества вредных веществ, которое «выпадает» на поверхности и формирует уровни загрязнения. На этом этапе используются модели распространения вредных примесей в различных средах с целью определения плотности выпадения загрязняющих веществ на поверхности почв, водоемов, которые впоследствии вымываются из воздуха и попадают в живые организмы – растения, животные, человека (рис.3).

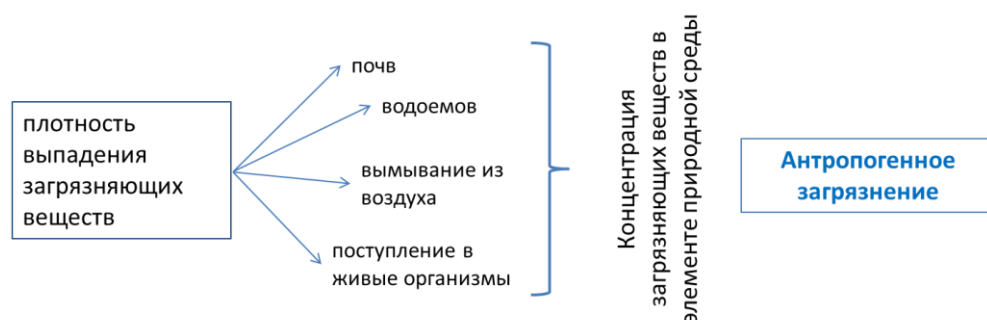


Рис. 3. Схема формирования антропогенного загрязнения в зависимости от плотности выпадения загрязняющих веществ

Таким образом, антропогенное загрязнение от эмиссии и воздействия объектов энергетики формирует последствия в элементах природной среды, а результатом последствий выступают произошедшие изменения: изъятие, истощение, нарушение, уничтожение, закисление, заболевание, высыхание и пр.

Методическим обеспечением для оценки последствий является систематизация существующих норм качества по каждому элементу природной среды. Сравнение норм и сформированных уровней загрязнения в виде концентраций и плотности выпадений позволит оценить влияние деятельности объектов энергетики на природную среду. Количественной мерой последствий в данном исследовании принимается сравнение концентраций с существующими нормами загрязняющих веществ (ПДК) - кратность их превышения или не превышения в элементах природной среды.

Таким образом, совокупность этих четырех компонентов исследования позволяет сформировать методическое обеспечение для оценки влияния энергетических объектов на природную среду (таблица 1).

Таблица 1. Методическое обеспечение исследования влияния объектов энергетики на природную среду

Компонент исследования	Количественная мера	Методическое обеспечение
Антропогенный фактор	Выброс, сброс, золошлаковые отходы	Методики расчета выбросов [8, 9, 12], сбросов, отходов от энергообъектов [11, 13]
Антропогенное воздействие	Антропогенная нагрузка, показатели состава загрязняющих веществ, их опасности, климатические и орографические характеристики территории	Оценка фоновое состояние элементов природной среды и информации об их свойствах Систематизация информации о свойствах вредных веществ от энергетики [5, 16, 21]. Климатические «поведенческие» модели, описывающие физические, термодинамические, химические процессы в элементах природной среды [1, 2]
Антропогенное загрязнение	Концентрация загрязняющих веществ, плотность выпадения	Модели распространения загрязняющих веществ в различных средах (с учетом рельефа подстилающей поверхности) [10, 24, 25]

Последствие антропогенного загрязнения	Кратность превышения норм ПДК для различных сред, нормативов допустимых выбросов/сбросов и пр.	Систематизация существующих норм качества по каждому элементу природной среды [17-19]
--	--	---

В ряде случаев в качестве методического обеспечения могут служить и статистические материалы, отчетные данные о деятельности предприятий энергетики и государственные доклады о состоянии природной среды как в целом по России, так и для отдельных субъектов.

4. Онтологический инжиниринг

Онтологический инжиниринг – это процесс проектирования и разработки онтологий для анализа знаний предметной области, включающий извлечение, структурирование и формализацию знаний. Конечной целью онтологического инжиниринга является формализованное представление знаний предметной области для его дальнейшего использования в системе работы со знаниями и управления знаниями [3, 14, 20].

В выполняемом исследовании разработка онтологий необходима для:

- уточнения и согласования терминологии разных предметных областей – экологии и энергетики;
- определения базовых понятий в исследовании антропогенного влияния энергетики на природную среду;
- систематизации взаимосвязей между понятиями и выявление классов и подклассов онтологий;
- структурирования знаний и информации с учетом выполняемых исследований.

На данном этапе разрабатывается комплекс онтологий, относящихся по классификации к неформальным онтологиям. Они являются результатом обсуждения и уточнения терминов и их определений, выявления базовых понятий, описания взаимосвязей между понятиями. По цели создания предлагаемые онтологии являются прикладными, так как описывают концептуальную модель задачи исследования антропогенного влияния энергетики на природную среду. Для наглядности онтологии представлены в графическом виде с использованием инструмента SmartTools. Это обеспечивает возможность взаимодействия специалистов разных предметных областей.

Наиболее важным в данном исследовании является понятие *антропогенный фактор*, которое является одним из классов в онтологии, представленной на рисунке 4 и демонстрирующей другие понятия, относящиеся к выполняемым исследованиям и связанные с антропогенным фактором. Во-первых, антропогенный фактор возникает в результате деятельности энергетического объекта и зависит от используемого при этом энергетического ресурса (его типа и качественных характеристик).

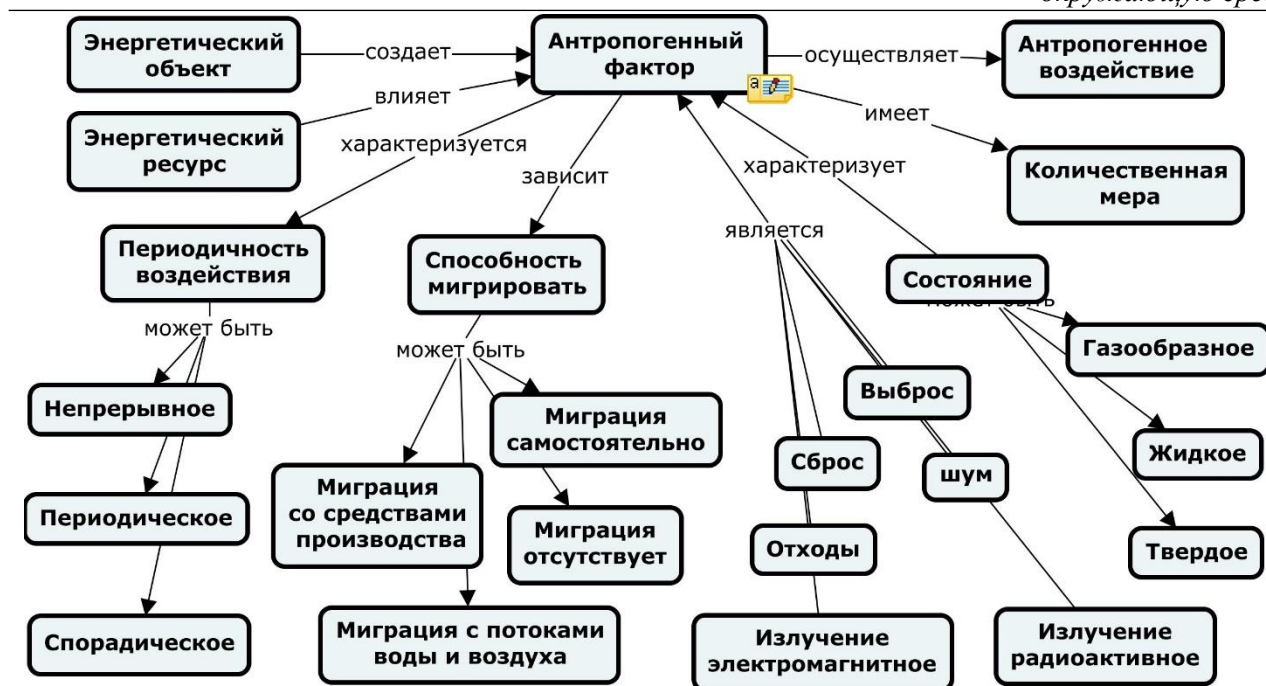


Рис.4. Онтология антропогенного фактора

К антропогенным факторам относятся выброс, сброс, отходы, шум, излучение и др. Антропогенный фактор характеризуется определенными свойствами, такими, как периодичность воздействия, способность к миграции, имеет одно из состояний, которые необходимо учитывать при оценке его влияния на окружающую среду. Как было сказано выше, влияние антропогенного фактора осуществляется путем антропогенного воздействия и имеет количественную меру, которая характеризуется количественными показателями эмиссии.

Аналогичная детализация разработана для каждого из используемых понятий. Например, понятие *антропогенное загрязнение*, как было отмечено ранее, является следствием антропогенного воздействия и, в свою очередь, формирует *последствие* антропогенного загрязнения. Его влияние на *элемент природной среды* измеряется *уровнем загрязнения* и зависит от *антропогенной нагрузки*. При этом необходимо учитывать свойства *периодичности* и *способности к накоплению*, как показано на рисунке 5.

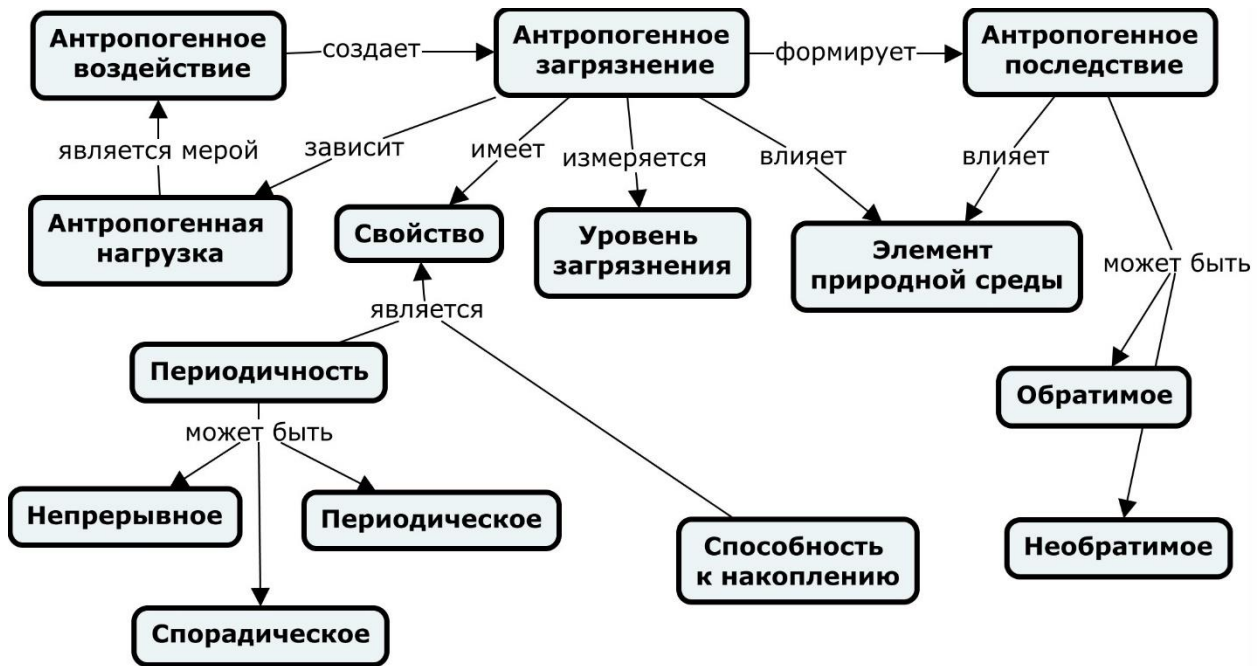


Рис. 5. Онтология антропогенного загрязнения

Таким образом, детальное рассмотрение каждого из понятий, позволяет учесть все подробности при исследовании предметной области, выполнить их классификацию, установить взаимосвязи для отбора соответствующей информации.

На следующих уровнях системы онтологий рассматриваются типы энергообъектов, их технические и производственные характеристики, необходимые для реализации методов оценки влияния энергообъектов на природную среду. Разработанная система онтологий является основой для Интеллектуальной системы поддержки принятия решений и создания баз данных и баз знаний.

Для дальнейшего использования разрабатываемой системы онтологий предусматривается их представление в форматах, необходимых для компьютерной обработки.

Заключение. Исследование влияния энергетики на природную среду в статье представлено в виде онтологий и описания соответствующих данной тематике понятий и определений. Изучение и оценка изменений в элементах природной среды проводятся с использованием экологического подхода – на основе всеобщей связи процессов, происходящих на различных уровнях изучаемых явлений. Авторами предложено представление понятий и определений и их взаимосвязей в графическом виде, как онтологии, что обеспечивает наглядность и возможность согласования с соответствующими методиками расчетов количественных мер исследуемых компонентов влияния энергетики на природную среду.

Для оценки негативного влияния энергетики разработаны различные методические подходы и математические модели, которые применяются в зависимости от поставленных задачи определения соответствующего компонента. Для формирования методического обеспечения, как способа количественной оценки взаимосвязей между понятиями и явлениями, требуются сбор и обработка большого объема информации и методического материала, а систематизация методического обеспечения позволит выстраивать четкую последовательность для проведения как количественной, так и качественной оценки влияния энергетики на природную среду.

Благодарности.

Работа выполняется при финансовой поддержке гранта РФФИ проекта № 20-07-00195 «Методы построения онтологического пространства знаний для интеллектуальной поддержки принятия решений в энергетике и экологии с учетом качества жизни».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1975. 448 с.
2. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеивания примеси. Л. Гидрометеиздат. 1991. 278 с.
3. Ворожцова Т.Н., Макагонова Н.Н., Массель Л.В. Онтологический подход к проектированию базы данных для оценки влияния энергетики на окружающую среду // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 31–41. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-03. (РИНЦ)
4. Гольдберг В.М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Л., 1987.
5. Грушко Я.М. Вредные органические соединения в промышленных выбросах в атмосферу. Справочник – Л.: Химия, 1986. С. 207.
6. Майсюк Е.П., Иванова И.Ю. Анализ существующих методов оценки воздействия энергетических объектов на окружающую среду // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. №4(12). С. 113-127. DOI:10.25729/2413-0133-2018-4-12
7. Массель Л.В. Онтологические аспекты исследования взаимовлияния энергетики и геоэкологии / Л.В.Массель, И.Ю. Иванова, Т.Н. Ворожцова, Е.П. Майсюк, А.К. Ижбулдин, Т.Г. Зорина, А.Р. Барсегян// Онтология проектирования. 2018. Т. 8, №4(30). С. 550-561. – DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-550-561.
8. Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС. РД 34.02.305-98/ВТИ. М. 1998.
9. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час. М.: Гос. комитет по охране окружающей среды Российской Федерации (при участии фирмы «Интеграл», Санкт-Петербург). 1999. 53 с.
10. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ в выбросе предприятий. ОНД-86. Л.: Госкомгидромет. 1987.
11. Методические рекомендации по разработке проекта нормативов предельного размещения отходов для теплоэлектростанций, теплоэлектроцентралей, промышленных и отопительных котельных. СПб. 1998. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200043975> (дата обращения 24.10.2018).
12. Методическое письмо НИИ Атмосфера №335/33-07 от 17 мая 2000 г. «О проведении расчетов выбросов вредных веществ в атмосферу по «Методике определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час» (М., 1999). СПб.: НИИ Атмосфера, 2000. 20 с.
13. Назмеев Ю.Г. Системы золошлакоудаления ТЭС. М.: Изд-во МЭИ. 2002.– 572 с.

14. Онтологический инжиниринг. [Электронный ресурс, дата обращения 23.01.2019]. Режим доступа: https://cs.hse.ru/ai/issa/Field_Ontology_Engineering
15. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. 2000.
16. Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух. СПб, изд-во "Петербург". XXI век. 1995. 144 с.
17. Постановление №165 «Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492-17 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений" (с изменениями на 31 мая 2018 года)» от 22 декабря 2017 г. [Электронный ресурс]. <http://docs.cntd.ru/document/556185926> (дата обращения 24 марта 2020 г.)
18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. ГН 2.1.7.2041-06. [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.gosthelp.ru/text/GN217204106Predelnodopust.html> (дата обращения 24 марта 2020 г.)
19. Предельно-допустимые концентрации химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.689-98 Минздрав России Москва, 1998. [Электронный ресурс]. - URL: <http://www.gosthelp.ru/text/GN21568998Predelnodopusti.html> (дата обращения 24 марта 2020 г.)
20. С.А. Салтыков, Е.Ю. Русяева. Онтологический инжиниринг и философия теории управления / Материалы XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. С. 1584-1588. Режим доступа: <https://vspu2019.ipu.ru/proceedings/1584.pdf> (дата обращения 02.03.2020)
21. Чебаненко Б.Б., Майсюк Е.П. Байкальский регион: пределы устойчивости. – Новосибирск: Наука, 2002. -160 с.
22. Экологический энциклопедический словарь / Глав. ред. А.С. Монин. — М.: Издательский дом «Ноосфера», 1999. 930 с. ISBN 5-8126-0003-1.
23. Экологическая энциклопедия: В 6 т. / Глав. ред. В.И. Данилов-Данильян. — М.: ООО «Издательство „Энциклопедия“ », 2010. Т. 2. Г-И. 448 с.
24. Draxler R.R., Hess G.D. Description of the HYSPLIT-4 Modeling System.US Environmental Protection Agency Technical Memorandum ERL ARL-224, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Springs, MD., December 1997 (Revised: August 1998, September 2002). 27 p.
25. Gordon G.E. Receptor models. Critical review // Environ. Sci. Technol, 1988. Vol. 22. № 10. Pp. 1132-1142.

UDK 004.822: (620.9+504.05)

AN ONTOLOGY SYSTEM FOR STUDYING THE ANTHROPOGENIC IMPACT OF ENERGY FACILITIES ON THE ENVIRONMENT

Vorozhtsova T.N.,

PhD., Leading engineer of Department "Intelligent Systems in the Energy Sector"

e-mail: tnn@isem.irk.ru

Maysyuk E.P.,

PhD., Senior researcher of Laboratory of Energy Supply to Off-grid Consumers

e-mail: maysyuk@isem.irk.ru

Ivanova I.U.

PhD, Head of Laboratory of Energy Supply to Off-grid Consumers

e-mail: nord@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. The paper proposes the development of a system of interrelated ontologies intended for the formalized description and harmonizing of terminology of different subject areas-energy and ecology when performing research on the harmful impact of energy facilities on the environment. The work is carried out within the framework of the RFBR project "Methods of building an ontological knowledge space for intelligent decision-making support in the energy sector and environment, in terms of the quality of life". Ontological engineering of the subject area of research is performed. The methodological approaches used in the study of the problem of anthropogenic impact of energy facilities and the conduct of relevant quantitative assessments are considered. To systematize environmental assessments and establish relationships between the main indicators describing the impact of energy activity on the elements of the environment, semantic methods are proposed, in particular ontological engineering of the subject area. The ontological approach systematizes the used basic terminology and allows you to visualize the relationships between elements of the natural environment, energy objects and their characteristics, impact factors, and also allows you to build a sequence of research and systematize the methodological support used to assess the impact of energy on the environment.

Key words: Anthropogenic influence, anthropogenic factor, anthropogenic impact, anthropogenic pollution, ontological engineering, ecology, energy.

References

1. Berlyand M.Ye. Sovremennyye problemy atmosferynoy diffuzii i zagryazneniya atmosfery. [Current problems of atmospheric diffusion and air pollution.]. L.: Gidrometeoizdat = Hydrometeorological publishing. 1975. 448 p. (in Russian).
2. Byzova N.L., Garger Ye.K., Ivanov V.N. Eksperimental'nyye issledovaniya atmosferynoy diffuzii i raschety rasseivaniya primesi [Experimental studies of atmospheric diffusion and impurity dispersion calculations]. L.: Gidrometeoizdat = Hydrometeorological publishing. 1991. 278 p. (in Russian).

3. Vorozhtsova T.N., Makagonova N.N., Massel' L.V. Ontologicheskiy podkhod k proyektirovaniyu bazy dannykh dlya otsenki vliyaniya energetiki na okruzhayushchuyu sredu [Ontological approach to designing a database to assess the impact of energy on the environment // *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* = Information and mathematical technologies in science and management. 2019. № 3. Pp. 31–41. (in Russian). DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-03.
4. Gol'dberg V.M. Vzaimosvyaz' zagryazneniya podzemnykh vod i prirodnoy sredy [The relationship of groundwater pollution and the environment]. L., 1987. (in Russian).
5. Grushko YA.M. Vrednyye organicheskiye soyedineniya v promyshlennyykh vybrosakh v atmosferu. Spravochnik [Harmful organic compounds in industrial emissions. Reference book]. L.: Khimiya = Chemistry, 1986. Pp.207. (in Russian).
6. Maysyuk Ye.P., Ivanova I.YU. Analiz sushchestvuyushchikh metodov otsenki vozdeystviya energeticheskikh ob'yektov na okruzhayushchuyu sredu [Analysis of existing methods for assessing the impact of energy facilities on the environment] // *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* = Information and mathematical technologies in science and management. 2018. №4 (12). Pp. 113-127. DOI:10.25729/2413-0133-2018-4-12. (in Russian).
7. L.V.Massel', I.YU. Ivanova, T.N. Vorozhtsova, Ye.P. Maysyuk, A.K. Izbuldin, T.G. Zorina, A.R. Barsegyan. Ontologicheskiye aspekty issledovaniya vzaimovliyaniya energetiki i geoekologii [Ontological aspects of the study of the mutual influence of energy and geoecology] // *Ontologiya proyektirovaniya* = Design Ontology. 2018. V. 8. №4 (30). Pp. 550-561 (in Russian). DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-550-561.
8. Metodika opredeleniya valovykh vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu ot kotel'nykh ustanovok TES [Methodology for determining gross emissions of pollutants into the atmosphere from boiler plants of thermal power plants.]. RD 34.02.305-98/VTI. – M., 1998. (in Russian)
9. Metodika opredeleniya vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu pri szhiganii topliva v kotlakh proizvoditel'nost'yu meneye 30 tonn para v chas ili meneye 20 Gkal v chas [The methodology for determining emissions of pollutants into the atmosphere when burning fuel in boilers with a capacity of less than 30 tons of steam per hour or less than 20 Gcal per hour]. M.: Gos. komitet po okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy federatsii = . M. : State Committee on Environmental Protection of the Russian Federation. 1999. 53 p. (in Russian)
10. Metodika rascheta kontsentratsiy v atmosfernom vozdukh v vrednykh veshchestv v vybrose predpriyatiy. OND-86. [Methodology for calculating atmospheric concentrations of harmful substances in the emissions of enterprises. OND-86]. Goskomgidromet. OND-86. L., 1987. (in Russian).
11. Metodicheskiye rekomendatsii po razrabotke proyekta normativov predel'nogo razmeshcheniya otkhodov dlya teploelektrostantsiy, teploelektrotsentraly, promyshlennyykh i otopitel'nykh kotel'nykh [Methodological recommendations on the development of draft standards for the maximum waste disposal for thermal power plants, combined heat and power plants, industrial and heating boilers] SPb. 1998. (in Russian). URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200043975> (accessed 24.10.2018).

12. Metodicheskoye pis'mo NII Atmosfera №335/33-07 ot 17 maya 2000 g. «O provedenii raschetov vybrosov vrednykh veshchestv v atmosferu po «Metodike opredeleniya vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu pri szhiganii topliva v kotlakh proizvoditel'nost'yu meneye 30 tonn para v chas ili meneye 20 Gkal v chas» [Methodical letter of the Research Institute of Atmosphere No. 335 / 33-07 of May 17, 2000 “On the calculation of emissions of harmful substances into the atmosphere according to the“ Methodology for determining emissions of pollutants into the atmosphere when burning fuel in boilers with a capacity of less than 30 tons of steam per hour or less 20 Gcal per hour ”] (M., 1999). SPb.: NII Atmosfera, 2000. 20 p. (in Russian)
13. Nazmeyev YU.G. Sistemy zoloshlakoudaleniya TES [Ash and slag removal systems of thermal power plants]. M.: MEI, 2002. 572 p. (in Russian)
14. Ontologicheskiy inzhiniring [Ontological engineering]. Available at: https://cs.hse.ru/ai/issa/Field_Ontology_Engineering (accessed 23.01.2019). (in Russian)
15. Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Lozanovskaya I.N. Ekologiya i okhrana biosfery pri khimicheskom zagryaznenii, [Ecology and conservation of the biosphere during chemical pollution]. 2000. (in Russian)
16. Perechen' i kody veshchestv, zagryaznyayushchikh atmosfernyy vozdukh. [The list and codes of substances polluting the atmospheric air]. - SPb, izd-vo Peterburg – XXI vek = SPb, publishing house Petersburg - XXI century]. 1995. . 144 p. (in Russian).
17. Postanovleniye №165 «Ob utverzhdenii gigiyenicheskikh normativov GN 2.1.6.3492-17 "Predel'no dopustimyye kontsentratsii (PDK) zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfernom vozdukh gorodskikh i sel'skikh poseleniy" (s izmeneniyami na 31 maya 2018 goda)» ot 22 dekabrya 2017 g. [Decree No. 165 “On approval of hygienic standards GN 2.1.6.3492-17“ Maximum permissible concentrations (MPC) of pollutants in the atmospheric air of urban and rural settlements ”(as amended on May 31, 2018)” dated December 22, 2017]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/556185926> (accessed 24.03.2020). (in Russian)
18. Predel'no dopustimyye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v pochve. Gigiyenicheskiye normativy [Maximum allowable concentration (MPC) of chemicals in the soil. Hygienic standards GN 2.1.7.2041-06]. (in Russian). Available at: <http://www.gosthelp.ru/text/GN217204106Predelnodopust.html> (accessed 24.03.2020).
19. Predel'no-dopustimyye kontsentratsii khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob'yektov khozyaystvenno-pit'yevogo i kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya. Gigiyenicheskiye normativy [The maximum permissible concentration of chemicals in the water of water bodies of drinking and cultural and domestic water use. Hygienic standards GN 2.1.5.689-98] Minzdrav Rossii Moskva, 1998 Available at: <http://www.gosthelp.ru/text/GN21568998Predelnodopusti.html> (accessed 24.03.2020) . (in Russian).
20. S.A. Saltykov, Ye.YU. Rusyayeva. Ontologicheskiy inzhiniring i filosofiya teorii upravleniya [Ontological Engineering and Philosophy of Management Theory] // Materialy XIII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya VSPU-2019 = Proceedeengs of the XIII All-Russian Meeting on Management Problems of VSPU-2019. Pp. 1584-1588.

- Available at: <https://vspu2019.ipu.ru/proceedings/1584.pdf> (accessed 02.03.2020) (in Russian)
21. Chebanenko B.B., Maysyuk Ye.P. Baykal'skiy region: predely ustoychivosti. [Baikal region: limits of sustainability]. Novosibirsk: Nauka, 2002. 160 p. (in Russian)
 22. Ekologicheskiy entsiklopedicheskiy slovar' / Glav. red. A.S. Monin [Environmental Encyclopedic Dictionary / Chap. ed. A.S. Monin]. M.: Izdatel'skiy dom «Noosfera» = M.: Noosphere Publishing House. 1999. 930 p. ISBN 5-8126-0003-1 (in Russian)
 23. Ekologicheskaya entsiklopediya: V 6 t. / Glav. red. V.I. Danilov-Danil'yan [Ecological encyclopedia: In 6 volumes / Chap. ed. IN AND. Danilov-Danilyan]. M.: ООО «Izdatel'stvo „Entsiklopediya“» = M.: Encyclopedia Publishing House. 2010. V. 2. 448 p. (in Russian)
 24. Draxler R.R., Hess G.D. Description of the HYSPLIT-4 Modeling System. US Environmental Protection Agency Technical Memorandum ERL ARL-224, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Springs, MD., December 1997 (Revised: August 1998, September 2002). 27 p.
 25. Gordon G.E. Receptor models. Critical review // Environ. Sci. Technol, 1988. Vol. 22. № 10. Pp. 1132-1142.

УДК 004.43 (042.4)

**ПРОЕКТ ИНФОРМАЦИОННОГО СТЕНДА «ПРИЗМА» ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ
ИЗМЕРИМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЯЗЫКОВ И СИСТЕМ ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

Городняя Лидия Васильевна

К.ф.-м.н., доцент, с.н.с.

Институт систем информатики СО РАН,

630090 г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, e-mail: gorod@iis.nsk.su

Демидов Сергей Евгеньевич

Магистрант, НГУ, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, e-mail: sersh_96@mail.ru

Кириченко Михаил Дмитриевич

Магистрант, НГУ, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, e-mail: m.kirichenko@g.nsu.ru

Ткаченко Денис Дмитриевич

Студент, НГУ, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, e-mail: d.panfilov@g.nsu.ru

Аннотация. Статья посвящена вопросам, возникающим в связи с проблемой измерения характеристик языков и систем программирования, влияющих на трудоёмкость разработки программного обеспечения и производительности программных приложений. Парадигмальные модели языков и систем программирования могут быть полезны при систематизации языков программирования, оценке их сходства и различия, что позволяет строить лаконичные определения относительно таких моделей. Это даёт возможность стратификации представления особенностей семантики языков программирования на автономно развиваемые компоненты в процессе пошаговой разработки экспериментальных систем программирования и формирования схем изучения и преподавания системного программирования.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-07-01048-а.

Ключевые слова: систематизации языков программирования, парадигмальные модели, автономно развиваемые компоненты, схемы преподавания системного программирования, лаконичные определения.

..

Цитирование: Городняя Л.В., Демидов С.Е., Кириченко М. Д., Ткаченко Д. Д. Проект информационного стенда «ПРИЗМА» для представления измеримых характеристик языков и систем программирования // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020 № 1 (17) С. 105– 119. DOI: 10.38028/ESI.2020.17.1.008

Введение. Информационный стенд ПРИЗМА (программирование измерений) предназначен для представления экспертных оценок возможностей языков программирования (ЯП) и результатов измерения и анализа эксплуатационных характеристик, написанных на разных языках программирования, отлаживаемых на конкретных системах программирования (СП) при определённой конфигурации оборудования. В данной статье предпринята попытка создать методику измерения характеристик языков и систем программирования в форме,

позволяющей ориентироваться в современном пространстве средств и методов, определяющих дальнейшее развитие информационных технологий (ИТ), используя наблюдения практиков, заметивших значительный объём интуитивной работы программиста и большое число параметров при оценке качества реализации СП [1, 2, 9], а также идеи понятийной сложности [8], вертикального слоения программ [11] и семантической системы [10]. Понятие «Парадигма программирования» здесь конкретизирует формулировку П.Вегнера «*правила классификации языков программирования в соответствии с некоторыми условиями, которые могут быть проверены*» [13] определением **условий** как приоритетов принятия решений, обусловленных целями решаемой задачи и требованиями к её решению [3].

Следует отметить, что жаргон современного практического программирования понятие «язык программирования» использует как «входной язык (расширенное подмножество ЯП) типовой системы программирования, функционирующей на базе определённой конфигурации оборудования». Разница заключается в том, что СП обычно сопровождает реализацию ЯП расширяемым комплектом библиотечных модулей. В результате происходит сглаживание видимых различий между языками и системами программирования (ЯСП). Кроме того, прямые измерения трудоёмкости программирования и производительности программ почти не отражают зависимости от принятых программистом решений и выбора конструкций ЯП. Таким образом, существует проблема создания методики, позволяющей выяснять такие зависимости совмещением прямых измерений с результатами экспертных оценок особенностей ЯСП.

В разных источниках упоминаются от 20-ти до 70-ти парадигм программирования (ПП) [12-15], список которых видоизменяется и расширяется в зависимости от актуальности тех или иных проблем программирования и моды на особенности популярных ИТ. Бум языкотворчества в области проблемно-ориентированных ЯП, знаменующий переход практики программирования от накопления опыта на уровне библиотечных модулей к накоплению подязыков, показывает важность парадигмальных различий в определениях языков при выборе инструментов для практических работ. Ещё одна тенденция видна по восстановлению интереса к созданию монопарадигмальных ЯП, более удобных для исследования и изучения. Разработка методов анализа определений ЯСП с целью установления их парадигмальной характеристики может дать основу для выработки рекомендаций по выбору инструментальных средств при создании новых программных систем и развитии ИТ.

1. Представление результатов анализа ЯП. Стенд ПРИЗМА предлагает изучение описаний языков программирования (ЯП) сопровождать парадигмально-семантической декомпозицией, результаты которой представляются понятийными таблицами, пример приведен в таблице 1, пояснения к заполнению клеток таблицы даны в [4]. Из такой таблицы можно вывести матрицу численных характеристик понятийной сложности ЯП (см. таблицу 2) и построить визуальную диаграмму, зрительно показывающую различия в семантической структуре сравниваемых ЯП, достаточную для навигации в общем корпусе ЯП (см. таблицу 3). Точки такой диаграммы реализуются как указатели на позиции обучающего ряда примеров, иллюстрирующих смысл понятий ЯП (см. таблицу 4). Для мультипарадигмальных ЯП можно представить несколько понятийных таблиц по числу поддерживаемых парадигм. Наполнение

понятийных таблиц разными экспертами могут отличаться. Ряд примеров может отражать методику обучения.

Таблица 1. Понятийная матрица определения языка Pure Lisp (ядро) ¹

№ стр	№ столбца	V	E	M	C	S
	Виды функций	V	$F: V^* \rightarrow V$	$AL: Atom \rightarrow V$	$(F \rightarrow \{NIL, T\})^*$	$A \leftrightarrow K$
E	Ядро	•NIL ; и атомы	•eq: $V \rightarrow \{NIL, T\}$	•AL = (... (NIL . NIL) (T . T))	•eval: Sexpr $AL \rightarrow V$ •quote	•cons: $V1 V2 \rightarrow (V1 . V2)$ •car: $(V1 . V2) \rightarrow V1$ •cdr: $(V1 V2) \rightarrow V2$
M	Специальные функции	•Sexpr: (V . V) •(V ...) ; список	•(lambda (x1 x2 ...) form) •(label FN F)	•pairlis X Y $\rightarrow AL$ •assoc: X $AL \rightarrow V$	•((lambda (x1 x2 ...) form) v1 v2 ...) •((label FN F) ...)	•list ; Список •(F v1 v2 ...) ; Форма
C	Границы	•NIL •«Нет переменной» •«Нет функции»	•atom: $V \rightarrow \{NIL, T\}$ •apply: $F V^* AL \rightarrow V$ •ERROR	•null •Свободные переменные •Типы значений	•cond •FUNCTION	•Строки •Clozure = Funarg
S	Общность Практичность	•Числа •Строки	•evlis : $(form^*) \rightarrow V^*$ •evcon : $((form form)^*) \rightarrow V$ •+ - * /	•Псевдо-функции •свойства	•map •reduce •lazy	•READ •PRINT

¹ V – value, E- evaluation, M – memory, C – control, S - sructure

Такие понятийные матрицы достаточны для представления результатов анализа ЯП и грубой оценки сложности применения при программировании, например, по числу различных конструкций в каждой клетке понятийной матрицы (таблица 2).

Таблица 2. Представление результатов сравнения понятийной сложности определений языков Pure Lisp и Pascal.

Lisp						Pascal					
	V	E	M	C	S		V	E	M	C	S
E	1	1	1	2	3	E	1	2	5	4	3
M	2	2	2	2	2	M	7	2	5	4	3
C	3+	3	3	2	2	C	3+	4	3	2	3
S	2	3	2	3	2	S	2	1	1 / 3	1	0 / 3

Переход к содержательно эквивалентной графической диаграмме позволяет практически мгновенно сравнивать сложность ЯП на уровне системы понятий в терминах категорий семантических систем (таблица 3).

Таблица 3. Визуальные формы представления результатов сравнения сложности ЯП.

ЯП	Численная оценка понятийной сложности	Графическая диаграмма для быстрого сравнения	Поддержанные парадигмы
Lisp 42	(E (1 1 1 2 3) M (1 2 2 2 2) C (3 3 3 2 2) S (2 3 2 3 2))		экспериментальный функциональный объектно-ориентированный процедурный рефлексивный мета-программирование
Pascal 56	(E (1 2 5 4 3) M (7 2 5 4 3) C (3 4 3 2 3) S (2 1 1 1 0)) + em3, ss3		императивный структурный

На графической диаграмме видно резкое различие языков, неоднородность наполнения категорий семантических систем, изменение числа понятий.

Для более точной оценки ЯСП и привлечения измеримых характеристик используются комплекты сопоставимых фрагментов программ на оцениваемых ЯП в форме, приспособленной для прямого эксперимента с СП, поддерживающих изучаемые ЯП. Примеры накапливаются как упорядоченный по сложности их усвоения обучающий ряд, вид которого приведён в таблице 4.

Таблица 4. Начало ряда примеров программ (примеры ФП: Pure Lisp – чистые вычисления)

Индекс	Понятие	Примеры	Примечания
	Любую информацию можно представить символами. Информационная обработка может быть сведена к выражениям из функций с использованием небольшого числа операций над символами		Исходная гипотеза
EVa	Минимальные значения	NIL	= () = пустой список и «ложь»
		T и другие атомы	Атомы без начального значения
EEa	EQ (равенство)	(EQ NIL NIL)	«истина»
		(EQ T T)	Если T имеет значение, то «истина»
		(EQ NIL T)	«ложь» или «неопределено»
ESa	CONS	(CONS NIL NIL)	Пара (NIL . NIL) = (NIL)
		(CONS x y)	Пара (x . y), если x и y имеют значение
ESb	CAR	(CAR (CONS x y))	x - Левый элемент пары (x . y)
ESc	CDR	(CDR (CONS x y))	y - Правый элемент пары (x . y)
EMa	Ассоциативный список	<u>((T . T)(NIL . NIL))</u>	Содержимое памяти, показывающее, что NIL и T означают сами себя, т.к. связаны сами с собой
ECa	EVAL (Вычисление)	(EVAL NIL) (EVAL T) (EVAL (CONS T NIL)) (EVAL A)	NIL T (T . NIL) = (T) Если A вычислимо, то его значение, иначе «неопределено»
ECb	QUOTE (Блокировка) ' - эквивалент	(QUOTE A) (QUOTE (EVAL A)) (EVAL (QUOTE A))	A (EVAL A) A
		'A ' (EVAL A) (EVAL ' A)	; эквивалент (QUOTE A) ; эквивалент (QUOTE (EVAL A)) ; эквивалент (EVAL (QUOTE A))

Каждый пример иллюстрирует особенности использования отдельного понятия. Для иллюстрации некоторых понятий может требоваться несколько фрагментов. Последовательность элементов ряда соответствует порядку изучения понятий, подкреплённого компьютерной практикой. Каждый элемент содержит представление результата прогона фрагмента на СП и пояснение схемы применения таких фрагментов в

подходящих задачах. Число примеров, необходимых для понимания практики применения понятия в программах, можно рассматривать как оценку сложности изучения понятия. В зависимости от целей обучения над обучающим рядом можно строить маршруты или учебные траектории, отражающие особенности решаемых задач или сферы применения их решений.

2. Представление результатов сравнения ЯСП. Представление результатов сравнения возможностей ЯП и эксплуатационных характеристик СП на основе понятийных таблиц [3-6, 8, 9] и обучающих рядов выполняется техникой, подобной работе с многомерными неоднородными массивами. Можно сравнивать наполнение, оценку сложности или измеримые характеристики по отдельным клеткам, строкам, столбцам, диагоналям или произвольным композициям накопленных данных, позволяющих обосновывать выводы об особенностях средств решения разных задач. Более важно, что можно чётко выражать сходство и различие ЯП. Сравнивая пару ЯП1 и ЯП2, можно выделять общее ($ЯП1 \cap ЯП2$) и две несимметричных разности ($ЯП1 \setminus ЯП2$) или ($ЯП2 \setminus ЯП1$). Для пары «предшественник-потомок» проявляется более ясное представление различий, возникающих при развитии ЯП.

Таблица 5. Результаты сравнения двух ЯП на уровне базовой семантики

№ позиции	Пояснение	1960 - Лисп	1970 - Паскаль	Комментарий = общее ≠ различие - потеряно + добавлено ! новое
Ядро	Видна разница в стартовом барьере при изучении ЯП	8: E (1 1 1 2 3)	15: E (1 2 5 4 3)	Число семантических систем
		CS VEMCS EEEEEE	M MC MCS EMCS VEMCS EEEEEE	Диаграммы доступа к примерам
EV	Самоопределяемые скаляры, их смысл не требует интерпретации, текстовое представление понятно без комментариев.	•NIL ; и атомы	•type = (a, b, . . .)	= общее — в обоих ЯП можно вводить свои различимые имена; ≠ различие — в Лиспе, кроме NIL, атомы изначально не определены, а в Паскале самоопределимые константы означают номер вхождения а перечень; - потеряно — возможность определять смысл по ходу дела; + добавлено — чёткость смысла имён

ЕЕ	Операции над скалярами, они должны вырабатывать скаляры. При выходе за границы V могут его пополнять или вырабатывать сигнал неуспеха. Множество значений может быть пополнено представлениями формул.	eq: $V \rightarrow \{NIL, T\}$	• = <> • pred succ	В Паскале функций больше: = общее — можно сравнивать значения; $\neq$ различие — в Лиспе результат обычное значение NIL или отличное от него, а в Паскале появляется специальный тип логических констант False, True; - потеряно — возможность любую операцию или функцию применять как предикат; + добавлено — контролируемая граница между вычислениями и сравнениями; - добавлено — средства использовать упорядочение значений, переходить к «соседям»
ЕМ	Обработка памяти над таблицей адресов с соответствующим и им значениями. Адреса и таблица могут быть значениями или не рассматриваться как значения и использоваться неявно как сущности другой природы. Появляется именование значений и формул, что расширяет класс допустимых формул, обеспечивает многократное использование хранимых результатов и приводит к понятию «данное».	•AL = (... (NIL . (T . T))	•Id •var X : int; •X := 1; •label L; •L: a := 1;	= общее — можно связывать имена с представлением их смысла; $2 \neq$ различие - Лисп не требует особых понятий для организации памяти, ассоциативный список AL — это просто обычная структура данных, а Паскаль требует не только понятия “распределение памяти под идентификаторы”, но они ещё разделены на метки и переменные, причём организация их хранения в языке не определена, зависит от реализации; - потеряно — принцип Фон Неймановской архитектуры: равноправие программ и данных; + добавлено — разделение структуры данных и структуры управления вычислениями

ЕС	Безусловное и условное (без «else») управление процессом вычислений, приоритеты в формулах вычисления и переход к очередному действию или по метке.	•eval: Sexpr AL → V •quote	•(1*(2+X)) •S1 ; S2 •ключевые слова •goto L;	= общее – используется иерархия выражений; 10 ≠ различие – управление последовательностью вычислений в Паскале выполняется разными механизмами, выраженными с помощью ключевых слов, а в Лиспе всё или вычисляется или блокируется; ≠ различие – Лисп- выражения – префиксные, а Паскаль-выражения – инфиксные; - потеряно – свобода от учёта приоритетов операций; + добавлено – наследование привычек к принятым в арифметических выражениях формам
ES	Конструирование последовательнос тей по принципу соседства и перебора слева направо дополняются возможностью возвратов или выбора любого элемента ради обратимости. Как правило это вектора или строки.	•cons: V1 V2 → (V1 . V2) •car: (V1 . V2) → V1 •cdr: (V1 . V2) → V2	•s: array [1 . . 9] of int; •s [5] := x; •x := s [5]	= общее – возможность доступа ко многим данным через одно обозначение или имя; ≠ различие – Лисп сводит структуры данных к парам, а Паскаль к блоку регистров, расположенных по соседству; - потеряно – автоматизация повторного использования памяти GC (сборка мусора) 3+ добавлено – распределение памяти соответственно описаниям имён; 2+ добавлено – возможность передач управления и присваивания по адресам имён и индексам векторов
Ядро	Оценка сходства- различия на уровне базовой семантики языков Лисп и Паскаль: 5= 15 ≠ 5- 7+ 0! (новых нет)	В обоих ЯП представлены все категории семантических систем с вариациями по практике применения: 4 = совпадает выбор цели семантической системы; 14 ≠ различаются механизмы реализации 4- при переходе от Лиспа к Паскалю утрачены некоторые направления в пространстве решений для новых задач; 7+ при переходе от Лиспа к Паскалю расширено множество диагностических ситуаций.		

Lisp >> Pascal	$= + 2n \neq + 4a + + 8n!$ 5+30+28 = 63	Разница в понятийной сложности определения Паскаля в сравнении с Лиспом
----------------------	--	--

Ознакомление с описанием ЯП обычно требует от нескольких часов до нескольких дней. Использование понятийных матриц позволяет за 10-30 минут отбраковать описания ЯП, заведомо не представляющие интереса. Сравнение ЯСП требует несколько большего времени. Переход к численной характеристике понятийной матрицы позволяет отбраковку несравнимых ЯП выполнять за считанные минуты, но требует определённого напряжения на всматривание в запись чисел. Графическая диаграмма тех же самых чисел сравнивается практически мгновенно, что позволяет наладить методику экспертно-аналитической оценки возможностей и особенностей ЯСП. Для экспериментального исследования аналитики могут использовать свои и готовые примеры программ решения типовых задач на базе платформ, предоставляющих доступ к СП для большого числа языков (более 70-ти), дополненной доступом к реализации небольшого числа других языков.

Встречается более одного представления возможностей ЯП и ряд понятийных матриц, задающих его парадигмальную декомпозицию. Примеры представляют постановку задачи и/или программу её решения, что позволяет чётко оценить возможности ЯП на уровне шаблонов. Предпочтительны монопарадигмальные примеры с выделением конструкций, соответствующих элементам понятийной матрицы.

Формально численная характеристика эквивалентна графической диаграмме, длина столбика символизирует число, но различие диаграмм распознаётся заметно быстрее. Мгновенно видно, что сравниваемые ЯП отличаются друг от друга. Это не препятствует существованию отображений одного ЯП в другой. Разница между ними заключается в трудоёмкости представления программ решения разных типов задач и отладки представленных программ или в производительности и эффективности их реализации в СП. При анализе и сравнении ЯП можно учитывать предшественников и потомков, данные о которых доступны в большом числе источников. Такие данные желательно дополнить сведениями о разнице между сравниваемыми ЯП.

Конечно, для двух-трёх десятков ЯП не так уж трудно построить такие оценки. Для оперативной работы по анализу и сравнению сотен и тысяч современных ЯП, число которых уже превосходит десятки тысяч, нужна автоматизация даже столь простых преобразований и переход к представлению парадигмально семантических характеристик ЯСП в форме фрагментов программ с доступом к экспериментальным стендам, доступным уже для заметного числа ЯП.

Таблица 6. Сравнение фрагментов программ на уровне ядра языка

Инд екс	Понятие	Примеры <u>Паскаль</u>	Примеры Лисп	Граница функциональной эквивалентности
<u>EVa</u> <u>EVa</u>	•type sym = (a, b, . . .)	type week =(sun,mon,tue,wed,thu,fri,sat); type valid_for_identifiers = 'a'..'z','A'..'Z','_','0'..'9';	NIL T АТОМ (вс пн вт ср чт пт сб) 1a2	С точностью до алфавита

			2+3	
<u>EEa</u> <u>EEa</u>	a) = <>	ord (thu) = 4 thu <> sat	(EQ NIL NIL) (EQ T T) (EQ NIL T)	С точностью до совпадения типов данных
<u>EEb</u>	b) pred succ	Pred (mon) = Sun succ (tue) = wed ord(false)=0, ord(true)=1, false<true, pred(true)=false, succ(false)=true,	Допускают модель из асоциативного списка	С точностью до времени выполнения
<u>Ema</u>	a) Id	week week51 week_week	<u>((T . T) (NIL . NIL))</u> <u>ассоциативный список</u> <u>достаточен для</u> <u>моделирования всех</u> <u>видов работы с</u> <u>памятью</u>	С точность до разницы между локальным и глобальным связыванием
<u>EMb</u>	b) var X : int;	var s: int;	Допускают модель из отдельного асоциативного списка, в котором связываются s и int;	С точностью до статического-динамического контроля
<u>Emc</u> <u>EMa</u>	c) X := 1;	int1 := -10; boolean6 := true;	модель из асоциативного списка, в котором изменяется связывание переменных	С точностью до расхода памяти
<u>Emd</u>	d) label L;	label <список_меток>;	модель из отдельного асоциативного списка для предстоящего связывания метки с позицией помеченного оператора	С точностью до расхода памяти
<u>Eme</u> <u>EMa</u>	e) L: a := 1;	goto 1; s_nov:= 0; step:= step*2; h:= h/2; 1: int1 := -10;	модель из отдельного асоциативного списка, связывающего метку с вхождением оператора	С точностью до скорости перехода
<u>Eca</u> <u>ECa</u>	a) (1*(2+X))	s_nov+f(a+(step-1)*h)	(EVAL NIL) (EVAL T) (EVAL (CONS T NIL)) (EVAL A)	С точностью до пространства возможных схем вычислений
<u>Ecb</u> <u>ECa</u>	b) S1 ; S2	s_star:= s_nov; s_nov:= 0; step:= step*2;	(EVAL (CONS T NIL)) (QUOTE A)	С точностью до порядка вычислений

		$h := h/2;$	(QUOTE (EVAL A)) (EVAL (QUOTE A))	
<u>ECc</u> <u>ECb</u>	c) ключевые слова	•type sym = (a, b, . . .); •var s: int; •label <список_меток>; •goto 1;	NIL (QUOTE A) (QUOTE (EVAL A)) (EVAL (QUOTE A)) •вызовы функций	С точностью до «монады» = правила интерпретации
<u>ECd</u> <u>ECb</u>	d) goto L;	goto 1;	(QUOTE (EVAL A)) (EVAL (QUOTE A))	С точностью до откладывания вычислений
<u>Esa</u> <u>ESa</u>	a) s: array [0.. 9] of int;	var a1: array[char] of integer; - 256 компонент a2: array [char] of integer; - 256 целых компонент	(CONS NIL NIL) (CONS x y)	С точностью до размеров блоков памяти
<u>ESb</u>	b) s [5] := x	a2['z']:= 1; a3[-10]:= 2.5;	Допускают модель из ассоциативного списка	С точностью до расхода памяти
<u>Esc</u> <u>ESb</u> <u>ESc</u>	c) x := s [5]	a4:= a2['z']+1;	(CAR (CONS x y)) (CDR (CONS x y))	С точностью до разницы между произвольным и последовательным доступом
- для семантических систем базиса Лиспа существуют функционально подобные семантические системы базиса Паскаля с точностью до наполнения основных множеств алгебраических систем; - семантические системы базиса Паскаля <u>Eeb, Ema, Emb, Emd, Esb</u> характеризуют <u>дистанцию между базисами</u>, преодолимую с помощью моделей средствами базиса Лиспа, что можно рассматривать как расширенную семантику; - ряд обучающих фрагментов программ Паскаля можно разделить на две части: первая имеет эквиваленты на уровне базиса Лиспа, вторая - на уровне его расширений с помощью библиотечных функций, моделирующих средства Паскаля, отсутствующие в базисе Лиспа.				

Использование шкалы сопоставимых постановок задач и методов их решения, включая прагматику СП, даёт критерии для разработки подходов к оптимизации программ и систем программирования, уточнения методов измерения трудоёмкости программирования и производительности программ. Для каждого ЯП определены списки поддерживаемых в нём парадигм, предшественники, сфера влияния. Такие характеристики можно выводить из списков общих семантических систем, оценивая существенную разницу в традиционной прагматике функционально эквивалентных систем.

3. Структура измерительного стенда. Анализ определения языка программирования начинается с понимания задач, требований и поддерживаемых языком парадигм

программирования. В результате можно выделить понятийные таблицы, характеризующие монопарадигмальные подязыки ЯП, работа с которыми сводится к следующим частям:

- 1) **Обработка понятийных таблиц:** выборки, вырезки, перестановки.
- 2) **Накопления результатов сравнения:** наследование и влияние.
- 3) **Наполнение обучающего ряда:** сопоставимые фрагменты программ.
- 4) **Тестирование и измерение производительности:** вывод зависимостей.

Таблица 7. Схема измерительного стенда ПРИЗМА

1. Обработка понятийных таблиц и генерация матриц для поддержки экспертных работ по сравнению разных ЯСП и форм для наполнения БД фрагментами отлаженных программ	2. Накопления результатов сравнения и экспертной оценки разных ЯСП, их хранение, лаконичное представление и вывод некоторых статистических и аналитических характеристик.
3. Наполнение обучающего ряда фрагментов отлаженных программ на разных ЯСП в форме, удобной для эксперимента и измерений, а также для формирования учебных пособий и справочников.	4. Тестирование и измерение производительности изучаемых ЯСП, организация хранения, статистического анализа и представления результатов измерений.

При организации стенда ПРИЗМА учтено, что большинство современных ЯП мультипарадигмальны. Поэтому их характеристика представляется комплексом таблиц. Для языка Си таких таблиц четыре (скалярная, процедурная, императивная, структурная), для более сложных может быть более десяти. Более тонкий анализ требует выборки-вырезки из таблицы клеток, строк, столбцов, миноров, элементов клеток, а также перестановок в зависимости от парадигмы. Для большинства ЯП известны их предшественники и сфера их влияния. Представляет интерес формализовать разницу с предшественниками и потомками, что может дать основания для создания лаконичных описаний ЯП, апеллирующих к ранее изученным. Практика изучения ЯСП базируется на экспериментах, для систематизации которых полезно выстраивать упорядоченные по сложности ряды фрагментов программ, приспособленных к прогону на реальных СП и пригодных для интуитивной и формализуемой оценки различий в семантике и прагматике реализации ЯП. Тестирование и измерение производительности ЯП в настоящее время выполняется как эксперимент над сложным комплексом из ЯП, СП, ОС и аппаратуры. Чтобы расслоить зависимость от таких компонентов, нужны канонические ряды материала, пригодного для обоснования роли программируемых решений в измеримых характеристиках программ. Общая схема системы ПРИЗМА представлена в таблице 7.

Заключение. Программирование давно стало массовой профессией, требующей объективных метрик для оценки качества программных изделий. Разработке таких метрик препятствует слишком высокий темп развития ИТ-индустрии, при котором доминируют быстрые интуитивные или волевые решения.

Предложен подход, использующий учёт особенностей решаемых задач и парадигм программирования, влияющих на выбор методов их решения, в зависимости от приоритетов в выборе языковых средств и реализационных конструкций. Намечена линия, позволяющая

сравнивать языки, выделяя сопоставимые примеры программ, и анализировать результаты прямых измерений, производительности программ, учитывая особенности базовых средств и реализационных решений в системах программирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бентли Д. Жемчужины творчества программистов. Москва: Издательство «Радио и связь». Редакция переводной литературы. 1990. 217 с.
2. Васючкова Т.С. Методы измерения качества программного обеспечения. Препринт № 339, Новосибирск, ВЦ СО АН СССР. 1981. 30 с.
3. Городняя Л.В. Методика парадигмального анализа языков и систем программирования //Труды XXI Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет». М.: ИПМ им. М.В.Келдыша. 2019. С. 262-277. Режим доступа: <http://keldysh.ru/abrau/2019/theses/03.pdfdoi:10.20948/abrau-2019-03>
4. Городняя Л.В. О представлении результатов анализа языков и систем программирования. Труды XX Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет». М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2018.
5. Городняя Л.В. Парадигмальная декомпозиция определения языка программирования // Труды XVIII Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет». М.: ИПМ им. М.В.Келдыша. 2016. С. 115-127. Режим доступа: <http://keldysh.ru/abrau/2016/21.pdf>
6. Городняя Л. В. Парадигма программирования. Учебное пособие. Спб: Лань. 2019. 232 с. ISBN 978-5-8114-3565-4
7. Городняя Л. В. Парадигмы программирования: анализ и сравнение. Новосибирск, СО РАН «Наука». 2017. 232 с. Режим доступа: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_2043045
8. Колмогоров А.Н. Три подхода к определению понятия «количество информации». – Проблемы передачи информации. 1965. № 1 (1). С. 3-11.
9. Лаврищева Е.М. Программная инженерия и технологии программирования сложных систем. Учебник для вузов. М. 2018. 432 с.
10. Лавров С.С. Методы задания семантики языков программирования // Программирование. 1978. № 6. С. 3-10.
11. Фуксман А.Л. Технические аспекты создания программных систем. М.: Статистика. 1979. 180 с.
12. Peter Van Roy. Диаграмма с результатами сравнения более 30-ти парадигм программирования. Режим доступа: <https://www.info.ucl.ac.be/~pvr/paradigmsDIAGRAMeng108.pdf>.
13. Peter Wegner. 1990. Concepts and paradigms of object-oriented programming. SIGPLAN OOPS Mess. 1, 1 (August 1990), p. 7-87. <https://pdfs.semanticscholar.org/1145>. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145>.
14. Диаграмма, представляющая хронологию появления и наследования многих ЯП. Режим доступа: <https://www.levenez.com/lang/> –
15. Сайт с описаниями 171 языка и 31 парадигмы Режим доступа: <http://progopedia.ru/> –.

**THE PROJECT OF THE INFORMATION STAND "PRISMA"
FOR THE PRESENTATION OF THE MEASURABLE CHARACTERISTICS
OF PROGRAMMING LANGUAGES AND SYSTEMS**

Lidia V. Gorodnyaya

Ph.D., Associate Professor, Senior Researcher

Ershov Institute of Informatics Systems (IIS)

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

e-mail: gorod@iis.nsk.su

Sergey E. Demidov, Mikhail D. Kirichenko, Denis D. Tkachenko

Students of the Novosibirsk State University

e-mail: sersh_96@mail.ru, m.kirichenko@g.nsu.ru, d.panfilov@g.nsu.ru

Abstract. The article is devoted to issues arising in connection with the problem of measuring the characteristics of languages and programming systems that affect the complexity of software development and the productivity of software applications. Paradigmatic models of languages and programming systems can be useful in systematizing programming languages, assessing their similarities and differences, which allows us to build concise definitions regarding such models. This makes it possible to stratify the presentation of the features of the semantics of programming languages into autonomously developed components in the process of step-by-step development of experimental programming systems and the formation of schemes for studying and teaching system programming.

Keywords: systematization of programming languages, paradigm models, autonomously developed components, teaching schemes for system programming, concise definitions.

References

1. Bentley D. Zhemchuzhiny tvorchestva programmistov [The Pearls of creativity of programmers]. Moscow: Izdatel'stvo «Radio i svjaz'» = Publishing House "Radio and communication". 1990. 217 p. (in Russian)
2. Vasyuchkova T.S. Metody izmerenija kachestva programmogo obespechenija [Methods for measuring software quality]. Preprint № 339, Novosibirsk, Computing Center of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. 1981. 30 p. (in Russian)
3. Gorodnaya L.V. Metodika paradigmalnogo analiza jazykov i sistem programmirovaniya = The techniques of paradigm analysis of languages and programming systems // Trudy XXI Vserossijskoj nauchnoj konferencii «Nauchnyj servis v seti Internet» = Proceedings of the XXI All-Russian Scientific Conference «Scientific service on the Internet». M : IPM named M.V. Keldysh. 2019 . Pp. 262-277. Available at: <http://keldysh.ru/abrau/2019/theses/03.pdfdoi:10.20948/abrau-2019-03> (in Russian)

4. Gorodnyaya L. V. O predstavlenii rezul'tatov analiza jazykov i sistem programmirovaniya. [On the presentation of the analysis results of the languages and programming systems.]. Trudy XX Vserossijskoj nauchnoj konferencii «Nauchnyj servis v seti Internet» = Proceedings of the XX All-Russian Scientific Conference «Scientific service on the Internet». Moscow: IPM named M. V. Keldysh, 2018. (in Russian)
5. Gorodnaya L.V. Paradigmal'naja dekompozicija opredelenija jazyka programmirovaniya [Paradigm decomposition of the definition of a programming language] // Trudy XVIII Vserossijskoj nauchnoj konferencii «Nauchnyj servis v seti Internet» = Proceedings of the XVIII All-Russian Scientific Conference «Scientific service on the Internet». Moscow: IPM named M. V. Keldysh,, 2016 . Pp. 115-127. Available at: <http://keldysh.ru/abrau/2016/21.pdf> (in Russian)
6. Gorodnaya L. V. Paradigma programmirovaniya.[The programming paradigm]. Uchebnoe posobie = Tutorial. Sankt-Peterburg: Lan' = St. Petersburg: Doe. 2019. 232 pp. ISBN 978-5-8114-3565-4 (in Russian)
7. Gorodnyaya L.V. Paradigmy programmirovaniya: analiz i sravnenie [Paradigms of programming: analysis and comparison] / Novosibirsk SO RAN: Nauka = Novosibirsk, SB RAS: “Science”. 2017. 232 p. Available at: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_2043045 (in Russian)
8. Kolmogorov A.N. Tri podhoda k opredeleniju ponjatija «kolichestvo informacii» [Three approaches to the definition of "amount of information"]. Problemy peredachi informacii = Problems of information transfer. 1965. № 1 (1). Pp. 3–11. (in Russian)
9. Lavrishcheva E. M. Programmnaja inzhenerija i tehnologii programmirovaniya slozhnyh sistem [Software engineering and programming technologies of complex systems]. Tutorial for high schools . Moscow. 2018 г. 432 p. (in Russian)
10. Lavrov S. S. Metody zadaniya semantiki jazykov programmirovaniya [Methods of definition the semantics of programming languages] Programmirovanie = Programming, 1978. № 6. Pp. 3-10. (in Russian)
11. Fuksman A.L. Tehnicheskie aspekty sozdaniya programmnyh system [Technical aspects of creating software systems]. Moscow: Statistika = Statistics., 1979. 180 p. (in Russian)
12. Peter Van Roy. Diagramma s rezul'tatami sravnenija bolee 30-ti paradigm programmirovaniya. [Chart with the results of comparison of more than 30 programming paradigms]. Available at: <https://www.info.ucl.ac.be/~pvr/paradigmsDIAGRAMeng108.pdf>
13. Peter Wegner. 1990. Concepts and paradigms of object-oriented programming. SIGPLAN OOPS Mess. 1, 1 (August 1990), p. 7-87. <https://pdfs.semanticscholar> DOI: <http://dx.doi.org/10.1145>.
14. Chart representing the history of the emergence and inheritance of many programming languages. Available at: <https://www.levenez.com/lang/>
15. Website with descriptions 171 languages and 31 paradigms. Available at: <http://progopedia.ru/>

РОЛЬ ФОРМАЛИЗАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ В ТЕСТИРОВАНИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Бахвалова Зинаида Андреевна

к.т.н., доцент центра программной инженерии

Института информационных технологий и анализа данных

e-mail: zinand@inbox.ru

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Камышова Елена Александровна,

Специалист по обеспечению качества отдела разработки и тестирования,

АО ISPsystem,,

e-mail leka96@mail.ru,

Аннотация. В статье рассмотрена роль формализации требований в тестировании программного обеспечения (ПО). Исследованы понятия «требование к ПО» и «тестирование ПО», сделан вывод об их тесной взаимосвязи. На основе выполненного анализа влияния некачественных требований на процесс тестирования сделан вывод о важности высокого качества требований для процесса разработки ПО. Предложено формализовать требования для повышения их качества. Рассмотрены несколько методов формализации требований, по каждому из которых сделан вывод о влиянии подобной формализации на ручное и автоматизированное тестирование. Выявлено, что рассмотренные методы предлагают формализацию поведения системы, но с точки зрения упрощения автоматизации тестирования (а именно подготовки наборов данных для тестов) формальная модель должна описывать структуру данных. Подобная модель может быть организована в виде иерархии.

Ключевые слова: требования к ПО, тестирование ПО, формализация требований, качество требований/

Цитирование: Бахвалова З.А., Камышова Е.А.. Роль формализации требований в тестировании программного обеспечения // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 1 (17). С. 120–129. DOI: 10.38028/ESI.2020.17.1.009

Введение. Неотъемлемой составляющей процесса создания программного обеспечения (ПО) является разработка требований, которые непосредственно влияют как на выполнение дальнейших этапов создания ПО, таких, как проектирование, кодирование и т.д., так и на качество итогового продукта, оценить которое позволяет тестирование ПО.

Однако требования не всегда являются качественными, то есть не отражают целевое состояние разрабатываемого ПО. Проблема формирования качественных требований является важной, поскольку любые ошибки на этом этапе, в зависимости от своевременности их обнаружения, могут иметь значительные последствия для самого ПО, заказчика и разработчика. Кроме того, чем ниже качество требований, тем сложнее и дольше проходит

процесс тестирования, как ручного, так и автоматизированного: растет время, затрачиваемое тестировщиком, повышается количество возвратов для исправления и доработки задач

В статье рассматриваются стандарты и взгляды различных авторов на определение таких ключевых понятий, как «требования» и «тестирование», и на основании анализа этих источников формулируются характерные свойства указанных терминов. Вследствие этого анализа выявляется зависимость тестирования от требований, и впоследствии эта связь рассматривается более подробно, как с точки зрения влияния хорошо сформированных требований на тестирования, так и с обратной – как некачественные требования влияют на процесс обеспечения качества программных продуктов.

В качестве одного из методов повышения качества требований рассматривается их формализация и анализируются различные подходы к ней, в результате чего выявляется отсутствие подхода, который можно было бы использовать для описания требований в входным данным. Поэтому выдвигается предположение о том, что можно разработать формальную модель, направленную на описание входных данных, и приводится простейший пример структуры таких требований.

Основные понятия. Единого определения, объясняющего термин «требования к программному обеспечению» не существует, несмотря на важность этого понятия.

Согласно С.Куликову, «требование – это описание того, какие функции и с соблюдением каких условий должно выполнять приложение в процессе решения полезной для пользователя задачи» [5; стр. 28], особенно выделяется роль пользователя и его задач.

Международная организация по сертификации тестирования программного обеспечения ISTQB в своем терминологическом словаре приводит следующее определение требований: «Это условия или возможности, необходимые пользователю для решения определенных задач или достижения определенных целей, которые должны быть достигнуты для выполнения контракта, стандартов, спецификации, или других формальных документов» [3].

В книге Карла И. Вигерса установлено, что требования должны подразделяться на типы: «Требования – это спецификация того, что должно быть реализовано. В них описано поведение системы, свойства системы или ее атрибуты. Они могут быть ограничены процессом разработки системы» [2; стр. 6].

Д. Леффенгуэл и Д. Уидриг, в свою очередь, определяют требование как «возможность, которую должна обеспечивать система; некое свойство ПО, необходимое пользователю для решения проблемы при достижении поставленной цели; некое свойство ПО, которым должна обладать система или её компонент, чтобы удовлетворить требования контракта, стандарта, спецификации либо иной формальной документации» [6].

Анализ приведенных определений позволяет установить, что универсальной трактовки термина «требование к ПО» не существует, однако можно выделить следующие общие черты:

- требование может являться условием, возможностью (функцией) или, напротив, ограничением;
- требование должно способствовать решению полезной для пользователя задачи;
- требования должны быть представлены в виде документов и связаны с другими документами: контрактами, стандартами, спецификациями и т.д.

Термин «тестирование программного обеспечения» также не является однозначно сформулированным.

Например, С. Куликов предлагает следующее определение: «тестирование программного обеспечения – процесс анализа программного средства и сопутствующей документации с целью выявления дефектов и повышения качества продукта» [5; стр. 5].

С. Канер предлагает похожее определение: «тестирование — это процесс поиска ошибок» [4; стр. 39]. В то же время автор критикует другое распространенное определение: «тестирование – проверка правильности работы программы». По его мнению, такое определение является бессмысленным, так как заключение о том, что программа работает правильно, сделать невозможно.

В глоссарии ISTQB такого термина, как «тестирование программного обеспечения» нет, так как он используется в русском языке. Глоссарий содержит только термин «тестирование (testing)»: это процесс, содержащий в себе все активности жизненного цикла, как динамические, так и статические, касающиеся планирования, подготовки и оценки программного продукта и связанных с этим результатов работ с целью определить, что они соответствуют описанным требованиям, показать, что они подходят для заявленных требований и для определения дефектов [3].

Другой стандарт, ISO/IEC TR 19759:2005, определяет тестирование как процесс исследования, испытания программного продукта, имеющий своей целью проверку соответствия между реальным поведением программы и её ожидаемым поведением на конечном наборе тестов, выбранных определенным образом [12].

На основе всех приведенных выше определений можно выделить схожие, ключевые элементы и сформулировать основные тезисы, определяющие понятие «тестирование ПО»:

- тестирование заключается в анализе реализованного поведения программного продукта на соответствие ожиданиям (требованиям, которые были описаны до начала разработки);
- цель тестирования состоит не в проверке правильности работы программы, а в поиске дефектов, при этом программа должна быть для этого пригодна;
- процесс непосредственного тестирования сопровождается предварительным планированием, проектированием, а также последующей оценкой выполненной работы.

Следует обратить внимание на то, что тестирование ПО напрямую связано с требованиями, о чем говорится по крайней мере в одном из приведенных определений.

Влияние некачественных требований на тестирование. Согласно С. Куликову, в зависимости от модели разработки ПО, выбранной для проекта, тестирование может появиться на различных этапах: при «водопадной» модели тестирование следует начинать с середины проекта, в то время как при итерационной – в определенные моменты каждой итерации на протяжении всего процесса реализации [5; стр. 24]. При этом зачастую к тестированию приступают уже на этапе формирования требований, на основании которых определяются метрики качества и составляется тест-план [5; стр. 19]. Соответственно, от качества требований будет зависеть качество тестирования и, как следствие, качество итогового продукта.

При этом необходимо принимать во внимание, что, несмотря на отсутствие однозначной системы классификации ПО, имеется несколько общепринятых классов программных продуктов, и, следовательно, при разработке требований необходимо учитывать, что важность каждой характеристики требований меняется в зависимости от

класса продукта [8]. Например, «безопасность» наиболее важна для программного обеспечения, работающего с важными пользовательскими данными, и в этом случае тестировщик должен будет провести тестирование безопасности. Чем правильнее определены приоритеты характеристик и назначение продукта при формировании требований, тем полнее и эффективнее будет тестирование [11].

В таблице 1 рассмотрены риски, связанные с требованиями к ПО, которые выделяет К. Вигерс [2, стр. 16], и их последствия при последующем тестировании.

В соответствии с таблицей можно сделать вывод, что процессу разработки требований необходимо уделять особое внимание, так как он непосредственно влияет на последующий процесс тестирования.

В свою очередь, формирование высококачественных требований, в соответствии с К. Вигерсом [2; стр. 21], имеет следующий ряд преимуществ:

- уменьшается количество дефектов в самих требованиях;
- уменьшается количество исправлений кода и повторного тестирования;
- ненужные функции не реализуются и не тестируются;
- стоимость модификации продукта снижается за счет предварительной оценки этой модификации;
- процесс разработки и тестирования ускоряется;
- уменьшается разобщенность требований;
- границы требований указываются более точно;
- уменьшается беспорядок в проекте;
- оценки тестирования становятся точнее; повышается удовлетворенность заказчиков и разработчиков.

Таблица 1. Последствия некачественных требований для тестирования ПО

Риски	Характеристика	Последствия для тестирования
Недостаточное вовлечение пользователей	Зачастую заказчики не понимают, для чего необходимо вовлекать конечных пользователей в процесс разработки, предполагая, что разработчики знают их потребности, а разработчики предпочитают написание кода общению с клиентами	Вследствие того, что тестировщик проверяет программный продукт на соответствие описанным требованиям, он зачастую может одобрить ПО, которое не соответствует ожиданиям пользователя. Если же он выявит ошибки в требованиях, это приведет к задержке завершения проекта и повтору уже пройденных этапов разработки
«Разрастание» требований пользователей	Объем требований постепенно увеличивается, проект может выйти за установленные рамки сроков и бюджета, что не сразу может быть обнаружено на этапе формирования требований	В связи с выросшим объемом требований растет и объем тестирования, что может привести к превышению сроков и бюджета (при добавлении новых требований тестированию подвергаются не только вносимые изменения, но и связанные с ними функции)
Двусмысленность требований	Пользователь имеет возможность интерпретировать одно и то же положение требований по-разному, при разработке программисты зачастую восполняют пробелы в соответствии со своим личным представлением, которое может быть ошибочным	Если тестировщик поймет требования так же, как и программист, ошибка не будет замечена, и пользователь может получить некачественный продукт. Если тестировщик поймет требования иначе и предложит внести исправления, то будет потрачено дополнительное время на исправление и повторное тестирование

«Золочение» продукта	Разработчики добавляют функции, которых нет в спецификации, но им кажется, что это понравится пользователям	Тестировщик тратит дополнительное время на проверку тех функций, которые внес разработчик, или предлагает убрать их в соответствии со спецификацией, вследствие чего будет потрачено время на исправление и повторное тестирование
Минимальная спецификация	Вместо полноценной спецификации создается сокращенный вариант, который дорабатывается разработчиками по их представлениям	Тестировщик вынужден выяснять у разработчика подробности добавленных функций, так как по урезанной спецификации он не способен качественно проверить продукт
Небрежное планирование	Пока требования не детализированы и не проанализированы, нельзя верно оценить время на их выполнение	При небрежно оцененном требовании время на тестирование, как и на разработку, будет превышено, и заказчик останется недоволен
Пропуск классов пользователей	Требования зачастую разрабатываются для групп пользователей, имеющих определенный опыт работы с ПО и могут применять различные наборы функций. Иногда эти классы могут быть пропущены	Тестировщик может заметить пропущенные группы, если имеет соответствующий опыт. В этом случае требования будут перепроектированы, код дополнен, и тестирование будет повторено заново. В противном случае продукт будет выпущен с неполной функциональностью

Формализация требований. Одним из способов формирования качественных требований может являться их формализация: представление в виде некоторого математического формализма, которое часть свойств требований обеспечивает за счет выбранной формы их представления, а другую часть позволяет проконтролировать, затратив приемлемые усилия [10]. Иначе говоря, это преобразование вербальной модели требований в формальную модель [7].

Формализация требований позволит снизить вероятность возникновения следующих рисков:

- «разрастание» требований пользователей – вследствие необходимости подробно описывать все новые требования в соответствии с определенной моделью, чрезмерное «разрастание» может быть замечено ранее;
- двусмысленность требований – формализация обеспечивает полноту, однозначность и непротиворечивость требований;
- «золочение» продукта – поскольку почти каждая деталь ПО может быть описана формализованными требованиями, более вероятно, что разработчик будет придерживаться описанных функций;
- минимальная спецификация – формализация предусматривает подробное полное описание продукта.

Кроме того, формализация требований окажет положительное влияние на тестирование, а именно поможет упростить работу тестировщика и повысить скорость разработки тестов.

При исследовании вопроса формализации требований можно встретить различные подходы.

Ю. Липко описывает универсальный подход к формализации, а именно преобразование требований к программному продукту в промежуточную модель, которая затем трансформируется в формальную [7]. В частности, в своей статье она описывает правила такого преобразования. Предлагаемый ею алгоритм формализации можно описать следующим образом:

1. Трансформация предложений на формальном языке в табличную форму следующего вида: словосочетание в начале предложения, подлежащее, сказуемое, дополнение, словосочетание в конце предложения.
2. Заполнение пустых ячеек таблицы в соответствии с определенными правилами.
3. Составление листа акторов – лиц, взаимодействующих с программным продуктом.
4. Добавление в лист акторов действий в порядке их появления в тексте.
5. Проектирование графа элементов и добавление путей между последовательно выполняемыми действиями.

Таким образом, удастся осуществить формализацию требований путем их приведения к виду графа. Такой подход следует использовать в проектах, для которых характерно частое изменение требований, отслеживание выполнения требований или привязка к ним задач, людей, кода и т.д. Однако графы не всегда удобно использовать для автоматизации: они могут быть применены для описания поведения автоматизированного теста, но не приспособлены для описания данных, с которыми работает этот тест.

Такой метод формализации также может повлиять на составление тест-кейсов для ручного тестирования программного обеспечения. Тест-кейс – это набор входных данных, условий выполнения и ожидаемых результатов, разработанный с целью проверки того или иного свойства или поведения программного средства [5; стр. 114]. Чем более подробно это свойство или поведение описывается требованиями к продукту, тем больше проверок может быть выполнено и тем меньше вероятность упустить какие-либо дефекты ПО.

С. Минюров предлагает более узконаправленный подход к формализации требований на основе базы знаний [9]. Автор утверждает, что результатом разработки требований должен являться не набор утверждений на естественном языке, а набор связей между информационными элементами. Единицей информации становится не слово или предложение, а именно связь. Для удобства хранения и обработки информации должна быть разработана особая структура; каждое неформализованное требование должно подвергаться семантическому анализу. С. Минюров предлагает структуру, состоящую из двух частей: атрибутов (необходимы для упорядоченного хранения данных, таких, как тип информационного элемента, описание, источник, дата) и связей (необходимы для взаимосвязи данного требования с другими: описание связанных процессов, атрибутов, правил). Однако автор указывает, что структура требований может отличаться в зависимости от проекта, различной степени детализации и формализации данных. Также он отмечает, что разные члены команды по разработке ПО могут структурировать требования по-разному, вследствие чего может возникнуть проблема несогласованности и дублирования данных.

Метод формализации путем приведения требований к виду базы знаний может быть использован, например, для описания интерфейса ПО и, как следствие, тестирования самого интерфейса или его прототипов, элементы которых могут быть описаны в виде иерархической модели. Однако метод, который предлагает автор, описывает поведение системы, но не структуру данных. Поэтому он может быть использован для автоматизации тестирования, но только в виде сценария для написания тестов. Для того, чтобы данный подход мог использоваться для автоматизации тестирования с минимальными усилиями на подготовку тестовых наборов путем разделения входных данных на классы эквивалентности, его необходимо преобразовать для создания иерархической структуры другого типа. Такая формализованная модель должна определять структуру данных, то есть конкретные значения

любых параметров, при которых ПО должно выполнять запросы или, напротив, обрабатывать ошибочные действия.

Еще один автор, А. Веряев, посвятил свою статью вопросам формализации требований безопасности информации к средствам анализа защищенности [1]. Несмотря на то, что его работа является узкоспециализированной, его подход также следует рассмотреть. Автор подразделяет информационные системы на классы в зависимости от требуемой защиты, а также выделяет основные функциональные возможности средств анализа защищенности и присваивает им уникальные обозначения. Таким образом, любую систему подобного типа можно определенно описать с указанием класса защиты и перечня стандартных функциональных возможностей. Такой подход удобно использовать для описания определенного класса систем, обладающих схожей функциональностью. Соответственно, для каждого класса таких систем могут быть составлены стандартные чек-листы (структурированные наборы идей для тестирования), которые с небольшими дополнениями будут применимы к любым системам соответствующего класса. Это позволит ускорить процесс тестирования и снизить вероятность упущения тех или иных проверок.

Авторами предлагается, в частности, формальная модель, которая должна описывать поля, предназначенные для ввода входных данных, а также взаимосвязи этих полей между собой – например, если одни входные данные зависят от других, или если несколько входных данных должны обладать одинаковыми параметрами.

В общем виде формализованные требования к полю могут иметь следующий вид:

```
"Поле - общее описание": {  
    "Тип": "поле",  
    "Группа": "имя_группы",  
    "Зависимое": "статус_зависимости",  
    "Обязательное": "статус_обязательности",  
    "Формат": "тип_поля",  
    "Значение поля": "значение_поля"  
}
```

Имя поля является его идентификатором среди других полей (указывается перед фигурными скобками). Тип элемента необходимо указывать, так как, помимо полей, описанию подлежат и другие сущности. Поля могут быть зависимыми от других полей (то есть значение данного поля зависит от значения другого поля) или независимыми; обязательными для ввода и необязательными (поле может принимать пустое значение). Значения в поле могут быть заданы в каком-то определенном формате, помимо того, могут быть наложены различные ограничения. В дальнейшем модель описания требований должна расширяться в зависимости от выбранного формата вводимых данных: строка, число, файл и т.д.

Заключение. Рассмотрев несколько методов формализации и их влияние на процесс тестирования, можно сделать вывод, что формализация требований не только повышает их качество и снижает вероятность возникновения рисков, связанных с неточной формулировкой требований, но также положительно влияет на работу тестировщика, снижая затрачиваемое им время, в то же время повышая скорость разработки чек-листов и тест-кейсов. При этом необходимо отметить, что все перечисленные методы применяются для описания поведения системы, и их сложно применять для описания входных данных этой системы. Однако возможно разработать такую формальную модель требований, которая позволит значительно

упростить и ускорить подготовку входных данных для автоматизированного тестирования (например, осуществлять автоматическое преобразование требований в готовые тестовые наборы) (фрагмент формальной модели, предложенной авторами, приведен выше)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веряев А.С., Фадин А.А. Формализация требований безопасности информации к средствам анализа защищенности // Вопросы кибербезопасности. 2015. №4(12). С. 23-27.
2. Вигерс Карл. Разработка требований к программному обеспечению / Пер. с англ. М.: Издательско-торговый дом «Русская Редакция». 2004. 576 с.
3. Глоссарий международной организации по сертификации тестирования программного обеспечения ISTQB. Режим доступа: <http://glossary.istqb.org/> (дата обращения: 03.01.2018).
4. Канер Сэм, Джек Фолк, Енг Кек Нгуен. Тестирование программного обеспечения. Фундаментальные концепции менеджмента бизнес-приложений: Пер. с англ. Киев: Издательство «ДиаСофт». 2001. 544 с.
5. Куликов С.С. Тестирование программного обеспечения. Базовый курс: практическое пособие. Минск: Четыре четверти, 2015. 294 с.
6. Леффенгуэл Д., Уидриг Д. Принципы работы с требованиями к программному обеспечению. Унифицированный подход.: Пер. с англ. - М.: «Вильямс», 2002. 448с.
7. Липко Ю.Ю. Алгоритм формализации требований при разработке информационных систем [Текст] / Ю.Ю. Липко // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. №6(155). С. 153-158.
8. Мейрманова Д.М. Процессы управления качеством программного обеспечения [Текст] / Д.М. Мейрманова // Наука, образование и культура. 2016. №9(12). С. 11-16.
9. Минюров С., Минюрова А. Формализация требований на основе базы знаний. Разработка требований для программного обеспечения. М. 2012. 55 с.
10. Росс Дугласс Т. Качество начинается с определения требований // Проблемы информатики. 2017. №2(35). С. 65-70.
11. Формализация требований на практике. В.В. Кулямин и др. [Электронный ресурс] // Сайт Института системного программирования им. В.П. Иванникова РАН. Режим доступа: <http://panda.ispras.ru/~kuliain/docs/Req-2006-ru.pdf> (дата обращения: 05.01.2018).
12. ISO/IEC TR 19759:2005. Software Engineering – Guide to the Software Engineering Body of Knowledge.

THE ROLE OF REQUIREMENTS FORMALIZATION IN SOFTWARE TESTING

Zinaida A. Bakhvalova

PhD, associate professor of Software Engineering Center,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Str., Irkutsk 664074, Russian Federation
e-mail zinand@inbox.ru,

Elena A. Kamyshova,

Quality Assurance specialist of development and testing department,
ISPsystem Hosting Software
125, Dekabrskih sobyitiy st., Irkutsk 664007 Russian Federation
e-mail leka96@mail.ru,

Abstract. The role of formalization of requirements in software testing is considered in this article. The authors investigate such terms as “requirement to the software” and “testing of the software” and point out their interrelation. The analysis of the influence of low-quality requirements on software testing process is made and its results obtained show that the quality of requirements is important for all software development process. The requirements formalization is offered as a way of improvement of their quality. Several methods of formalization of requirements are considered, on each of them the conclusion is drawn on influence of the formalization on the manual and automated testing, but the considered methods offer formalization of behavior of system. The formal model has to describe the structure of data from the point of view of testing automation simplification (regarding preparation of data sets for tests). The similar model can be organized in the form of hierarchy.

Keywords: requirements to the software, software testing, requirements formalization, quality of requirements.

References

1. Veryaev A.C. Formalizatsiya trebovaniy bezopasnosti informatsii k sredstvam analiza zashchishchennosti [Security Requirements Formalization for Security Assessment Tools] // Voprosi ciberbezopasnosti = Cybersecurity issues]. 2015. №4(12). Pp. 23–27 (in Russian).
2. Vigers Karl. Razrabotka trebovaniy k programmnomu obespecheniyu [Development of software requirements] //M.: Izdatel'sko-torgovyy dom «Russkaya Redaktsiya»= Publishing and trading house "Russian Edition". 2004. 576 p. (in Russian).
3. Glossariy mezhdunarodnoy organizatsii po sertifikatsii testirovaniya programm-nogo obespecheniya [ISTQB Glossary]. Availabe at <http://glossary.istqb.org/> (accessed 03.01.2020)
4. Kaner Sem, Dzhek Folk, Yeng Kek Nguyen. Testirovaniye programmnoogo obespecheniya. Fundamental'nyye kontseptsii menedzhmenta biznes-prilozheniy [Software testing. Fundamental Business Application Management Concepts]. Kiyev: Izdate'l'stvo «DiaSoft»= DiaSoft Publishing House. 2001. 544 p. (in Russian).
5. Kulikov C.C. Testirovaniye programmnoogo obespecheniya [Software testing]. // Minsk: Chetyre chetverti= “Four quarters”, 2015. 294 p. (in Russian).
6. Leffenguel D., Uidrig D. Printsipy raboty s trebovaniyami k programmnomu obes-pecheniyu. Unifitsirovanny podkhod [Principles of working with software requirements. A unified approach]. // M.: «Vil'yams»= "Williams", 2002. 448 p. (in Russian).

7. Lipko YU.YU. Algoritm formalizatsii trebovaniy pri razrabotke informatsionnykh sistem [An algorithm for formalizing requirements in the development of information systems]. // Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekh-nicheskiye nauki = Bulletin of the Southern Federal University. Technical science. 2014. №6 (155). Pp. 153-158. (in Russian).
8. Meyrmanova D.M. Protsessy upravleniya kachestvom programmnogo obespecheniya [Software Quality Management Processes]. // Nauka, obrazovaniye i kul'tura = Science, Education and Culture . 2016. №9 (12). Pp. 11-16. (in Russian).
9. Minyurov C. Formalizatsiya trebovaniy na osnove bazy znaniy. Razrabotka trebovaniy dlya programmnogo obespecheniya [Formalization of requirements based on a knowledge base. Development of software requirements]. Available at https://minyurov.files.wordpress.com/2014/02/formal_sw_rqr.pdf (accessed 13.02.2020)
10. Ross Duglass T. Kachestvo nachinayetsya s opredeleniya trebovaniy [Quality begins with defining requirements]. // Problemy informatiki = Problems of Computer Science. 2017. №2 (35). Pp. 65-70.
11. Formalizatsiya trebovaniy na praktike. V.V. Kulyamin i dr. [Formalization of requirements in practice]. Available at <http://panda.ispras.ru/~kulyamin/docs/Req-2006-ru.pdf> (accessed: 05.01.2020).
12. ISO/IEC TR 19759:2005. Software Engineering – Guide to the Software Engineering Body of Knowledge.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА МНОЖЕСТВА ВАРИАНТОВ РАСЧЕТОВ МОДЕЛИ ОРИРЭС И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ В WEB-ПРИЛОЖЕНИИ

Трофимов Иван Леонидович

Старший инженер, e-mail: t_john88@mail.ru

Трофимов Леонид Николаевич

Ведущий программист, e-mail: trofi.isem@yandex.ru

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

Аннотация. Анализ данных при многовариантных расчетах развития межгосударственных электроэнергетических объединений требует наличия специализированных инструментальных средств с удобным графическим интерфейсом, позволяющим сравнивать различные результаты решения оптимизационной модели. В данной статье показаны возможности визуализации и анализа решений модели “ОРИРЭС” при формировании множества различных вариантов начальных условий – входных параметров модели; и технологии веб-приложения “ESAS” для представления результатов проведенных исследований широкому кругу Интернет пользователей.

Ключевые слова: обработка данных, визуализация данных, веб-приложение, геоинформационная система, оптимизационная модель.

Цитирование: Трофимов И.Л., Трофимов Л.Н. Инструментальные средства для формирования и анализа множества вариантов расчетов модели ОРИРЭС и представление результатов в веб-приложении // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 1 (17). С. 130 –141. DOI: 10.38028/ESI.2020.17.1.010

Введение. В лаборатории межгосударственных электроэнергетических объединений (МГЭО) в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН проводятся комплексные исследования развития МГЭО в различных регионах мира. В лаборатории была разработана математическая модель “ОРИРЭС” (далее модель), позволяющая проводить научные исследования, направленные на поиск оптимальных стратегий развития и режимов работы электроэнергетических систем (ЭЭС) [8]. Современная программная реализация модели требует разработки универсальной инструментальной платформы с возможностью гибкой настройки входных параметров узлов модели и графического интерфейса для анализа большого количества разных решений, получаемых в зависимости от вариаций начальных параметров прогнозируемого развития ЭЭС и МГЭО. В задачи прогнозирования развития МГЭО в различных регионах мира вовлечены многие международные и межправительственные организации и отдельные группы ученых. Поэтому необходимо чтобы полученные научные результаты были максимально доступны широкому кругу исследователей, работающих в данной предметной области.

Авторами разрабатывается геоинформационная вычислительная система (ГИВС) для поддержки научных исследований по кооперации ЭЭС России и стран Евразии. Ближайшие

по функционалу аналогичной данной системы, известные авторам, это энергетический портал Asia Pacific Energy Portal, разработанный при участии ЭСКАТО ООН [7] и ГИС-система, разработанная при участии GEIDCO – Китай [18]. Указанные системы содержат большое количество энергетических данных по электростанциям и линиям электропередач по всему миру, но не имеют вычислительной части и являются по сути лишь геоинформационными системами. Разработанная авторами ГИВС предназначена для проведения экспертами расчетов на оптимизационной модели ОПРЭС и создания обоснованных прогнозов развития МГЭО, поэтому помимо визуализации данных она имеет сложную вычислительную часть, во многом уникальную для подобного рода вычислений.

ГИВС содержит оригинальную объектно-ориентированную энергетическую базу данных, интерфейс для настройки входных параметров модели, графический и картографический интерфейс для анализа данных, интерактивные таблицы для представления результатов решения модели, а также линейный оптимизатор G.A.M.S (General algebraic modeling system) для нахождения оптимальных решений модели [9, 14, 15]. Среда разработки ГИВС – Embarcadero Delphi XE. Для предоставления результатов проведенных исследований широкому кругу пользователей авторами разработано внешнее веб-приложение ESAS (Energy statistical analytical service), использующее обработанные данные из ГИВС [12].

В данной статье приводятся примеры использования графического интерфейса ГИВС для формирования и анализа множества вариантов расчетов на модели ОПРЭС. Авторами разработана технология автоматизированного формирования различных вариаций *lp-задачи* (задачи линейного программирования для оптимизатора G.A.M.S), которые отличаются друг от друга плавным изменением одного или группы входных/начальных параметров модели. Представлен графический анализ и сравнение вариантов.

1. Описание модели и её программная реализация в ГИВС. Модель ОПРЭС используется при проведении расчетов различных перспективных вариантов формирования межгосударственных электроэнергетических объединений и входящих в них ЭЭС [1, 2, 4]. Модель является многоузловой, что позволяет учитывать территориальную распределённость ЭЭС и МГЭО. Узлами модели являются крупные и объединенные электроэнергетические системы различных стран и регионов мира. Узлы связаны между собой линиями электропередачи в различных конфигурациях. Каждый узел или связь содержат набор начальных задаваемых условий и параметры, получаемые в результате решения *lp-задачи* оптимизации. Исследования с помощью модели проводятся на перспективу для заданного расчетного года (например, 2035 г.). Значением *целевой функции* модели являются предполагаемые финансовые издержки по МГЭО в целом. Целевая функция включает в себя топливные затраты на производство электроэнергии различными типами электростанций, затраты на ввод новых мощностей, и затраты на ввод новых электрических линий – связей между узлами. Оптимальное решение модели определяется минимумом приведенных затрат по энергообъединению в целом. Целевая функция оптимизируется в рамках определенных *ограничений*, в т.ч. балансовых. Например, рабочая мощность электростанций с учетом экспорта и импорта должна быть равна заданной нагрузке в каждом узле во все часы расчетного года, а суммарная установленная мощность электростанций должна быть не меньше максимальной нагрузки [5].

Все указанные параметры модели настраиваются через специальный интерфейс ГИВС. Для настройки отдельных блоков в интерфейсе предусмотрены специальные разделы –

интерактивная таблица для настройки ограничений модели и типов мощностей в каждом узле, таблица параметров связей между узлами, форма ввода параметров для графиков нагрузки по различным сезонам года и времени суток и другие дополнительные формы, рис. 1.

The screenshot shows the GIVS interface with the following elements:

- Header:** `ww_r 0.000000 false`
- Location:** Country: Япония (Japan), City: Japan.
- Buttons:** Панель интерфейса, Редактор объекта, bufer <-->, Вариант, vol_1_vs, Scenario 3. 2035., Сравнить с вариантом, 0.01, Статус: main.
- Coordinates:** Широта: 36.53869211, Долгота: 139.13359772.
- Lists:**
 - Перечень типов для графика: АЭС,ТЭЦ,уг,ТЭЦ,уг,ТЭЦ,газ,ТЭЦ,газ,ТЭЦ,нефть,ТЭЦ,нефть,ГЭС,ГАЭС,ВЭС,Япония,СЭС,Япо
 - Перечень типов станций: ГЭС=t1,ГАЭС=t2,ТЭЦ,уг=t3,ТЭЦ,газ=t4,ТЭЦ,нефть=t5,ТЭЦ,уг=t6,ТЭЦ,газ=t7,ТЭЦ,нефть=t8,А
 - Перечень особых типов станций: ВЭС,Япония=u1,СЭС,Япония=u2
- Buttons:** Временно, oes_all.db, Записать >>.
- Fields:** ww_r, График, Макс. нагрузка: 188000.0.
- Table:**

цц	цн	фц	фн	су	ш	ху	хн
3 672 466	2 664 230	3 256 365	2 313 513	3 684 869	2 949 759	3 329 860	2 458 332
59	22	56	24	57	22	60	22
216 675 494	58 613 060	182 356 440	55 524 312	210 037 533	64 894 698	199 791 600	54 083 304 (MWh-hour)
- Fields:** hh: 764,1342,1299,798, calc: 1 041 976.441 ГВт-часов.
- Buttons:** кол.раб.дней за сезоны: 59,56,57,60, кол.празд.дней за сезоны: 22,24,22,22, 8 zz.
- Fields:** ch_s_w: 200000, ch_s_h: 200000, h2: 2, etagaes: 0.8, resw: 20.

Рис. 1. Форма ввода параметров для графика суточной нагрузки в интерфейсе ГИВС

Основные возможности разработанного авторами интерфейса ГИВС для работы с моделью:

- возможность внесения изменений в уравнения модели на языке «решателя» (специальное окно для работы с программным языком линейного оптимизатора G.A.M.S),
- возможность включения/выключения ограничений в системе уравнений модели,
- гибкая настройка/редактирование и ввод входных энергетических параметров для модели,
- создание, включение/выключение новых узлов модели (масштабирование расчетной схемы),
- возможность создания наследуемых сценариев (дерева вариантов), их хранение в БД и сравнение друг с другом,

- система контроля и анализа вводимых параметров модели (допустимых в рамках заданных ограничений).

Ниже описан алгоритм работы интерфейса ГИВС с «решателем» G.A.M.S:

1. Оператор (пользователь ГИВС) настраивает параметры для запуска модели (создает исходный вариант/сценарий развития). Все параметры для советующего варианта/сценария хранятся в базе данных ГИВС.

2. По кнопке из интерфейса ГИВС запускается внешний системный процесс G.A.M.S, который считывает заданные параметры модели.

3. Значения указанных параметров последовательно заносятся в систему уравнений и ограничений модели, записанную на программном языке «решателя». (Интерфейс ГИВС позволяет напрямую редактировать систему уравнений и ограничений модели, используя программный язык «решателя»).

4. В случае если система уравнений имеет решение, удовлетворяющее всем ограничениям модели – на выходе из процесса формируется оптимальное решение, в виде набора таблиц с соответствующими оптимальными значениями всех параметров модели.

5. В случае если система уравнений не имеет решения (параметры не удовлетворяют каким-либо ограничениям модели), интерфейс ГИВС выдает ошибку «несовместность решения», и оператору (пользователю ГИВС) предлагается изменить начальную конфигурацию.

После этого работа модели считается завершенной.

Результаты расчетов (заданного варианта/сценария) на выходе из G.A.M.S характеризуются чрезвычайно большим объемом первичных данных (несколько тысяч строк). Авторами разработаны программные алгоритмы обработки данных и соответствующие интерфейсы ГИВС для анализа результатов. Полученные в результате решения модели сценарии/варианты сохраняются в советующем разделе базы данных ГИВС.

2. Сравнение вариантов расчетов. Для работы с различными вариантами расчетов, полученных с использованием модели ОРИРЭС, авторами разработан специальный графический интерфейс ГИВС. Графический интерфейс ГИВС позволяет формировать интерактивные графики на специальном поле, настраивать параметры поля (изменять цвет графиков, масштаб, шкалу и координаты, подписи и прочее), сохранять полученные графики в базе данных ГИВС для их сравнения и визуального анализа различных вариантов решения модели.

В 2019 году авторами разработана дополнительная возможность автоматизированного формирования множества вариаций решения $1p$ -задачи, которые отличаются друг от друга плавным изменением одного или группы входных/начальных параметров модели.

Пример построения множества вариантов решения модели и их отображение на координатном поле в графическом интерфейсе ГИВС показан на рис. 2.

Каждое отображение вариантов решения модели состоит из двух частей. В левой части показаны верхние и нижние ограничения модели (максимум и минимум установленной мощности для каждого типа электростанций в МВт), между ними шкала с оптимальными мощностями, полученными в результате решения модели. В правой части каждого из четырех вариантов показаны почасовые графики суточной нагрузки для узла. В целом график суточной нагрузки отражает необходимый уровень мощности (электропотребления в узле) на каждый час суток каждым типом электростанций, для обеспечения бесперебойной работы узла.

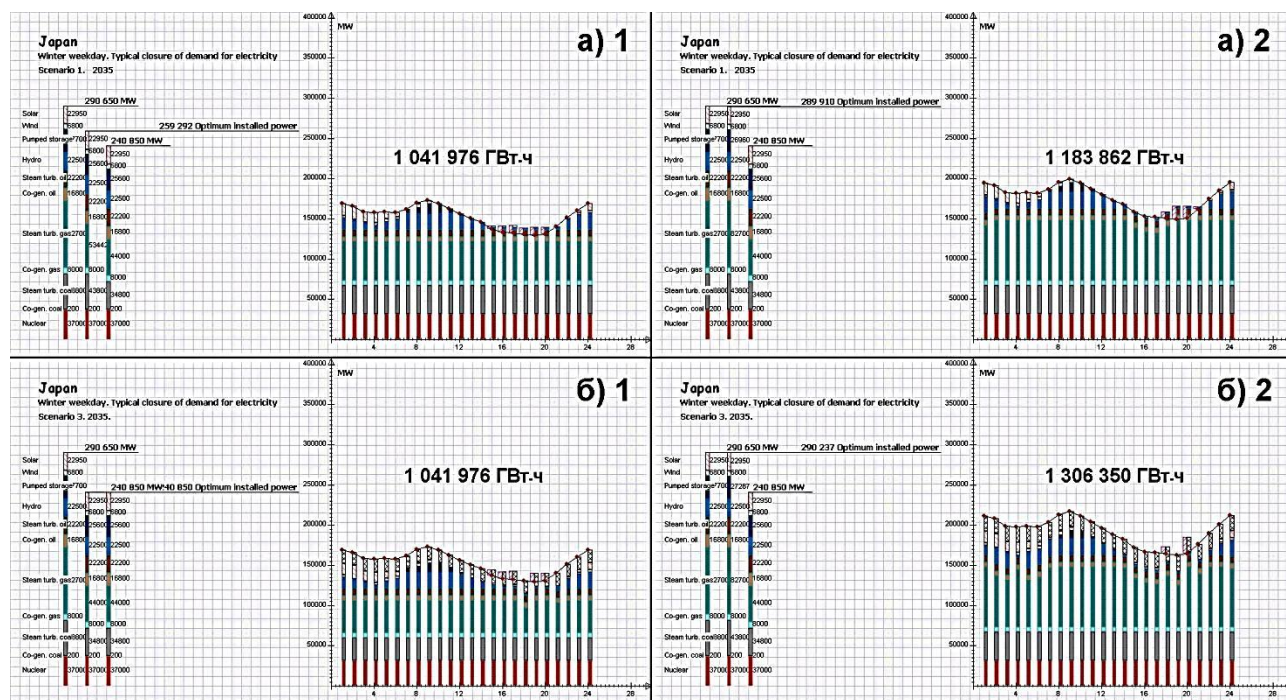


Рис. 2. Сравнение графиков почасовой нагрузки, вариант “а) 1-2” – повышение роста энергопотребления для изолированной работы узла, вариант “б) 1-2” – повышение роста энергопотребления для связанной работы (узлы связаны линиями электропередачи)

Графический интерфейс ГИВС позволяет визуально сравнивать множество различных вариантов. Так на вышеуказанном рисунке 2 в варианте “а) 1-2” показана тенденция повышения роста энергопотребления для *изолированной работы* узла “Япония”, т.е. узел не связан линиями электропередачи с другими узлами. В этом случае видно, что при росте нагрузки в узле, оптимальное решение модели для всех типов мощностей «ложится» на верхнюю границу максимально возможной установленной мощности (планируемой в этом узле к 2035 году).

Вариант развития “б) 1-2” на том же рисунке 2 позволяет увидеть аналогичную тенденцию роста энергопотребления в узле “Япония”, но в случае *связанной работы* узлов расчетной схемы. При достижении максимально возможной установленной мощности (планируемой в этом узле к 2035 году) рост энергопотребления, тем не менее, *может продолжать расти* за счет импорта дополнительной электроэнергии из соседних узлов, соединенных с ним линиями электропередачи.

При этом важно понимать, что каждый из вариантов рассчитывается на модели с учетом минимизации инвестиционных и эксплуатационных затрат на ввод новых мощностей в узле, на ввод новых линий электропередачи в случае связанной работы и с учетом стоимости генерации электроэнергии каждым типом электростанций. Для разных узлов (стран или ЭЭС) эти стоимости могут отличаться. Все данные по каждому узлу хранятся в объектно-ориентированной базе данных и редактируются через специальный интерфейс ГИВС.

Без наличия разрабатываемых инструментальных средств, расчет только одного варианта (учитывая процесс сбора информации, занесение параметров каждого узла в модель, проверка на связность решения – удовлетворение всех параметров ограничениям модели и прочее) мог занимать от одного до нескольких месяцев. Благодаря разрабатываемой авторами

ГИВС настройка всех параметров и расчет одного варианта занимает в среднем около получаса, при наличии исходной информации в базе данных. Все варианты после расчетов также сохраняются в базе данных, что дает возможность сравнивать их между собой.

Картографический интерфейс ГИВС дополнительно позволяет сравнивать различные вариации решения модели, с нанесением расчетной схемы (узлов модели и их связей) на географическую карту мира.

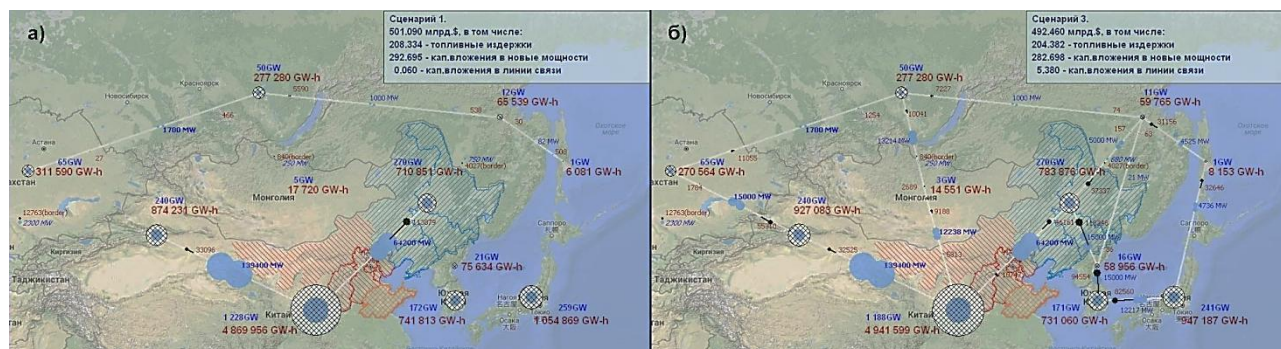


Рис. 3. Расчетная схема для Северо-восточной и центральной Азии на 2035 год. Изолированная “а”) и связанная работа узлов “б)”

Картографический интерфейс ГИВС основан на совмещении географической информации (растровое фоновое изображение) любых регионов Мира в разном масштабе с энергетическими данными, получаемыми из базы данных ГИВС. Дополнительно к этому в базе данных ГИВС хранятся векторные карты в формате SHP, содержащие подробную информацию о географических границах и названиях административных делений, стран, рек, городов и пр.

На рис. 3 изображены два варианта расчетной схемы для Северо-восточной и центральной Азии на 2035 год, изолированная работа (учитывающая локальные связи только внутри стран) и связанная работа всех узлов расчетной схемы между собой (учитываются связи между странами). Построенные в автоматизированном режиме карты помимо географической информации содержат данные, получаемые в результате решения модели. Размер каждой диаграммы-узла расчетной схемы на картах пропорционален его установленной мощности (ГВт) и объему генерации электроэнергии всеми типами электростанций за год (ГВт·ч). Соответствующие этим параметрам числа расположены рядом с каждым узлом расчетной схемы. Также на рисунке 3 отображены рассчитанные на модели мощности линий электропередачи (МВт) и объемы экспорта/импорта между узлами.

Картографический интерфейс ГИВС позволяет отображать на картах и другие энергетические данные, например типы генерируемых мощностей электростанциями с указанием их географических координат, объемы производства и потребления, добычи природных ресурсов и любые другие параметры. Набор таких карт, построенных для различных сценариев развития МГЭО, позволяет визуально оценивать тенденции изменения любых параметров в ту или иную сторону и легко сравнивать полученные варианты между собой.

3. Технологии для представления полученных результатов в веб-приложении ESAS. Задачами прогнозирования развития межгосударственных энергообъединений занимаются многие международные организации, такие как Asia Pacific Energy Research Centre

(APEREC), United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (комиссия ООН по социально-экономическому развитию Азиатского Тихоокеанского региона), Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization (GEIDCO, Китай), Mongolia Energy Policy Regulatory Department (Монголия) [3, 6, 10] и другие.

Во многих странах существуют научно исследовательские институты, занимающиеся вопросами развития МГЭО: Renewable Energy Institute (Япония), China Electric Power Planning & Engineering Institute (Китай), Global Energy Interconnection Research Institute (Китай), University of Malaya (Малайзия), Korea Electrotechnology Research Institute (Южная Корея) [13, 16, 17, 19]. В России в данной области исследований авторам известны работы только двух институтов – Института систем энергетики им. Мелентьева СО РАН и Сколтеха (Сколковский институт науки и технологий) [11].

Учитывая большое количество организаций и отдельных групп ученых, вовлеченных в процесс прогнозирования развития МГЭО, перед авторами была поставлена задача обеспечения доступа широкого круга исследователей (в том числе международных организаций) к полученным результатам. Это связано с тем, что развитие МГЭО затрагивают одновременно интересы многих стран и участников. Для этого авторами было разработано внешнее Web-приложение “ESAS” (Energy statistical analytical service), использующее данные из ГИВС.

Основное направление разрабатываемого Интернет-сервиса – комплексная информационно-аналитическая поддержка научных исследований в области мировой электроэнергетики, а в частности – в области развития межгосударственных энергообъединений. Наряду с данными рассчитанными на модели ОРИЭС, в веб-приложении используются обработанные в ГИВС статистические данные различных международных организаций, таких как Международное энергетическое агентство (IEA), Международная ассоциация инженеров-электриков и электронщиков (IEEE), Британская нефтегазовая компания «Бритиш петролеум» (BP), статистические агентства Евросоюза (Евростат), России (Росстат), США (StatsAmerica) и другие.

Для представления материалов в Web-интерфейсе используются совмещенные фрагменты географических карт, построенные в ГИВС с основными составляющими электроэнергетической инфраструктуры различных стран и регионов. Информация может быть представлена в ретроспективе с 80-х годов по настоящее время, а также с учетом ожидаемой среднесрочной и долгосрочной перспективы, рассчитываемой на модели ОРИЭС.

Для разработки Web-приложения использовались стандартные технологии Web-программирования: AJAX + PHP / Java Script, MySQL, API-функции Google maps, OpenStreets и Яндекс.Карт. Энергетические данные полученные из базы данных ГИВС импортируются в общепринятых форматах: JPG, XML, JSON, а также в форматах Microsoft Word и Excel.

На рис. 4 изображена концептуальная схема работы системы с информацией – от источников данных до их конечного представления в Интернет-сервисе ESAS.

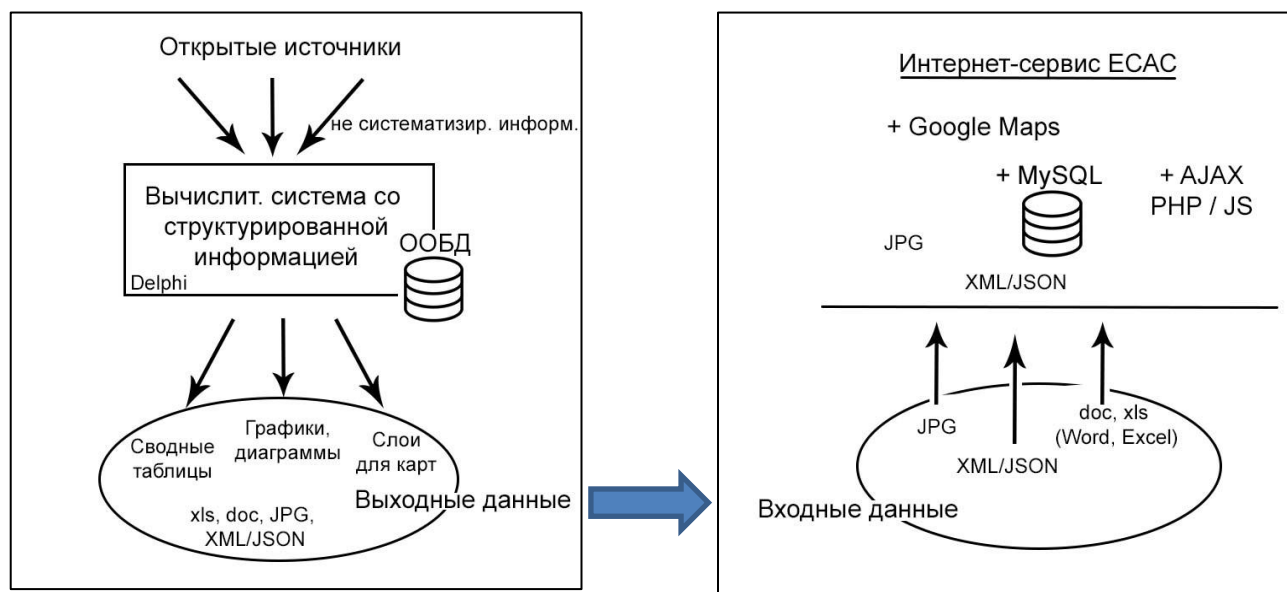


Рис. 4. Концептуальная схема работы системы

Приведенные во второй главе в статье графики и карты могут быть представлены в Интернет-сервисе сгруппированными по типам проведенного исследования (анализа), для выбранной страны или региона.

Особенностями разрабатываемого проекта Интернет-сервиса являются:

1. Построение интерактивных электронных географических карт, совмещенных с объектами энергетики в различных регионах мира.
2. Системное структурирование статистической и другой информации в единой базе данных.
3. Графическая визуализация ретроспективы и перспективы различных показателей мировой энергетики в целом.

Разработанное авторами Web-приложение, использующее данные ГИВС, позволяет Интернет пользователям в интерактивном режиме изменять параметры различных вариантов/сценариев развития МГЭО, рассчитанных на модели ОРИРЭС для их визуального качественного анализа и сравнения, а также открывает широкие возможности для более предметного обсуждения проводимых работ в данной области исследований.

Заключение. Благодаря разрабатываемому авторами набору инструментальных и программных средств для работы с моделью ОРИРЭС значительно сокращается время настройки всех параметров модели, формирования и анализа множества вариантов расчетов. Все варианты расчетов сохраняются в объектно-ориентированной базе данных, что дает возможность сравнивать их между собой. Показаны возможности графического интерфейса ГИВС для визуализации и анализа графиков при формировании множества различных вариантов входных параметров модели. Для представления результатов проведенных исследований широкому кругу Интернет пользователей авторами предлагается использование веб-приложения “ESAS”, использующее данные из ГИВС. Данный Интернет-сервис предоставляет возможность в интерактивном режиме изменять параметры различных вариантов/сценариев развития МГЭО для их визуального анализа, а также открывает широкие возможности для обсуждения проводимых работ в данной области исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Л.С., Подковальников С.В., Савельев В.А., Чудинова Л.Ю. Эффективность межгосударственных электрических связей. Новосибирск: Наука. 2008. 239 с.
2. Беляев Л.С., Подковальников С.В., Савельев В.А. Научный отчет. Программа развития гидроэнергетики России до 2030 года на перспективу до 2050 года. Иркутск. 2015. 402 с.
3. Организация по развитию и кооперации глобального энергетического объединения (GEIDCO). Режим доступа: <https://geidco.org/category/24?lang=en> (дата обращения 07.08.2019)
4. Подковальников С.В., Савельев В.А., Хамисов О.В., Чудинова Л.Ю. Обоснование эффективности межгосударственных энергообъединений с разделением эффектов между участниками // Автоматика и телемеханика. 2018. №10. С. 26–38.
5. Подковальников С.В., Трофимов И.Л., Трофимов Л.Н. Технологические аспекты геоинформационной вычислительной системы для поддержки исследований в области формирования межгосударственных энергообъединений // Программная инженерия. 2018. №8. С. 349–360.
6. Экономическая и социальная комиссия ООН для Азии и Тихого океана (ЭСКАТО ООН), Режим доступа: <https://unescap.org/research> (дата обращения 25.03.2019)
7. Энергетический портал ЭСКАТО ООН (Asia Pacific Energy Portal). Режим доступа: <https://asiapacificenergy.org/> (дата обращения 23.04.2019).
8. Belyaev L.S., Chudinova L.Yu., Khamisov O.V., Kovalev G.F., Lebedeva L.M., Podkovalnikov S.V. and Savel'ev V.A. Studies of interstate electric ties in Northeast Asia // International Journal of Global Energy Issues. 2002. vol. 17(3). Pp. 228–249.
9. Bussieck M.R., Meeraus A. General Algebraic Modeling System (GAMS). Chapter 8. In: Kallrath J. (eds) Modeling Languages in Mathematical Optimization. Applied Optimization, Том 88, Springer, Boston, MA, 2004 г.
10. Chimeddorj D. Power Sector of Mongolia, Regional cooperation policy // Northeast Asia Regional Power Interconnection Forum. (Beijing, China, 26-27 October 2016). Beijing. 2016. Pp. 3–26.
11. Churkin A., Bialek J. Analysis of the prospective energy interconnections in Northeast Asia and development of the data portal // 10th International Conference on Asian Energy Cooperation (AEC 2017), E3S Web Conf.: 2018. № 27. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/02/e3sconf_aec2018_01003.pdf (accessed 26.07.2019).
12. Energy Statistical Analytical Service. Available at: <http://www.esas.com.ru/> (accessed 26.07.2019).
13. Omatsu R. Interim Report by Asia International Grid Connection Study Group // 10th International Conference on Asian Energy Cooperation (AEC 2017), E3S Web Conf.: 2018. № 27. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/02/e3sconf_aec2018_01004.pdf (accessed 26.07.2019)

14. Podkovalnikov S.V., Trofimov I.L., Trofimov L.N. Technological aspects of a geographic information computing system to support research in the field of the formation of interstate energy associations // Journal of Software Engineering. 2018. Issue 1. Pp. 349–360.
 15. Podkovalnikov S.V., Trofimov I.L. and Trofimov L.N. Data processing and optimization system to study prospective interstate power interconnections // 10th International Conference on Asian Energy Cooperation (AEC 2017), E3S Web Conf.: 2018. № 27. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/02/e3sconf_aec2018_01007.pdf (accessed 26.07.2019)
 16. Seung M. Role of Korea for Developing the East Asia Super Grid // 20th International Conference on Electrical Engineering. Jeju. 2014.
 17. Tofael A., Mekhilef S., Shah R. Mithulananthan N., Seyedmahmoudian M. and Horan B., ASEAN power grid: A secure transmission infrastructure for clean and sustainable energy for South-East Asia, Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier. 2017. vol. 67. Pp. 1420–1435.
 18. Xuming L. Application and research of global grid database design based on geographic information // Global Energy Interconnection. 2018. vol. 1(1). Pp. 87–95.
 19. Yoon J.-Y., Kim H.-Y., Park D.-W. Pre-feasibility study results on NEAREST between the ROK, the DPRK and the RF// Proceedings of the 6th International Conference “Asian Energy Cooperation: Forecasts and Realities”. Irkutsk. Energy Systems Institute. 2008. Pp. 59–67.
-

UDK 621.311.001.57:004.67

**SOFTWARE TOOLS FOR THE FORMATION AND ANALYSIS
OF MANY OPTIONS FOR CALCULATING THE ORIRES MODEL
AND PRESENTING THE RESULTS IN A WEB APPLICATION**

Ivan L. Trofimov

Senior Engineer, e-mail: t_john88@mail.ru

Leonid N. Trofimov

Lead software developer, e-mail: trofi.isem@yandex.ru

Melentiev Energy System Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. Data analysis in multivariate calculations of interstate power grids expansion requires software tools with a convenient graphical interface to compare results of the optimization model solutions. This article shows the possibilities of visualization and analysis of the “ORIRES” model solutions in the formation of many different options for the initial conditions - the input parameters of the model; and technologies of the web application “ESAS” for presenting research results to a wide range of Internet users.

Keywords: data processing, data visualization, web-application, geographic information system, optimization model.

References

1. Belyaev L.S., Podkovalnikov S.V., Saveliev V.A., Chudinova L.Y. Effektivnost' mezhgosudarstvennykh elektricheskikh svyazey [Efficiency of interstate electrical interconnections]. Novosibirsk. Nauka = Science. 2008. 239 p. (in Russian)
2. Belyaev L.S., Podkovalnikov S.V., Saveliev V.A. etc. Nauchnyy otchet. Programma razvitiya gidroenergetiki Rossii do 2030 goda na perspektivu do 2050 goda [Scientific report. The program of hydropower development in Russia up to 2030 and on the prospect until 2050]. Irkutsk. 2015. 402 p. (in Russian)
3. Organizatsiya po razvitiyu i kooperatsii global'nogo energeticheskogo ob'yedineniya (GEIDCO) [Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization (GEIDCO)] Available at: <https://geidco.org/category/24?lang=en> (accessed 07.07.2019). (in Russian)
4. Podkovalnikov S.V., Savelev V.A., Khamisov O.V., Chudinova L.Yu. Obosnovaniye effektivnosti mezhgosudarstvennykh energoob'yedineniy s razdeleniyem effektiv mezhdu uchastnikami [Justification of Effectiveness of International Power Interconnections with Separation of Effects between Participants] // Автоматика и телемеханика = Automation and remote control. 2018. vol. 10. Pp. 1756–1765. (in Russian)
5. Podkovalnikov S.V., Trofimov I.L., Trofimov L.N. Tekhnologicheskiye aspekty geoinformatsionnoy vychislitel'noy sistemy dlya podderzhki issledovaniy v oblasti formirovaniya mezhgosudarstvennykh energoob'yedineniy [The Data Processing and Geo Information System Technological Aspects to Support Research in the field of Prospective Interstate Electric Power Connections Development] // Programmaya inzheneriya = Software Engineering. 2018. no 8. Pp. 349–360. (in Russian)
6. Ekonomicheskaya i sotsial'naya komissiya OON dlya Azii i Tikhogo okeana (ESKATO OON) [The United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (UN ESCAP)]. Available at: <https://unescap.org/research> (accessed 25.03.2019). (in Russian)
7. Energeticheskiy portal ESKATO OON [Asia Pacific Energy Portal, UN ESCAP]. Available at: <https://asiapacificenergy.org/> (accessed 23.04.2019). (in Russian)
8. Belyaev L.S., Chudinova L.Yu., Khamisov O.V., Kovalev G.F., Lebedeva L.M., Podkovalnikov S.V. and Savel'ev V.A. Studies of interstate electric ties in Northeast Asia // International Journal of Global Energy Issues. 2002. vol. 17(3). Pp. 228–249.
9. Bussieck M.R., Meeraus A. General Algebraic Modeling System (GAMS). Chapter 8. In: Kallrath J. (eds) Modeling Languages in Mathematical Optimization. Applied Optimization, Том 88, Springer, Boston, MA, 2004 г.
10. Chimeddorj D. Power Sector of Mongolia, Regional cooperation policy // Northeast Asia Regional Power Interconnection Forum. (Beijing, China, 26-27 October 2016). Beijing. 2016. Pp. 3–26.
11. Churkin A., Bialek J. Analysis of the prospective energy interconnections in Northeast Asia and development of the data portal // 10th International Conference on Asian Energy Cooperation (AEC 2017), E3S Web Conf.: 2018. № 27. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/02/e3sconf_aec2018_01003.pdf (accessed 26.07.2019).

12. Energy Statistical Analytical Service. Available at: <http://www.esas.com.ru/> (accessed 26.07.2019).
13. Omatsu R. Interim Report by Asia International Grid Connection Study Group // 10th International Conference on Asian Energy Cooperation (AEC 2017), E3S Web Conf.: 2018. № 27. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/02/e3sconf_aec2018_01004.pdf (accessed 26.07.2019)
14. Podkovalnikov S.V., Trofimov I.L., Trofimov L.N. Technological aspects of a geographic information computing system to support research in the field of the formation of interstate energy associations // Journal of Software Engineering. 2018. Issue 1. Pp. 349–360.
15. Podkovalnikov S.V., Trofimov I.L. and Trofimov L.N. Data processing and optimization system to study prospective interstate power interconnections // 10th International Conference on Asian Energy Cooperation (AEC 2017), E3S Web Conf.: 2018. № 27. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/02/e3sconf_aec2018_01007.pdf (accessed 26.07.2019)
16. Seung M. Role of Korea for Developing the East Asia Super Grid // 20th International Conference on Electrical Engineering. Jeju. 2014.
17. Tofael A., Mekhilef S., Shah R. Mithulananthan N., Seyedmahmoudian M. and Horan B., ASEAN power grid: A secure transmission infrastructure for clean and sustainable energy for South-East Asia, Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier. 2017. vol. 67. Pp. 1420–1435.
18. Xuming L. Application and research of global grid database design based on geographic information // Global Energy Interconnection. 2018. vol. 1(1). Pp. 87–95.
19. Yoon J.-Y., Kim H.-Y., Park D.-W. Pre-feasibility study results on NEAREST between the ROK, the DPRK and the RF// Proceedings of the 6th International Conference “Asian Energy Cooperation: Forecasts and Realities”. Irkutsk. Energy Systems Institute. 2008. Pp. 59–67.

УДК: 004.4

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДСИСТЕМЫ ДЛЯ РАСЧЁТА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ОТ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

Кузьмин Владимир Русланович

аспирант, e-mail: kuzmin_vr@isem.irk.ru

Отдел «Системы искусственного интеллекта в энергетике»

Институт систем энергетики имени Мелентьева, СО РАН,

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.130

Аннотация. В рамках исследований по оценке влияния энергетики на геоэкологию региона выполняется разработка Web-ориентированной информационно-аналитической системы (WIS) для поддержки принятия решений в области экологии и энергетики. Одним из ее модулей является информационная подсистема (IS PEF) для расчёта количества вредных выбросов от объектов энергетики и визуализации результатов расчетов. В статье приводятся онтологии предметной области, использованные для проектирования базы данных IS PEF, подробно описана разработанная структура базы данных. Приведены архитектура IS PEF, детальное описание ее функциональных возможностей и агентов, а также проиллюстрированы результаты работы IS PEF.

Ключевые слова: информационная подсистема, геоэкология, математическое моделирование, визуализация, онтологии, база данных.

Цитирование: Кузьмин В.Р. Разработка информационной подсистемы для расчёта и визуализации вредных выбросов от объектов энергетики // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 1 (17). С. 142–154. DOI: 10.38028/ESI.2020.17.1.011

Введение. Исследования по влиянию энергетики на геоэкологию региона выполнялась в рамках международного проекта при поддержке фондов ЕАПИ и РФФИ коллективом учёных ИСЭМ СО РАН совместно с коллективами учёных из Армении и Белоруссии. В настоящее время экологическая оценка деятельности объектов энергетики в Байкальском регионе производится при помощи мониторинга и выполнения замеров количества выбрасываемых загрязняющих веществ. Кроме того, оценка влияния объектов энергетики выполняется с применением статистических данных, отчётной информации предприятий, а также государственных докладов «О состоянии и об охране окружающей среды» [1, 2]. Для оценки влияния объектов энергетики на природную среду используются показатели выбросов таких загрязняющих веществ, поступающих при работе объектов энергетики, как: водяной пар, сажа (углерод), диоксид серы, оксиды серы и другие [3-5]. В том случае, если информация отсутствует, то оценка влияния энергетики может быть выполнена при помощи результатов вычислительных экспериментов, проведённых с использованием утверждённых правительством РФ методик, например, для определения количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок разной мощности [6-8].

Для реализации проекта российской стороной предложена разработка Web-ориентированной информационно-аналитической системы (WIS) [6], интегрирующей семантические и математические модели, инструментальные средства оценки влияния энергетических объектов на геоэкологию региона, базы знаний и данных, геоинформационную систему. В статье рассматривается, как составляющая WIS,

информационная подсистема IS PEF, предназначенная для расчётов количества вредных выбросов от объектов энергетики и визуализации результатов расчетов.

1. Структура модели данных для расчёта количества вредных выбросов от объектов энергетики.

Одним из основных модулей WIS является информационная подсистема IS PEF для расчёта количества вредных выбросов от объектов энергетики. Эта подсистема объединяет в себе два уровня WIS: уровень математического моделирования и уровень представления знаний. В соответствии с онтологическим подходом к проектированию базы данных [9] первоначально был выполнен онтологический инжиниринг предметной области данных исследований для последующей разработки базы данных. Полученные онтологии изображены на рис. 1 -2.

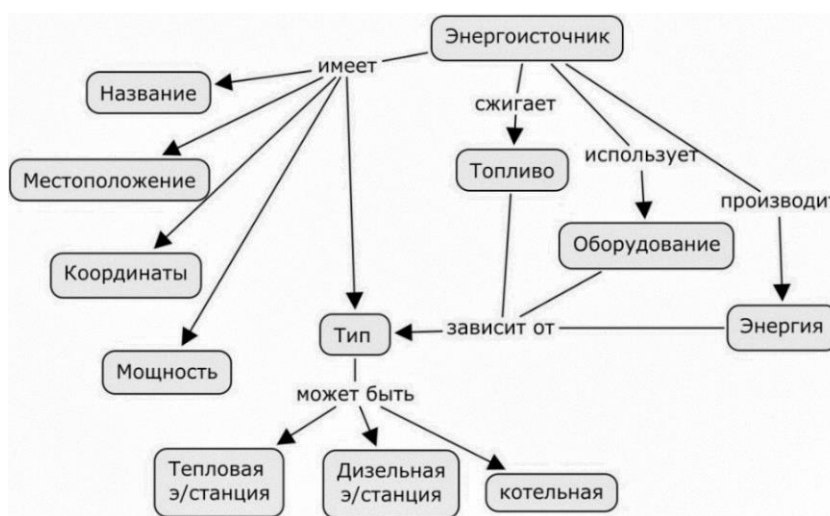


Рис. 1. Онтология типового энергетического объекта

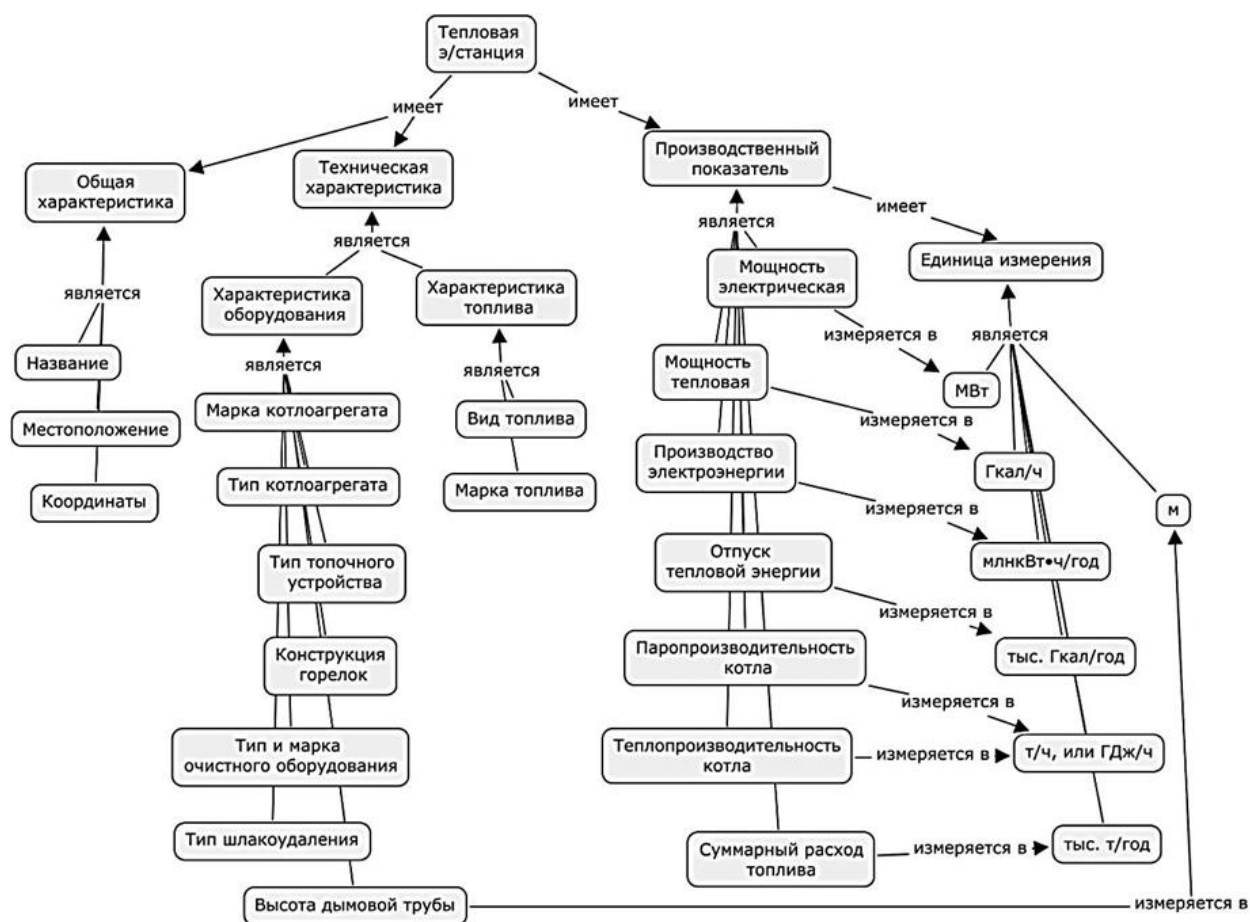


Рис. 2. Онтология тепловой электростанции



Powered by yFiles

Рис. 3. Модель данных предметной области

Онтология типовых энергетических объектов (рис. 1) отражает свойства объекта, тип объекта (тепловая электростанция, дизельная электростанция, котельная), а также взаимосвязи с видом производимой энергии, типом топлива и характеристиками используемого оборудования. На рис. 2 приведена онтология, отражающая основные технические характеристики и производственные показатели конкретных типов энергообъектов, численные характеристики которых хранятся в базе данных. Разработанная на основе этих онтологий модель данных приведена на рис. 3. Рассмотрим подробнее объекты разработанной модели данных.

При работе с IS PEF объектом верхнего уровня, является проект, сведения о котором хранятся в таблице *projects*. К нему в последствии привязываются все остальные объекты при помощи уникального идентификатора проекта *project_id*. Данные об электростанциях, участвующих в расчётах, хранятся в объекте *powerplant*, который содержит в себе подробную информацию объекта – название, географические координаты, сведения о местоположении (регион, город). Установки, сжигающие топливо, хранятся в отдельной таблице *boiler*, которая связывается с электростанцией при помощи уникального идентификатора *powerplant_id*. Объект *boiler* содержит характеристики установки, такие, как тип установки, тип сжигаемого топлива, объём сжигаемого топлива, степень очистки и мощность установки. Типы установок описываются объектом *boiler_type*, с которым связаны допустимые к использованию типы топлива. Информация о них хранится в таблице *boiler_type_fuels*, содержащая в себе также информацию о потерях из-за недожога, долю золы в выносе, коэффициент избытка воздуха.

В построенной модели данных каждый источник информации о типе топлива выделен в отдельную таблицу (например, сведения об угле хранятся в таблице *coal_datasource*) и содержит в себе данные о наименовании источника, годе публикации, внутреннем идентификаторе типа топлива для осуществления связки с типом топлива, используемом на электростанции и применяющийся при получении данных для расчётов, а также основных параметрах топлива, таких, как химический состав, теплота сгорания.

Сведения о расчётах описываются объектом *emission_calculation*, который, в свою очередь, привязывается к проекту. Каждый расчёт содержит элементы, в их роли выступают установки электростанций. Элементы описываются объектом *emission_calculation_element*, хранящим идентификаторы расчёта, электростанции, установки, для которых ведётся расчёт, тип топлива и источник данных для типа топлива. Результаты расчёта для каждого элемента хранятся в таблице *emission_calculation_result_element*, включающей идентификатор расчёта, идентификатор элемента расчёта, а также количественные показатели: выброс пыли, выброс оксидов азота, выброс оксидов серы.

Далее, рассмотрим основные функции и архитектуру IS PEF.

2. Основные функции и архитектура IS PEF.

Основными функциями подсистемы IS PEF являются расчёт выбросов вредных веществ от объектов электроэнергетики и визуализация полученных результатов. Функция расчёта выбросов, в свою очередь, требует наличия функции хранения сведений об электростанциях, типах и параметрах видов топок, параметрах топлива.

На рис. 4 изображена архитектура подсистемы IS PEF.

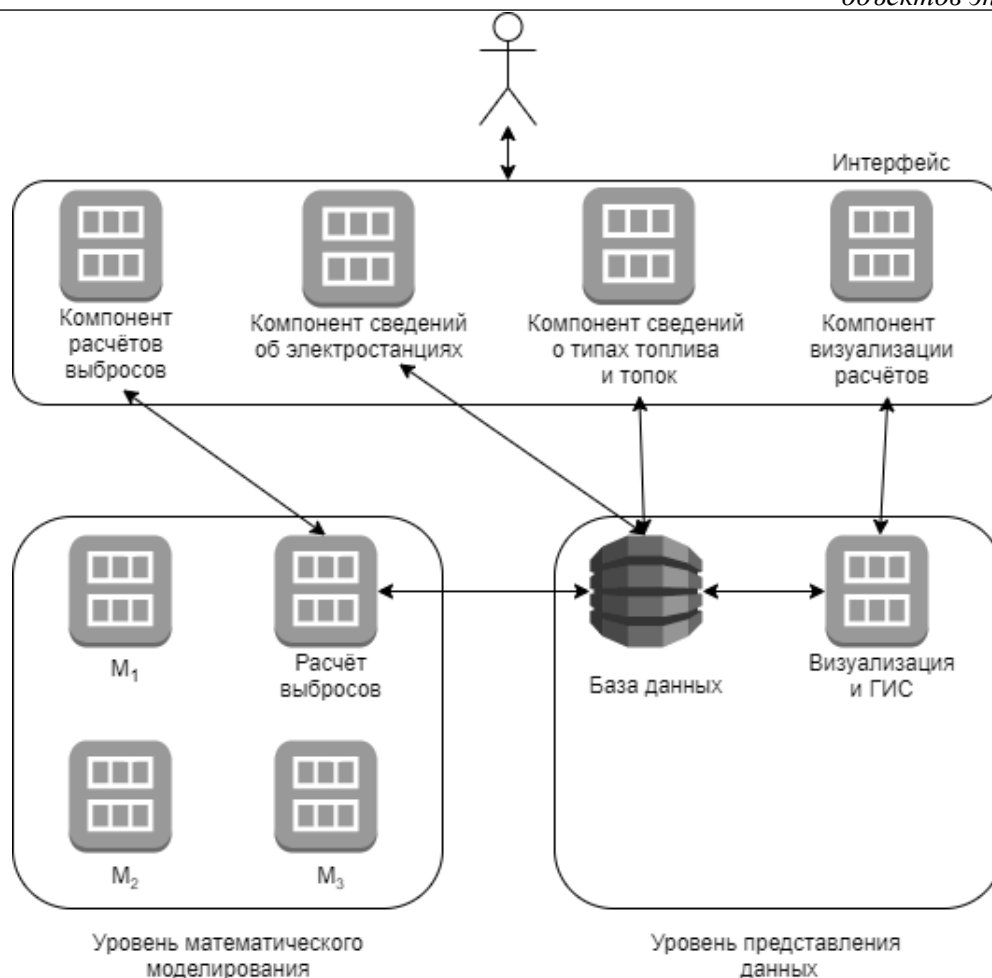


Рис. 4. Архитектура информационной подсистемы IS PEF

Разработанную информационную подсистему можно логически разделить на четыре компонента:

- компонент справочных сведений о типах топлива и топок;
- компонент, отвечающий за сведения об электростанциях;
- компонент, выполняющий расчёт выбросов;
- компонент, отвечающий за визуализацию результатов.

Рассмотрим детально компоненты IS PEF и приведём примеры интерфейсов каждого из них.

Компонент справочных сведений о типах топлива и топок — позволяет централизованно заносить информацию, которая впоследствии используется при внесении данных об электростанциях. При вводе информации пользователь указывает тип топлива (уголь/мазут/дрова), подтип топлива, название типа топлива, а также может дополнительно внести описание типа топлива. Интерфейс этого компонента показан на рис. 5.

Далее, для каждого типа топлива добавляется источник информации, для чего указывается наименование источника, год публикации и характеристики топлива (рис. 6).

Используя полученные данные, пользователь может внести сведения о типах топок, где указывается название типа топки, её описание, а также допустимые типы топлива для сжигания в топке (рис. 7).

При заполнении базы данных сведения о типах и характеристиках сжигаемого топлива, котлов, а также параметрах вредных веществ были взяты из [10, 11].

Тип топлива *	Уголь	▼
Подтип топлива *	Б2	▼
Название топлива *	Азейский уголь	📖
Описание	Азейский им. 50-летия СССР – угольный разрез ПО "Востсибуголь". Расположен в 400 км к северо-западу от г. Иркутск, в Иркутском угольном бассейне. Первая очередь предприятия (годовая производственная мощность 4 млн. т) введена в строй в 1969, вторая (4 млн. т) – в 1972 году. Разрабатываются два горизонтальных пласта сложного строения; мощность первого - 1,5-8,2 м, второго 1,5 – 13,3 м. Расстояние между пластами до 10 м. Добываемые угли – бурые, средняя	

Рис. 5. Внесение сведений о типе топлива

Название источника *	Росинформуголь	📖
Год публикации *	2006	

Показатели

Влажность рабочая, % W_t^r	27.7500
Влажность гигроскопическая, % W_u^r	6.0000
Влажность аналитическая, % W^a	7.0000
Зольность на сухое состояние, % A^d	25.7500
Выход летучих веществ на сухое состояние, % Y^{daf}	0.0000

Рис. 6. Внесение сведений о источнике сведений о параметрах топлива

Название *	Слоевая топка	📖
Описание		

Характеристики

Тип топлива	Класс топлива	Потеря с мех. недожегом q_4 , %	Доля золы в уносе $A_{ун}$, б/р	Потеря с хим. недожегом q_3 , %	Коэф-ент избытка воздуха A_t , б/р
Уголь ▼	Б2 ▼	7.5000	0.2500	1.5000	1.4000
Уголь ▼	Б2Р ▼	7.5000	0.2500	1.5000	1.4000
Уголь ▼	Б3Р ▼	7.5000	0.2500	1.5000	1.4000

Рис. 7. Внесение сведений о типе топки

Компонент, отвечающий за сведения об электростанциях – позволяет детально описать объект электроэнергетики. Пользователь указывает наименование объекта, его местоположение и географическую принадлежность. Дополнительно к объекту добавляются сведения об установках на электростанции, для которых указывается тип котла, тип и класс топлива, само топливо, а также установленная мощность в Гкал/ч, потребление топлива в тоннах и степень пылеочистки в %. Пример внесения сведений показан на рис. 8.

Редактирование э/э

Описание

Название
Новоиркутская ТЭЦ

Описание

Местоположение

Регион
Иркутская область

Район
Иркутский район

Населённый пункт
Иркутск

Широта
52.25059350

Долгота
104.20635360

Котлы

Название	Тип котла	Тип топлива	Класс топлива	Топливо	Установленная мощность, Гкал/ч	Потребление, т.	Пылеочистка, %	Действия
Энергоблок 2	Сплошная топка	Уголь	Б2	Азейский	7.300000	2.9000	50	Удалить
Энергоблок 4	Сплошная топка	Уголь	Б2	Азейский	1.000000	0.3000	0	Удалить

Рис. 8. Внесение информации об электростанции

Компонент, производящий расчёт выбросов – позволяет выполнить расчёты выбросов вредных веществ при сжигании топлива в топках электростанций в зависимости от настройки параметров. Для запуска расчёта пользователю необходимо выбрать электростанции, для которых выполняется расчет, и указать источник данных с параметрами топлива. Пример создания нового варианта расчёта приведён на рис. 9.

Новый расчёт выбросов

Название
Тестовый расчёт

Электростанции

☒	Название котла	Топливо	Источник данных
☒	Новоиркутская ТЭЦ		
☒	Энергоблок 2	Уголь - Азейский уголь	Росинформуголь (2006)
☒	Энергоблок 4	Уголь - Азейский уголь	Росинформуголь (2006)

Сохранить

Рис. 9. Создание нового варианта расчёта выбросов

Для расчётов используются формулы и сведения, указанные в методиках и методических пособиях [12-14]. Сами расчёты выполняются при помощи агент-сервисной технологии [15]: при запуске варианта расчёта он ставится в очередь на выполнение, после чего главный агент-координатор передаёт свободному агенту, отвечающему за расчёт выбросов, задание с указанными пользователем параметрами расчёта. Применение агент-сервисного подхода позволяет как снизить нагрузку на основного агента-координатора, так и производить масштабирование системы при необходимости проведения расчётов с большим объёмом данных. Подробно схема использования агент-сервисного подхода при разработке WIS рассматривалась в [16].

Полученные результаты записываются в базу данных, где они привязываются к котлам энергетических установок, для которых производился расчёт, а также к типу сжигаемого топлива.

Компонент, отвечающий за визуализацию – позволяет отобразить полученные результаты, как в виде таблиц с настраиваемой степенью детализации, так и с помощью визуализации результатов на карте с применением сервиса Яндекс – Карты. За визуализацию результатов на карте отвечает отдельный агент визуализации. Пример визуализации результатов расчетов (рис. 10) приведён на рис. 11.

Результаты расчёта выбросов

Результаты расчётов

Объект	Топливо	Выброс всего, тыс.т/год	Твёрдые вещества	Оксиды серы	Оксиды азота	Степень очистки, %	Установленная мощность, Гкал/ч
Иркутская область		0.033375	0.030310	0.003000	0.000065		1.000000
Иркутский район		0.033375	0.030310	0.003000	0.000065		1.000000
Иркутск		0.033375	0.030310	0.003000	0.000065		1.000000
Новоиркутская ТЭЦ		0.033375	0.030310	0.003000	0.000065		1.000000
Энергоблок 4	Уголь (Азейский уголь)	0.033375	0.030310	0.003000	0.000065	0	1.000000

Рис. 10. Результаты расчёта выбросов в табличном представлении

Результаты расчёта выбросов: визуализация

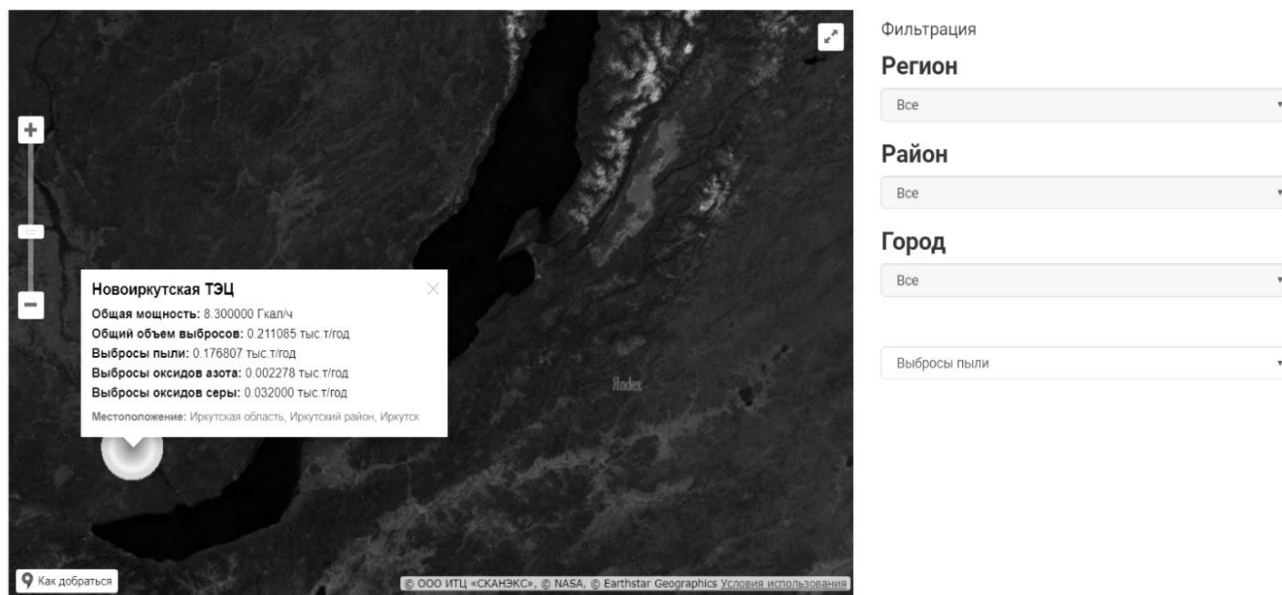


Рис. 11. Результаты расчёта выбросов в виде тепловой карты

Заключение. В статье рассмотрена разработка Web-ориентированной информационно-аналитической системы (WIS) для оценки влияния энергетики на геоэкологию региона. Дано подробное описание одного из модулей WIS - информационной подсистемы IS PEF для расчёта количества вредных выбросов от объектов энергетики. Приведены онтологии предметной области, использованные при проектировании базы данных, показана построенная с помощью онтологий модель данных. Приведена архитектура информационной подсистемы IS PEF, описаны функции и интерфейсы каждого из ее компонентов. Показаны результаты работы IS PEF. В будущем планируется добавить в подсистему возможность расчёта переноса вредных веществ от источника выброса.

Были получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ: №2019666838 «Информационная система для определения загрязнений от энергетических объектов (IS PEF)» [17] и №2019622456 «База данных выбросов вредных веществ от энергетических объектов (DB PEF)» [18].

Отдельные аспекты прорабатывались в рамках проектов, поддержанных грантами РФФИ №19-37-50070, № 20-07-00195.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Массель Л.В. и др. Методы и технологии оценки влияния энергетики на геоэкологию региона: научная коллективная монография / НПУА. – Ереван: Изд-во «Чартарагет», 2019. – 252 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». Режим доступа: http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2017/ (дата обращения: 15.01.2020)
3. Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух. СПб, издательство «Петербург – XXI век», 1995. - 144с.

4. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Майсюк Е.П., Тугузова Т.Ф. Внедрение природоохран-ных мероприятий в теплоэнергетике центральной экологической зоны Байкальской природной территории. // Экология и промышленность России, 2018. Т.22 №7. С.20-25
5. Массель Л.В., Иванова И.Ю., Ворожцова Т.Н., Майсюк Е.П., Ижбулдин А.К., Зорина Т.Г., Барсегян А.Р. Онтологические аспекты исследования взаимовлияния энергетики и геоэкологии // Онтология проектирования. 2018. Т.8. №4 (30). С. 550-561. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4.
6. Массель Л.В. Проблема оценки влияния энергетики на геоэкологию региона: постановка и пути решения // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. №2 (10). С. 5-21. DOI:10.25729/2413-0133-2018-2-01
7. Майсюк Е.П., Иванова И.Ю. Анализ существующих методов оценки воздействия энергетических объектов на окружающую среду // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. №4(12). С. 113 127. DOI: 10.25729/2413-0133-2018-4-12
8. Санеев Б.Г., Майсюк Е.П., Иванова И.Ю. Учет региональных особенностей в методах оценки воздействия энергетики на природную среду // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 6. С. 79-85.
9. Ворожцова Т.Н., Макагонова Н.Н., Массель Л.В. Онтологический подход к проектированию базы данных для оценки влияния энергетики на окружающую среду // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 3 (15). С. 31-41. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-03
10. Качественные характеристики угольной продукции России. Информационно-справочное издание. — М.: «Росинформуголь», 2006 — 258 с.
11. Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ): Справочник / В.С. Вдовченко, - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 184 с.
12. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час. – М., 1999. – 53 с.
13. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. – СПб., 2012. – 223 с.
14. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Под ред. Н.В. Кузнецова и др., - М., "Энергия", 1973. - 296 с.
15. Гальперов В.И. Методы, модели и алгоритмы построения многоагентных систем в энергетике: на примере задачи оценивания состояния электроэнергетических систем: Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук, специальность 05.13.18 / – Иркутск: Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 2017.
16. Liudmila V. Massel, Vladimir R. Kuzmin Typal intelligent DSS for making strategic decisions in the energy sector and examples of application based on agent-service approach // Proceedings of the 21st Workshop on Computer Science And Information Technologies (CSIT 2019), DOI: <https://doi.org/10.2991/csit-19.2019.48>
17. Массель Л.В., Массель А.Г., Кузьмин В.Р. Информационная система для определения загрязнений от энергетических объектов (IS PEF). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666838, 16 декабря 2019 г.
18. Массель Л.В., Массель А.Г., Кузьмин В.Р., Майсюк Е.П. База данных выбросов вредных веществ от энергетических объектов (DB PEF). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019622456, 20 декабря 2019 г.

UDK: 004.4

**DEVELOPMENT OF INFORMATION SUBSYSTEM FOR CALCULATION AND
VISUALIZATION OF HARMFUL EMISSIONS FROM ENERGY OBJECTS**

Kuzmin Vladimir Ruslanovich

Ph.D. student, e-mail: kuzmin_vr@isem.irk.ru

Department of Artificial Intelligence Systems in Energy Sector

Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS,

664033, Irkutsk, Lermontova str., 130

Abstract. As a part of study of impact assessment of energy on the geoecology of the region, a Web-based information-analytical system (WIS) is being developed to support decision-making in the field of ecology and energy. One of its modules is the information subsystem (IS PEF) for calculating the amount of harmful emissions from energy facilities and visualizing calculation results. The article describes the domain ontologies used for designing the IS PEF database, and the developed database structure is described in detail. The architecture of IS PEF is presented, a detailed description of its functionality and agents, and the results of the work of IS PEF are illustrated.

Keywords: information subsystem, geoecology, mathematical modeling, visualization, ontologies, database.

References

1. Massel L.V. et.al. Metody i tekhnologii otsenki vliyaniya energetiki na geoekologiyu regiona: nauchnaya kollektivnaya monografiya [Methods and technologies for assessing the impact of energy on the geoecology of the region: a scientific collective monograph] / Yerevan: Izd-vo «Chartaraget» = Yerevan: Chartaraget Publishing House, 2019. 252 p.
2. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2017 godu» [State report "On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2017"]. Available at: http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2017/ (accessed 15.01.2020) (in Russian)
3. Perechen' i kody veshchestv, zagryaznyayushchikh atmosferynyy vozdukh [The list and codes of substances polluting the atmospheric air]. SPb, izdatel'stvo "Peterburg – XXI vek" = St. Petersburg, publishing house "Peterburg - XXI Century", 1995. – 144p.
4. Saneev B.G., Ivanova I.Yu., Maysyuk E.P., Tuguzova T.F. Vnedreniye prirodnookhran-nykh meropriyatiy v teploenergetike tsentral'noy ekologicheskoy zony Baykal'skoy prirodnoy territorii [Implementation of environmental protection measures in the power system of the central ecological zone of the Baikal natural territory] // Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and industry of Russia. 2018. Vol.22 No. 7. pp 20-25
5. Massel' L.V., Ivanova I.YU., Vorozhtsova T.N., Maysyuk Ye.P., Izhibuldin A.K., Zorina T.G., Barsegyan A.R. Ontologicheskiye aspekty issledovaniya vzaimovliyaniya energetiki i geoekologii [Ontological aspects of the study of the interaction of energy and geoecology] //

- Ontologiya proyektirovaniya = Ontology of Designing. 2018. V.8. №4 (30). Pp. 550-561. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4. (in Russian)
6. Massel' L.V. Problema otsenki vliyaniya energetiki na geoeкологию региона: posta-novka i puti resheniya [The problem of assessing the impact of energy on the regional geo-ecology: formulation and solutions] // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2018. №2 (10). Pp. 5-21. DOI:10.25729/2413-0133-2018-2-01 (in Russian)
 7. Maysyuk Ye.P., Ivanova I.Yu. Analiz sushchestvuyushchikh metodov otsenki vozdeystviya energeticheskikh ob"yektov na okruzhayushchuyu sredu [Analysis of existing methods for assessing the impact of energy facilities on the environment] // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2018. №4 (12). Pp. 113- 127. DOI: 10.25729/2413-0133-2018-4-12 (in Russian)
 8. Saneev B.G., Maysyuk E.P., Ivanova I.Yu. Uchet regional'nykh osobennostey v metodakh otsenki vozdeystviya energetiki na prirodnyuyu sredu [Consideration of regional features in methods for assessing the impact of energy on the environment] // Izvestiya RAN. Energetika = Izvestiya RAS. Energy. 2016. Vol. 6. pp. 79-85.
 9. Vorozhtsova T.N., Makagonova N.N., Massel L.V. Ontologicheskiy podkhod k proyektirovaniyu bazy dannykh dlya otsenki vliyaniya energetiki na okruzhayushchuyu sredu [Ontological approach to designing a database to assess the impact of energy on the environment] // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2019. № 3 (15). Pp. 31-41. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-03
 10. Kachestvennyye kharakteristiki ugolnoy produktsii Rossii. Informatsionno-spravochnoye izdaniye [Qualitative characteristics of coal products in Russia. Information and reference publication]. — M. ; Rosinformugol = Moscow, Rosinformugol, 2006 – 258p.
 11. Energeticheskoye toplivo SSSR (iskopayemye ugli, goryuchiye slantsy, torf, mazut i goryuchiy prirodnyy gaz): Spravochnik [Energy fuel of the USSR (fossil coals, oil shale, peat, fuel oil and combustible natural gas): Directory] / ed. By Vdovchenko V.S. - M.: Energoatomizdat = Moscow, Energoatomizdat, 1991. – 184p.
 12. Metodika opredeleniya vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu pri szhiganii topliva v kotlakh proizvoditel'nost'yu meneye 30 tonn para v chas ili meneye 20 Gkal v chas [The methodology for determining emissions of pollutants into the atmosphere when burning fuel in boilers with a capacity of less than 30 tons of steam per hour or less than 20 Gcal per hour]. M. = Moscow, 1999, 53p.
 13. Metodicheskoye posobiye po raschetu, normirovaniyu i kontrolyu vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfernyy vozdukh [Methodological manual for the calculation, regulation, and control of emissions of pollutants into the air]. SPb. = St. Petersburg, 2012. – 223p.
 14. Teplovoy raschet kotel'nykh agregatov (Normativnyy metod) [Thermal calculation of boiler units (Regulatory method)] / ed. By Kuznetsov N.V. et al. - M., Energiya = Moscow, Energy, 1973. – 296p.
 15. V. I. Galperov. Metody, modeli i algoritmy postroeniya mnogoagentnykh sistem v ehnergetike na primere zadachi ocenivaniya sostoyaniya ehlektroehnergeticheskikh system: Avtoreferat

- dissertatsii na soiskaniye uchonoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk, spetsialnost 05.13.18 [Methods, models and algorithms for creating multiagent systems in energy sector (based on example of task for energy systems state assessment): Abstract of dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.13.18]. Irkutsk, 2017 (in Russian)
16. Liudmila V. Massel, Vladimir R. Kuzmin Typal intelligent DSS for making strategic decisions in the energy sector and examples of application based on agent-service approach // Proceedings of the 21st Workshop on Computer Science And Information Technologies (CSIT 2019), DOI: <https://doi.org/10.2991/csit-19.2019.48>
 17. Massel L.V., Massel A.G., Kuzmin V.R. Informatsionnaya sistema dlya opredeleniya zagryazneniy ot energeticheskikh ob'yektov (IS PEF). Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2019666838, 16 dekabrya 2019 [Information system for determining pollution from energy facilities (IS PEF). Certificate of state registration of a computer program No. 2019666838, December 16, 2019].
 18. Massel L.V., Massel A.G., Kuzmin V.R, Maysyuk Ye.P. Baza dannykh vybrosov vrednykh veshchestv ot energeticheskikh ob'yektov (DB PEF). Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2019622456, 20 dekabrya 2019 [Database of emissions of harmful substances from energy facilities (DB PEF). Certificate of state registration of the database No. 2019622456, December 20, 2019]