

НЕ-факторы, темпоральная логика и нечетко-логические инструменты в гибридных моделях управления рисками импортозамещения

О. В. Булыгина¹, А. А. Емельянов^{2*}, Е. С. Яшин¹

¹ Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске, Россия

² Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

* appliedinformaticsjournal@gmail.com

Аннотация. В последние пять лет проблемы импортозамещения стали возникать в промышленных отраслях различных стран: в России, Китае, Белоруссии и других. Основные причины – политические решения на государственном уровне в странах-производителях импорта, которые выражаются в виде санкций, а также недобросовестная конкуренция со стороны компаний-производителей, поддерживаемых на государственном уровне в этих странах. Поэтому в странах-потребителях разрабатываются технические и торгово-экономические мероприятия по обеспечению своей экономической безопасности. Соответствующие научные исследования и разработки в этих странах стали весьма актуальными. В статье рассмотрено решение задачи управления проектным риском импортозамещения закупаемой продукции с привлечением современных методов системного анализа и исследования операций. В проектах, как правило, рассматриваются два основных вида импортозамещения: улучшенный и радикальный. Исследуются десятки вариантов импортозамещения, которые группируются по трем видам: А – замена импорта на импорт из другой страны, которая не поддерживает санкции; В – разработка собственного продукта, полностью заменяющего импортный, и выпуск этого продукта на предприятиях страны; С – разработка новой системы, в состав которой входит этот продукт, если 100-процентный аналог не может быть закуплен в третьей стране или произведен внутри страны. Вариант А может быть самым простым, а вариант С – сложным или самым трудно реализуемым в смысле расхода материальных и временных ресурсов. Авторами предлагаются новые решения задачи выбора вариантов импортозамещения, основанные на установлении «справедливых» приоритетов реализуемым вариантам с применением гибридных моделей и специальной информационно-управляющей системы.

Ключевые слова: НЕ-фактор, темпоральная логика, нечеткий вывод, имитационное моделирование, управление рисками, импортозамещение, булеан, синергетический эффект, роевой интеллект, справедливый приоритет

Для цитирования: Булыгина О. В., Емельянов А. А., Яшин Е. С. НЕ-факторы, темпоральная логика и нечетко-логические инструменты в гибридных моделях управления рисками импортозамещения // Прикладная информатика. 2020. Т. 15. № 4. С. 5–43. DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-4-5-43

NON-factors, temporal logic and fuzzy logical tools in hybrid import substitution risk management models

O. Bulygina¹, A. Emelyanov^{2*}, E. Yashin¹

¹ The Branch of National Research University MPEI in Smolensk, Russia

² National Research University MPEI, Moscow, Russia

* appliedinformaticsjournal@gmail.com

Resume. In the past five years, the problems of import substitution began to arise in the industrial sectors of various countries: in Russia, China, Belarus and others. The main reasons are political decisions at the state level in importing countries, which are expressed in the form of sanctions, as well as unfair competition from manufacturing companies, supported at the state level in these countries. Therefore, in consumer countries, technical and trade-economic measures are being developed to ensure their economic security. Appropriate research and development in these countries has become very relevant. The article discusses the solution to the project risk management risk in import substitution case of purchased products using modern methods of system analysis and operations research. In projects, as a rule, two main types of import substitution are considered: improved and radical. Dozens of import substitution options are being studied, which are grouped into three types: A – replacement of imports by imports from another country that does not support sanctions; B – development of our own product that completely replaces the imported one, and the release of this product at the country's enterprises; C – development of a new system, which includes this product, if a 100-percent analogue cannot be purchased in a third country or produced domestically. Option A may be the simplest, and option C may become complex or the most difficult and expensive from viewpoint of material and time resources. The authors propose new solutions to the problem of choosing options for import substitution, based on establishing "fair" priorities for the options being implemented using hybrid models and a special information management system.

Keywords: NON-factor, temporal logic, fuzzy conclusion, simulation, risk management, import substitution, power set, synergistic effect, swarm intelligence, fair priority

For citation: Bulygina O., Emelyanov A., Yashin E. NON-factors, temporal logic and fuzzy logical tools in hybrid import substitution risk management models. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2020, vol.15, no.4, pp. 5-43 (in Russian) DOI: 10.37791/2687-0649-2020-15-4-5-43

Введение

Основная терминология, связанная с теорией рисков и используемая ниже, соответствует российским¹ и международным² стандартам.

1 ГОСТ Р ИСО 31000 – Менеджмент риска. Принципы и руководство.
ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010 – Менеджмент риска. Методы оценки риска.

2 ISO 31000 – Principles and guidelines on implementation.
ISO/IEC 31010 – Risk management. Risk assessment techniques.

Риск (*risk*) – это влияние неопределенности на цели [5], а именно:

- а) влияние – это отклонение от того, что ожидается; оно может быть положительным и/или отрицательным и может способствовать реализации возможностей и устранению угроз, создавать или приводить к возникновению возможностей и угроз;
- б) цели могут иметь различные аспекты и категории и могут применяться на различных уровнях.

Источник риска (*risk source*) – элемент (причина, событие), который по отдельности или в сочетании с другими может приводить к возникновению риска.

Событие (*event*) – возникновение или изменение ряда определенных обстоятельств, положительных или отрицательных. Свойства событий:

- а) событие может являться источником риска;
- б) иметь один или несколько вариантов происхождения и может иметь несколько причин и несколько последствий;
- в) заключаться в том, что в течение какого-то интервала времени (не значимого или весьма значимого) не происходит что-то ожидаемое или происходит что-то непредвиденное;
- г) иногда событие может рассматриваться как «инцидент» или «несчастный случай»;
- д) событие *без последствий* определяется *нечетко (fuzzy)* – как «случайное избежание», «инцидент», «почти опасное или опасное» или «почти произошедшее».

Последствие (*consequence*) или следствие – результат события, влияющий на цели:

- а) последствие может быть определенным или неопределенным и иметь положительное или отрицательное влияние на цели;
- б) последствия могут быть выражены качественно или количественно;

- в) любые последствия могут обостряться в силу эффекта каскада или кумулятивных эффектов.

Уровень риска (*level of risk*) – величина риска или комбинации рисков, выраженная как комбинация последствий и их вероятности (возможности).

Управление риском или риск-менеджмент (*risk-management*) – это скоординированные действия по управлению организацией с учетом риска. Целью риск-менеджмента является создание и защита стоимости определенных значимых благ. *Риск-менеджмент стимулирует новые проекты и способствует достижению запланированных результатов* [18].

Страновой риск (*country risk*) – это отклонение действий суверенного правительства внешней страны от партнерских в отношении страны-партнера, которые могут нанести ущерб способности страны-партнера исполнять свои обязательства как внутри своей страны, так и за рубежом. Цель этого отклонения – привести страну-партнера к экономическим потерям.

Проявление странового риска может начинаться с санкций, которые имеют вид правомерных действий, основанных на законах. Страны, чьи интересы ущемляются санкциями, включая Россию, иницируют и выполняют проекты импортозамещения и разрабатывают мероприятия по управлению рисками выполнения этих проектов.

Импортозамещение (*import substitution*) – замещение импортных товаров, услуг или технологий аналогичными, произведенными внутри страны, или приобретаемыми в «третьих» странах. Для замены импорта национальными товарами могут быть использованы протекционистские методы регулирования. Импортозамещение – процесс вынужденный, даже когда у государства-импортера достаточно средств для приобретения импортной продукции, выпуск которой не налажен внутри страны. Можно выделить сле-

дующие категории импортозамещения в промышленности:

- технологий и технологического оборудования для последующего производства замещающей продукции внутри страны;
- сырья, материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий для производства такой продукции внутри страны;
- приобретение эквивалентной замещающей продукции в «третьих» странах, не подпадающих под санкции.

Проект импортозамещения только отчасти можно рассматривать как разновидность инновационного проекта. Различие – в мотивации. Одним из инвесторов проекта должно быть государство, если затрагиваются стратегические отрасли экономики страны, а невыполнение проекта может повлиять на устойчивость отраслей экономики или обороноспособность государства.

Принципиальное отличие риска внутри-странового инновационного проекта от риска проекта импортозамещения заключается в следующем: инновационный проект, даже если он связан с импортозамещением, – это результат хорошей плановой деятельности перспективного экономического развития, не связанной с появлением внезапных угроз экономике извне.

Однако проект импортозамещения появляется совсем не в результате планирования «на перспективу», а практически внезапно, причем это проект от момента решения его реализации до успешного завершения выполняется под действием разных источников риска, в том числе двух источников, характерных в основном только для таких проектов:

- 1) потери внешнего – странового поставщика с неопределенными последствиями, в т. ч. перспектив выпуска замещающей продукции внутри страны;
- 2) возможной невосполнимой потери времени при реализации замещения.

Другое принципиальное отличие инновационного проекта: инновации нужно иногда

«продвигать» волевыми решениями, в т. ч. с привлечением методов искусственного интеллекта для принятия решений, например, роевых алгоритмов [11, 28]. Импортозамещение в своем продвижении нуждается намного меньше по сравнению с инновацией, т. к. его результаты «уже ждут».

Импортозамещение как особый вид экономической деятельности декларируется в России с 2014 года, после инициирования процесса взаимных санкций странами Запада в отношении России. В результате ущерб был нанесен производству и эксплуатации дизель-поездов областного и межобластного сообщения, авиационной промышленности, судостроительной отрасли, эксплуатации импортного станочного парка, эксплуатации городского электротранспорта в некоторых городах-миллионниках, а также произошли другие значимые, но не «роковые» потери. Поэтому разработки, способствующие снижению уровня проектного риска импортозамещения, актуальны.

Предлагаемая статья написана в развитие ранее опубликованных авторами работ [5, 7].

1. Задача реализации проекта импортозамещения в условиях управления риском его «невыполнения»

Поиск вариантов импортозамещения происходит по трем направлениям:

А – замена «санкционного» импорта на импорт из «третьей страны»;

В – разработка собственного продукта, полностью заменяющего импортный;

С – разработка и нового замещающего продукта, и новой системы, в состав которой войдет этот продукт, если 100-процентный аналог не может быть закуплен «во вне» или произведен внутри страны.

По каждому направлению может быть найдено до нескольких десятков вариантов, которые нужно проанализировать и из которых требуется выбрать самые приоритетные. Критерии и варианты выбора могут быть различными:

- а) вписаться ограничениями на сроки реализации в рамках ограничений на выделяемые финансовые и материально-технические ресурсы, а также на технологические возможности страны по выпуску замещающего продукта;
- б) выбрать рациональный по финансированию вариант при условии, что с материально-техническими ресурсами и технологиями проблем нет;
- в) найти рациональный с точки зрения материально-технических ресурсов и технологий вариант при условии, что проект обеспечивается финансово;
- г) создавать и проект выпуска замещающего продукта, и импортозамещающую технологию выпуска этого продукта, но при этом предстоит переосмысливание объемов выделяемых финансовых и материально-технических ресурсов, а также технико-технологических возможностей страны.

Основная сложность выбора вариантов заключается в отсутствии какой-то сравнительной статистики по характеристикам продуктов, выпускаемых как внутри страны, так и зарубежными компаниями. Поскольку основными инструментами защиты таких проектов и управления рисками их реализации являются страховые инструменты, эту скудную исходную статистику нужно «дополнять» какими-то отчасти исходными данными, например, результатами имитационного моделирования с привлечением методов искусственного интеллекта.

Поскольку вариантов становится все больше в процессе поиска и отбора, нужно назначать им приоритеты с точки зрения пользы для отрасли и страны. Однако понятие «польза» здесь очень неоднозначно и не может быть выражено расчетом экономического эффекта, если отбор происходит в условиях неопределенности и риска, поскольку это понятие не просто соседствует с понятием «справедливость», но и частично перекрывается им. Соответственно, резуль-

таты любого расчета эффекта при этом могут подвергаться сомнениям. Стоимость одной технической системы, выпуск которой приостановлен по санкционным причинам, может составлять миллиарды рублей. Поэтому ошибочный выбор варианта импортозамещения может иметь большие негативные последствия. Определение «уровня справедливости» будет показано ниже в соответствующем разделе.

Процесс выбора вариантов импортозамещения с учетом вышеуказанных обстоятельств показан в виде автономного фрагмента имитационной модели (рис. 1) – имитационной процедуры, выполняемой в online-режиме работы с экспертами в качестве стенда для отбора вариантов и предназначенной для включения в общую имитационную модель управления проектом.

Имитационная процедура реализована в системе имитационного моделирования Actor Pilgrim¹ [2, 8]. Одной из особенностей этой моделирующей системы является предоставление модельерам возможностей реализовывать любые приоритетные правила.

В России одними из самых популярных моделирующих систем являются GPSS World, Any Logic и Actor Pilgrim. В них имеются доступные средства назначения технических приоритетов: относительных, абсолютных (т. е. с прерыванием обслуживания) и динамических (т. е. по Джексону [20]), стандартное решение имеется в Actor Pilgrim). Однако

¹ Емельянов А. А., Емельянова Н. З. Система имитационного моделирования временной, пространственной и финансовой динамики экономических процессов Actor Pilgrim. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2014614435 от 24.04.2014. М.: РОСПАТЕНТ, 2014.

Emelyanov A. A., Emelyanova N. Z. Sistema imitatsionnogo modelirovaniya vremennoi, prostranstvennoi i finansovoi dinamiki ekonomicheskikh protsessov Actor Pilgrim. [A simulation system for modeling of temporal, spatial and financial dynamics of economic processes Actor Pilgrim]. State registration certificate of computer program RU 2014614435 at 04.24.2014. Moscow, ROSPATENT, 2014.

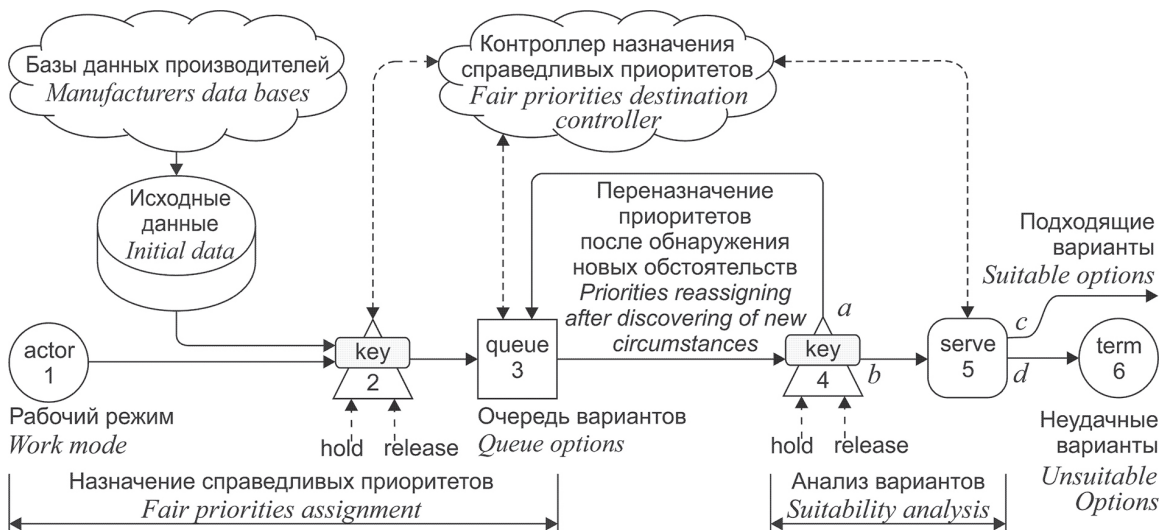


Рис. 1. Динамическое назначение «справедливых» приоритетов в фрагменте имитационной модели с помощью нечетко-логического контроллера

Fig. 1. The dynamic assignment of fair priorities in the simulation model by means of fuzzy logic controller

все эти средства технически элементарные. Только приоритетная дисциплина «по Джексону» имеет слабые признаки «справедливого» назначения, а технически каждый обладатель гаджета *iPhone* ежедневно неявно имеет с ней «встречу».

Справедливость – понятие древнее и довольно нечеткое, часто зависит от страны пребывания и других условий. Существует три типа справедливости: социальная, равноправная и распределительная. Распределительная справедливость (в нашем случае) требует пропорциональности по отношению к людям по тому или иному критерию, например, «равное распространяется на равных потребителей», «неравное распространяется на неравных», «у каждого потребителя – свое» и некоторые другие. Но вернемся к рис. 1.

Схема состоит из взаимосвязанных шести относительно автономных узлов типа actor (1), key (2 и 4), queue (3), serve (5) и term (6). На схеме показан общий вид многоканальной системы массового обслуживания (СМО) с тремя видами приоритетов: относительными, абсолютными и динамическими. Основное практическое назначение имитационной про-

цедуры – выполнить назначение справедливых приоритетов, а не сбор модельной статистики, хотя такой сбор может быть полезным с познавательной точки зрения.

В рассматриваемой СМО заявка – это динамический объект, представляющий собой **актор-вариант** (или опцию) импортозамещения, который в отличие от транзакта (в *gpss*-моделях) может «обладать» интеллектуальными свойствами [2, 7, 8]. Структура данных, сопровождающая каждый актор, должна содержать одинаковые по составу наборы параметров независимо от источника, поэтому нужны программные фильтры, контролируемые экспертами.

Генератор заявок актор (1) в этой СМО предназначен для генерации акторов-опций. Актор-опция направляется в узел key (2), который постоянно открыт.

Переключатель key (2) на входе имеет доступ к транзитному файлу «Исходные данные» и наполняет соответствующую структуру данных, адресно прикрепленную к очередному актору-опции, закодированными данными об очередном возможном проекте импортозамещения, получаемыми из очеред-

ной «структурной записи» этого файла. Этот транзитный файл пополняется из доступных «Баз данных производителей» или из интернет-облака.

«Заряженный» таким образом актор-опция поступает в очередь (3) – очередь, автоматически упорядочиваемую по правилу относительных приоритетов. Однако эти приоритеты формируются по алгоритму нечеткого логического вывода с учетом различных параметров, в т. ч. обязательно – источников риска невыполнения проекта и текущего состояния очереди queue (3), и далее могут называться динамически «справедливыми», поскольку могут многократно переназначаться.

Постепенно в очереди queue (3) накапливается заслуживающий внимания набор акторов-опций с наиболее высокими приоритетами. Критерий останова здесь один – лицо, принимающее решения, считает, что проанализировано и накоплено достаточное число вариантов, которые дальше можно разрабатывать. Логичнее всего начинать с самых приоритетных во главе очереди.

Переключатель key (4) все время находится в закрытом состоянии, чтобы очередь работала в режиме накопления, а именно до тех пор, пока:

- 1) либо эксперт заметит некорректности исходных данных в каких-то проектах;
- 2) либо он придет к решению, что рассмотрено достаточное число вариантов (или просто других вариантов в базах не найдено).

В первом случае по команде эксперта открывается выход акторам-опциям в направлении обратной связи – для переназначения приоритетов и последовательного размещения их в очереди для следующей итерации. Во втором – открывается выход для более плотной работы проектировщиков с наиболее приоритетными вариантами-проектами замещения.

Обслуживающий узел serve (5) по факту никакого обслуживания не производит. Это – линия задержки на какой-то квант времени,

которая может быть значимой по каким-то соображениям в общей модели. Число каналов в этом узле задается параметром, но никак не влияет на упорядоченность акторов-опций. Однако число каналов может быть необходимым для решения других задач в общей модели, в которую входит рассматриваемый комплекс. Что касается абсолютных приоритетов, то они в случае необходимости могут устанавливаться в узле serve (5) параметром как этого узла, так и входящего в этот узел актора. Абсолютные приоритеты в узле serve (5) никак не влияют на процесс формирования справедливых приоритетов, но такие приоритеты могут быть назначены экспертами в связи с их другими задачами.

Динамическое переназначение приоритетов акторам-опциям, находящимся в очереди, происходит с помощью агентной программы «Контроллер назначения справедливых приоритетов», обладающей интеллектуальными свойствами. Контроллеру доступна информация о вновь поступающем в узел key (2) акторе извне. Кроме того, доступна информация о накопленных в очереди акторах и о том, как были получены их приоритеты. В структуре данных каждого актора-опции есть закодированная информация о варианте-проекте замещения, об ограничениях, в условиях которых проект может быть выполнен, об источниках риска выполнения. Вся эта информация в целом нечеткая и зависит от временных составляющих. Если переключателем key (4) была получена команда от эксперта перенаправить все содержимое очереди в узел serve (5), то очередь разгружается, и serve (5) пропускает через себя всё содержимое очереди и перераспределяет акторы-опции: признанные «неподходящими» по каким-то критериям акторы направляются в узел term (6) и исключаются из дальнейшего рассмотрения (уничтожаются), а остальные опять направляются в очередь. Главный компонент выбираемого критерия назначения высокого приоритета актору – это уровень риска неудачи со-

ответствующего проекта импортозамещения. Чем ниже уровень, тем больше приоритет.

Целью данного исследования является создание имитационной процедуры – комплекса, включаемого в общую имитационную модель, залегендированное описание которого дано выше, необходимого для упорядочивания анализируемых вариантов импортозамещения на основе назначения особых приоритетов. Возможный эффект – сокращение времени из-за отбраковки тупиковых, или трудно реализуемых, или ущербных вариантов импортозамещения.

Для реализации на первый взгляд «простой» схемы (см. рис. 1) этого комплекса нужен научно-практический аппарат, выходящий за пределы свода теоретических сведений об имитационном моделировании:

- основной действующей единицей, в отношении которой принимаются решения в модели, является актор, поэтому необходимо анализировать влияние на решения НЕ-факторов и использовать теорию акторных сетей;
- оценка длительности выполнения проекта в условиях неопределенности соблюдения временных соотношений и риска практически невозможна без применения темпоральной логики;
- количество значимой информации, если есть сведения только об информации о каждом отдельном источнике риска часто недостаточно для принятия решений, поэтому нужны особые методы увеличения количества используемой информации;
- нужны нечетко-логические алгоритмы переназначения приоритетов всем акторам-вариантам, находящимся в очереди при появлении нового актора.

2. Применение теории НЕ-факторов в анализе ситуаций принятия решений

Термин *НЕ-факторы* был предложен более тридцати лет назад для обозначения комплекса свойств (*НЕдоопределенность*, *НЕточность*, *НЕполнота*, *НЕкорректность*

и др.), характерных для реальной Системы Знаний, но плохо представленных в формальных системах. Введение термина НЕ-факторы в начале 1980-х гг. было связано с попыткой осознать особенности прагматики спектра тех свойств, которые соотносятся с различными «дефектами» как самих знаний, так и любой системы знаний.

Понятия «НЕ-факторы» впервые определено А. С. Нариньяни в ВЦ Академии Наук, г. Новосибирск [14]. Исследованием проблем, связанных с НЕ-факторами, впоследствии занимались многие ученые в России и за рубежом, в том числе:

Ю. Р. Валькман [6] – моделирование НЕ-факторов: основа интеллектуализации компьютерных технологий;

Г. В. Рыбина [19] – приобретение знаний, содержащих НЕ-факторы;

В. Б. Тарасов [21] – логико-семиотический подход к моделированию НЕ-факторов в теории агентов;

Малкольм Бейнон [26] (*Cardiff University*) – он разработал в своих трудах «Гибридный метод анализа источников рисков для моделирования *НЕточности* и/или *НЕуверенности* суждений эксперта», основанный на объединении метода анализа иерархий Саати (АНР, *Saaty analytical hierarchy process*) и теории доверия Демпстера-Шефера (DST, *Dempster-Shafer theory*) – математической теории очевидностей, основанной на функции доверия (*belief functions*) и функции правдоподобия (*plausible reasoning*), которые используются, чтобы скомбинировать отдельные части информации (или отдельные свидетельства) для вычисления вероятности или возможности события. Этот метод – важнейшее достижение, которое применимо для гибридного моделирования проектных рисков и оценки жизнеспособности проектов.

Учитывая, что прошло много лет, в течение которых теория НЕ-факторов развивается, ниже сведения об этой теории дополняются комментариями. Наглядный пример

может показать значимость НЕ-факторов для принятия решений.

Пример 1. Нужно доказать справедливость следующего утверждения [14]: «НЕ-факторы типа *НЕточность* и *НЕдоопределенность* весьма различны в интерпретации даже простейшего отношения равенства значений».

Доказательство. Для доски, изготовленной с точностью до пары миллиметров, измерение толщины в конкретном месте может быть сделано с точностью до 0,1 мм. В этом случае, если для всей доски ее толщина есть неточное значение k с допуском плюс-минус миллиметр, то для ее конкретной точки толщина равна k_1 с точностью 0,1 мм. Таким образом, значение k является *НЕдоопределенным* интервалом, поскольку в зависимости от места замера оно может уточняться до вложенного в него *НЕточного* значения k_1 .

НЕ-факторы и искусственный интеллект. По утверждению Нариньяни [там же], основная часть НЕ-факторов относится сегодня к «абсолютному незнанию». Это явление остается почти неизученным или вообще игнорируемым в традиционной математике, хотя весьма активно разрабатывается в инженерии знаний. Такая активность объясняется упомянутой выше принадлежностью НЕ-факторов к тем разделам Системы Знаний, которые до сих пор плохо поддавались формализации и поэтому остаются своего рода целиной. Такие «новые территории» привлекали исследователей в инженерии знаний потому, что искусственный интеллект был вынужден работать в данных областях, оперируя с «наивными» знаниями, которые оказались просто раем для самых разных, в основном тоже «наивных» подходов.

По мнению Нариньяни, именно такая начальная неосновательность объясняет невысокий, вопреки ожиданиям, эффект работ в искусственном интеллекте за последние десятилетия. Это связано с двумя основными методологическими ошибками, которые определяются спецификой становления инженерии

знаний, находящейся под «протекторатом» таких плохо коррелирующих между собой дисциплин, как математика, лингвистика и философия.

1. Исследуемые в искусственном интеллекте понятия связываются, как правило, с конкретными лексическими «этикетками» (словами и словосочетаниями), позаимствованными из естественного языка. Это порождает принципиальную путаницу, поскольку смысл изучаемого явления и ассоциируемого с ним слова – далеко не одно и то же. Слово может иметь целый спектр значений, не всегда различаемых четко (а часто различаемых с трудом и в достаточно узких контекстах). Явление же определяется прагматикой – его ролью в реальности, причем границы этой роли тоже далеко не всегда являются четкими. Попытка разобраться с моделируемой сутью явления, исходя из семантики его этикетки в языке, дезориентирует исследователя, подменяя содержательные выводы кашей из прагматики и лексической семантики. В связи с вышесказанным, дальнейшее обсуждение будет вестись с учетом того, что при рассмотрении любого НЕ-фактора его имя является всего лишь этикеткой, присвоенной некоторому типу явлений.
2. Формальные средства для инженерии знаний создают в основном математики, отталкиваясь от внешнего, часто очень поверхностного, сходства придуманного ими формального аппарата с якобы отражаемой им реальностью. Между тем, формализация должна начинаться с тщательного изучения моделируемого явления, с подготовки и систематизации знания о нем. Эта фаза должна обязательно предшествовать его отражению в формальной модели, которое без нее никогда не может быть достаточно адекватным. Именно этот переход от доформального исследования объекта моделирования к его формальной модели и составляет основу инженерии знаний.

Поэтому видно только «несколько кирпичей здания» НЕ-факторов, о величине и сложности которого пока мало что известно. Однако НЕ-факторы приносят ощутимую пользу в системном анализе сложных явлений.

Разные авторы рассматривают в своих задачах различные наборы НЕ-факторов. Особенно часто рассматривается такой набор: 1) *НЕзамкнутость*; 2) *НЕопределенность*; 3) *НЕоднозначность*; 4) *НЕдоопределенность*; 5) *НЕточность*; 6) *НЕзнание*; 7) *НЕкорректность*; 8) *НЕполнота*; 9) *НЕуверенность*; 10) *НЕчеткость*.

Социально-значимые НЕ-факторы. С появлением в некоторых системах имитационного моделирования свойств, позволяющих включать в имитационную модель компоненты, реализованные на основе методов искусственного интеллекта, в последние несколько лет авторы данной статьи в сложных имитационных моделях стали включать в рассмотрение на первый взгляд два очень необычных фактора [7, 8]:

11) *НЕчеловечность* – возможное отсутствие свойств *Homo Sapiens* у виртуального актора в имитационной модели (*nonhumans qualities*);

12) *НЕСправедливость* – возможное принятие несправедливого решений (*non justice*).

На первый взгляд *НЕчеловечность* – это лингвистическая переменная из теории нечетких множеств, т. е. разновидность нечеткости. Функция принадлежности специфичная: либо объект моделирования по своим «мыслительным» свойствам можно отнести к биологическому мыслящему отряду *Homo Sapiens* на 100%, либо нельзя отнести к этому отряду – тоже на 100%, а граница различия свойств – нечеткая. *Highly Likely* подотрядов *Homo Sapiens* на планете Земля не обнаружено. Необходимость рассмотрения НЕ-фактора типа *НЕчеловечность* возникла в связи с развитием гибридных методов имитационного моделирования на стыке компьютерной симуляции и искусственного интеллекта.

Развитию гибридного моделирования способствовало создание и развитие теории акторных сетей. Благодаря авторским исследованиям в области теории акторных сетей вводится и такой важный, но нечеткий НЕ-фактор как *НЕСправедливость* (понятие справедливости было рассмотрено выше).

3. Теория акторных сетей в имитационном моделировании

Теория акторных сетей (ANT от *actor-network-theory*) – теоретический метод абстрактного моделирования, применяемый в областях науки и технологий, кибернетики и экономико-социальных исследований, который рассматривает элементарные динамические объекты модели (людей-специалистов, артефакты, технические комплексы, транспортные средства, и даже животных, включая бактерии и насекомых, и др.) как действующие единицы различных отношений, включая социальные, способные порождать и/или транслировать действия или информацию по некой акторной сети [31].

В классификаторе на рис. 2 учтены все вышеперечисленные НЕ-факторы, значимые при оценке жизнеспособности проекта, включая *НЕчеловечность* и *НЕСправедливость*.

Темными тонами выделены те методы, которые используются в гибридном акторном имитационном моделировании, в частности – в системе имитационного моделирования Actor Pilgrim [7, 8]. Это возможная и пока никем незавершенная классификация НЕ-факторов применительно к задаче оценки выполнимости проекта (два варианта классификации приведены ранее в [там же]).

Основным принципом акторно-сетевой теории является концепция гетерогенной сети, которая состоит из многих разнородных элементов. В ANT рассматриваются агенты-НЕ-люди (от *non-humans*) в качестве равноправных действующих акторов в социальных системах и отношениях наряду с агентами-людьми (*humans*). Такое модельное равноправие не признается многими филосо-

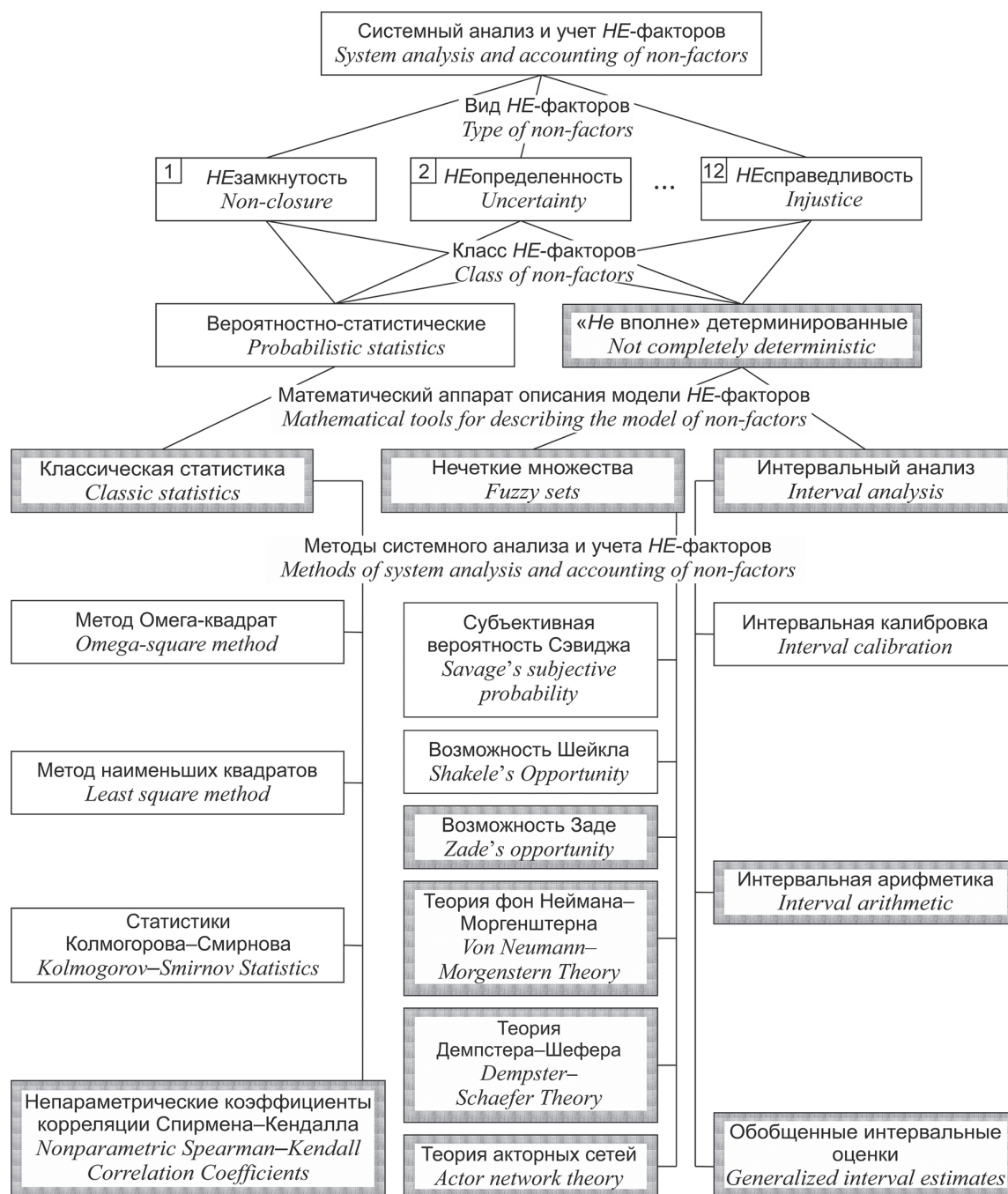


Рис. 2. Инструменты системного анализа НЕ-факторов

Fig. 2. Tools for system analysis of NON-factors

фами и социологами, поскольку означает, что в этой теории одинаковым образом описываются отношения, которые являются как материальными (между вещами), так и семиотическими (между понятиями). Это примерно такие же причины, по которым когда-то кибернетика считалась «лженаукой».

Отсюда и возникла значимость НЕ-факторов *НЕчеловечность* и *НЕсправедливость*, которые позволяют спорные социально-философские отношения, если они даже появляются в моделях (это бывает редко), расставить «по местам». Когда создаются подобные отношения, существенную роль начинают играть способы учета неопределенностей, т. е. так называемых НЕ-факторов внешней и внутренней среды конкретного проекта, отражающих неполноту исходных данных для проектирования, изменение требований, сроков и объема выделяемых ресурсов на проектирование, а также слабую структурированность знаний о проекте и др. [5].

Актеры одинаковы по отношению к друг другу, но содержат в себе как социальные, так и технические элементы. Согласно мнению социологов – сторонников этой теории, в ANT принято считать, что любой актер, будь то человек-персона, вычислительный объект (включая *software* – компьютерные программы, *hardware* – аппаратное обеспечение или «железо», а также технические стандарты) или организация, одинаково важны для социальной сети. Таким образом, справедливый социальный порядок – это следствие, вызванное «ровной» работой актора сети. Этот порядок может быть нарушен, если определенные акторы будут исключены из работы сети. Например, прекращение работы телефонной сети, банковской системы или президента страны могут привести к серьезному нарушению социального порядка. В результате существуют только акторы – существа, которые выполняют действия, влияющие на другие существа. Актором может быть человек-персона, организация, а также

объект типа вируса гриппа, который в публичном пространстве непосредственно влияет на людей и их здоровье.

По мнению социологов – противников ANT, акторы создают плоскую динамическую сеть, которая определяет их взаимные отношения. Ради справедливости следует отметить, что эти ученые ошибались, поскольку в ANT вообще не определялась конфигурация сети, как плоская, так и иерархическая: она может быть любой.

Однако в своей исходной области исследований науки и технологий ANT – это теоретический подход к построению кибернетических поведенческих моделей, «сильно похожий» на имитационное моделирование. В кибернетике ANT является одним из методов системного анализа в управлении. Создание системы имитационного моделирования Actor Pilgrim происходило с учетом достижения ANT [2, 8].

Основные понятия теории акторных сетей [там же]

Актор (актант или агент сети) – объект или существо, совершающее действие или подвергающееся воздействию. Это может быть любое действующее лицо в жизненном цикле построения и развития модельной сети (микроб, теорема, организация, сотрудник).

Перевод – это всегда попытка установить связь типа «приравнивание» между двумя неэквивалентными феноменами или терминами. Пример перевода: «Хотите снять профессиональное кино – потрудитесь подготовить бизнес-план».

Черный ящик – это устройство, которое стоит перед системным аналитиком «как предмет мебели»: все операции, приведшие к его созданию, забыты, а показания его кажутся непререкаемо истинными.

Черный ящик появляется тогда, когда множество элементов работают как один, причем настолько предсказуемо, что системному аналитику необязательно знать принцип их сборки или сцепки.

Процесс – действие в сети, которое может оказать влияние на сообщество акторов, их численность, состав, внутренние атрибуты, причем это действие связано с динамикой и изменениями во временном, пространственном и даже денежном измерениях. В денежных единицах измеряются собственно деньги и финансовые инструменты (псевдо-деньги), все то, что обеспечивает «горючим» выполнение экономических процессов. «Живой» актор всегда вовлечен в какой-то конкретный процесс [7, 8, 30].

Акторная сеть – это совокупность акторов или агентов сети (людей и вещей), которые взаимодействуют в едином пространстве и деятельность которых направлена на решение общей задачи. Но агенты такой сети не только связаны друг с другом в «социальном» пространстве, но и осуществляют совместную деятельность ради определенной цели.

Поскольку любая деятельность невозможна без процессов ее осуществления, то доступные направления взаимодействий акторов определяются ребрами графа сети. Поэтому структура сети определяется графом процессов и может быть однослойной – плоской, или многослойной – с возможностями послойной миграции акторов, и, в частности, иерархической. Структура сети в течение жизненного цикла сети может изменяться.

Событие – формально это момент времени выхода актора из какого-то процесса. Имеет три разновидности:

- 1) момент входа нового актора в сетевой процесс, на самом деле это – или выход из «неоткуда» (внезапное «чудесное» появление);
- или выход «откуда-то» благодаря другому актору (момент рождения);
- 2) момент перехода актора из одного сетевого процесса в другой;
- 3) момент выхода актора в «никуда» из какого-то сетевого процесса (момент гибели).

Основные формальные свойства акторов [там же]

1. Актор имеет возраст, измеряемый во времени. Значит, он имеет моменты рождения и гибели, связанные с временем.
2. Он может порождать себе подобные акторы с полным или частичным наследованием своих свойств потомками, с возможностью мутации потомков.
3. Актор может быть более или менее «важным» при вовлечении в какой-то сетевой процесс, то есть иметь приоритет.
4. Актор может иметь «карманные деньги» или финансовые инструменты в своем личном кошельке. Эти виртуальные денежные средства не всегда влияют на экономические механизмы моделируемой с помощью акторной сети технико-экономической системы, даже если имеют весьма значимые с точки зрения модельера объемы.
5. Актор может уничтожать себе подобных акторов.
6. Акторы могут образовывать «семьи».
7. Актор может иметь долги даже при непустом кошельке или вообще не иметь долгов, однако в кошельке может быть только конкретная положительная сумма, или он может быть пустым – нулевым.
8. Актор может стать «капиталистом», передавая «карманные деньги» в специальный узел-счет в модели, выполняющий функции счета банковского или бухгалтерского учета, или получая деньги оттуда в кошелек. Такой узел-счет имеет специфические параметры: *положительное сальдо* (наличный остаток средств) и *отрицательное сальдо* (дефицит средств). В этом случае средства актора становятся частью финансовых ресурсов моделируемой экономической системы и влияют на ее динамику и подведение итогов, например, при расчете баланса.
9. Актор может владеть и материальными ресурсами в течение какого-то времени, их получать, возвращать их или переда-

- вать другому узлу и мигрировать по графу ANT с захваченным набором ресурсов.
10. Актор находится в конкретной точке пространства с привязкой к его координатам (например, к точке на топографической карте местности). Он может менять свое расположение, перемещаться.
 11. Между акторами разных семей или одной семьи могут быть прямые логические связи.
 12. Актор может изменять структуру сети (граф модели автотрансформируется) в зависимости от текущих результатов моделирования.

Замечание: Если с позиций ANT сравнивать системы имитационного моделирования GPSS World и Actor Pilgrim, то можно заметить, что средствами GPSS World полностью или частично обеспечиваются только свойства 1, ..., 6. Однако средствами Actor Pilgrim обеспечиваются все вышеперечисленные 12 свойств. Тем не менее это не умаляет значимость GPSS World, которая была создана совсем для других применений.

Следует отметить, что система Actor Pilgrim была создана не только с применением ANT, но и благодаря положительному опыту, накопленному разработчиками в течение 10-летних экспериментов с GPSS-360 и GPSS-V (в 1977–1986 гг.), включая выпуск специальной версии GPSS для коллективного управления процессом моделирования, – общей моделью с разных рабочих мест. Разработчики Actor Pilgrim рассматривают GPSS как «старшего брата» своей системы [2, с. 13].

4. Темпоральная логика в принятии решений о реализации проектов

Учет фактора времени позволяет при построении дедуктивных рассуждений реализовать важнейший методологический принцип – принцип конкретности истины. Особенно это проявляется в рассуждениях «о справедливости».

Темпоральная логика (логика времени, в т. ч. модальная логика) – раздел современной

неклассической логики, исследующий логические свойства высказываний, которые содержат временной параметр (ссылку на момент или интервал времени, в который имеет место некоторая ситуация) или временную характеристику (указание на отношение одной или нескольких ситуаций к временному ряду событий).

Современная символическая темпоральная логика, впервые концептуализированная и сформулированная в 1950-е годы Артуром Прайором на основе модальной логики, наибольшее распространение и развитие получила в информатике благодаря трудам лауреата Тьюринговской премии Амира Пнуэли.

Далее это направление в 1983–1991 гг. активно развивал Джеймс Аллен [25]. Одно из самых полных современных изложений темпоральной логики и ее применений опубликовали английские исследователи Михаэль Хутс и Марк Рьян в Кембридже [27].

В России это научное направление «прижилось» сравнительно недавно. Следует отметить достижения таких ученых, как А. П. Еремеев (МЭИ) [9] и Ю. Г. Карпов (СПбПУ Петра Великого) [12] в разработках, связанных с интеллектуальными системами поддержки принятия решений в реальном времени.

Структура времени в темпоральной логике определяется исходя из предметной области. В настоящее время существуют две концепции времени: статическая – СКВ, и динамическая – ДКВ. В силу прикладной направленности СКВ-модели на ее основе строятся в логическом плане без принципиальных затруднений. Необходимо принять во внимание следующие аспекты:

- а) дискретность или непрерывность времени, т.е. определяется ли некий минимальный шаг изменения времени (например, 1 сек.), или можно указать сколь угодно малый интервал времени;
- б) полнота или неполнота времени, т.е. существует ли для любой последовательности, принадлежащей некоторой

области интерпретации, предел, также принадлежащий этой области, или данное условие не выполняется;

- в) ограниченность или неограниченность времени, т.е. рассматривается ли какой-то достаточно большой, но ограниченный интервал времени, или интервал не ограничен и возможны события, происходящие через бесконечное время;
- г) линейность, ветвистость или цикличность времени, т.е. существует ли полностью определенное отношение предшествования во времени для временных примитивов (линейное время) или это условие не выполняется (ветвящееся или циклическое время);
- д) гомогенность или гетерогенность временных интервалов, т.е. следует или нет из истинности некоторого утверждения над интервалом его истинность над подинтервалами этого интервала.

Временные зависимости могут быть количественные и качественные.

1. *Количественные (метрологические) зависимости* – например: «Объект работал 8 часов».
2. *Качественные зависимости (квалиметрические)* – например: «Сначала оператор сел за пульт, а затем включил систему».

В качестве временных примитивов используются моменты (в точечных логиках) или интервалы (в интервальных логиках) времени.

Если в качестве основы используются моменты времени, то интервалы времени можно представлять в виде упорядоченной пары моментов, соответствующих началу и концу временного интервала. Если же за основу берутся интервалы времени, то момент можно рассматривать как интервал нулевой длины. Разработаны формальные системы, допускающие одновременное использование и интервалов, и моментов времени, например, система Actor Pilgrim.

Наиболее часто в качестве моделей СКВ используются частично упорядоченные множества, задаваемые набором $\{T, R\}$, где T – непустая совокупность моментов времени; R – бинарное темпоральное отношение типа «раньше, чем».

Модели могут содержать несколько темпоральных отношений. Выбирается структура времени, необходимая в конкретной ситуации:

- линейная LTL (*linear-time temporal logic*);
- ветвящаяся CTL (*computation tree logic*);
- пропозициональная PTL (*propositional temporal logic*).

Темпоральная логика линейного времени LTL

Темпоральная интервальная логика Аллена характеризуется достаточной выразительностью и наличием полиномиальных алгоритмов вывода, что позволяет ее практическое применение в интеллектуальных системах. Ниже приведены основные особенности темпоральной интервальной логики [25, 32].

1. *Временной интервал* X – это упорядоченная пара (X^-, X^+) , такая что, $X^- < X^+$, где X^- и X^+ рассматриваются как моменты времени, например – на вещественной оси.
2. *Интервальная интерпретация* или *I-интерпретация* – это функция, отображающая временной интервал на числовую ось при условии $X^- < X^+$.
3. Существует множество *базовых интервальных отношений* (множество *I-отношений*). Отношение между двумя интервалами может быть дизъюнкцией основных отношений для представления информации о неопределенности. Основные *I-отношения* между двумя интервалами приведены в ниже в табл. 1 [25].

Наборы таких отношений используются для составления списка дизъюнкций. Например, отношения $\{m, o, s\}$ между событиями A и B могут представлять собой дизъ-

Таблица 1. Множество базовых интервальных отношений**Table 1.** Set of basic interval relationships

Отношение и его инверсия Relationship and its inversion	Обозначения Symbol designations	Взаимное расположение интервалов Time segments relative position	Отношения между конечными точками Endpoint relationships
X before Y	b		$X^- < Y^-; X^- < Y^+;$
Y after X	bi		$X^+ < Y^-; X^+ < Y^+$
X meets Y	m		$X^- < Y^-; X^- < Y^+;$
Y met-by X	mi		$X^+ = Y^-; X^+ < Y^+$
X overlaps Y	o		$X^- < Y^-; X^- < Y^+;$
Y overlapped-by X	oi		$X^+ > Y^-; X^+ < Y^+$
X during Y	d		$X^- > Y^-; X^- < Y^+;$
Y includes X	di		$X^+ > Y^-; X^+ < Y^+$
X starts Y	s		$X^- = Y^-; X^- < Y^+;$
Y started-by X	si		$X^+ > Y^-; X^+ = Y^+$
X finishes Y	f		$X^- > Y^-; X^- < Y^+;$
Y finished-by X	fi		$X^+ > Y^-; X^+ = Y^+$
X equals Y	eq		$X^- = Y^-; X^- < Y^+;$
Y equals X	Eq		$X^+ > Y^-; X^+ = Y^+$

юнкцию $(A \text{ meets } B) \vee (A \text{ overlaps } B) \vee (A \text{ starts } B)$, или по-русски: $(A \text{ встречается с } B) \text{ ИЛИ } (A \text{ взаимно-перекрывается с } B) \text{ ИЛИ } (A \text{ начинается одновременно с } B)$.

Пусть I будет множеством всех тринадцати основных отношений, обозначенных ниже [32]:

$$I = \{b, bi, m, mi, o, oi, s, si, d, di, f, fi, eq\}.$$

Аллен [25] и его сторонники предложили, чтобы отношения между двумя событиями были любым подмножеством I .

Далее используем графические обозначения, где вершины представляют события, а направленные ребра помечены множествами базовых отношений. В качестве графического соглашения мы никогда не показываем ребра типа (r, r) , а если мы показываем ребро (i, j) , то мы не показываем ребро (j, i) . Любое ребро, для которого у нас нет явного знания об этом отношении, помечено I ; условно такие ребра также не показаны.

Построенный граф называется сеть с метками, множеством I интервальной алгебры, или графом временных ограничений IA -сети.

В темпоральных логиках есть два вида операторов: логические и модальные. Логические – это обычные $\{\neg, \vee, \wedge, \rightarrow, \equiv, \text{и др.}\}$ и операторы логических условий $\{if, then, is, \text{и т.д.}\}$. Основные модальные операторы, используемые в логике линейного времени LTL и логике ветвящегося времени CTL, и их определения показаны в табл. 2.

Вспомогательные модальные операторы:

1. Оператор эквивалентности **W**, записывающийся как **Weak until**: $fWg \equiv fUg \vee Gf$, что по-русски означает fWg эквивалентно fUg ИЛИ Gf .

2. Тожества двойственности (они подобны правилам де Моргана):

$$\phi U \psi = \neg(\neg\phi V \neg\psi);$$

$$\neg\Diamond\phi = \Box\neg\phi;$$

$$\neg A\phi = E\neg\phi.$$

Таблица 2¹. Модальные операторы темпоральной логики

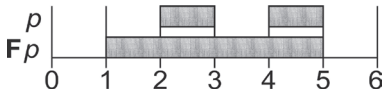
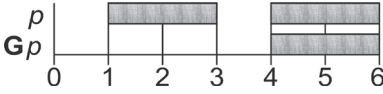
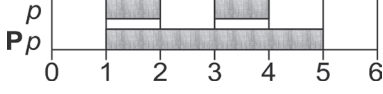
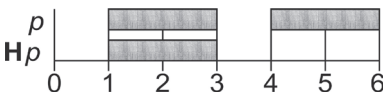
Table 2². Modal operators of temporal logic

Обозначение Designation		Определение и диаграмма Definition and diagram	Описание Explanation
Текстовое Textual	Символьное Symbolic		
Бинарные операторы Binary operators			

		$(\mathcal{BUC})(\phi) = (\exists i: C(\phi_i) \wedge (\forall j < i: \mathcal{B}(\phi_j)))$		Until (strong): ψ должно выполниться в некотором состоянии в будущем (возможно, в текущем), свойство ϕ обязано выполняться во всех состояниях до обозначенного (не включительно) Until: ψ holds at the current or a future position, and ϕ has to hold until that position. At that position ϕ does not have to hold any more
$\phi U \psi$	$\phi \mathcal{U} \psi$			
		$(\mathcal{BRC})(\phi) = (\forall i: C(\phi_i) \wedge (\exists j < i: \mathcal{B}(\phi_j)))$		Release: ϕ освобождает ψ, если ψ истинно, пока не наступит момент, когда ϕ первый раз станет истинно (или всегда, если такого момента не наступит). Иначе, ϕ должно хотя бы раз стать истинным, пока ψ не стало истинным первый раз Release: ϕ releases ψ if ψ is true up until and including the first position in which ϕ is true (or forever if such a position does not exist)
$\phi R \psi$	$\phi \mathcal{R} \psi$			
$\phi V \psi$	$\phi \mathcal{V} \psi$			

¹ Темпоральная логика. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Темпоральная_логика (дата обращения 01.06.2020).

² Temporal logic. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Temporal_logic (accessed 01.06.2020).

Унарные операторы Unary operators			
N ϕ	$\bigcirc \phi$	$\mathcal{N}(\mathcal{B})(\phi) = \mathcal{B}(\phi_{i+1})$	NeXt : ϕ должно быть истинным в состоянии, непосредственно следующим за данным NeXt : ϕ has to hold at the next state (X is used synonymously)
F ϕ	$\Diamond \phi$	$\mathcal{F}\mathcal{B}(\phi) = (\text{true} \cup \mathcal{B})(\phi)$ 	Future : ϕ должно стать истинным хотя бы в одном состоянии в будущем Future : ϕ eventually has to hold (somewhere on the subsequent path)
G ϕ	$\Box \phi$	$\mathcal{G}\mathcal{B}(\phi) = \neg \mathcal{F} \neg \mathcal{B}(\phi)$ 	Globally : ϕ должно быть истинно во всех будущих состояниях Globally : ϕ has to hold on the entire subsequent path
P ϕ	$\Diamond_n^k \phi$		Past : ϕ было истинным иногда в прошлом Past : ϕ was true sometimes in the past
H ϕ	$\blacksquare_n^k \phi$		History : ϕ всегда было истинным в прошлом History : ϕ has always been true in the past
A ϕ	$\mathcal{A} \phi$	$(\mathcal{A}\mathcal{B})(\psi) = (\forall \phi: \phi_0 = \psi \rightarrow \mathcal{B}(\phi))$	All : ϕ должно выполняться на всех ветвях, начинающихся с данной. All : ϕ has to hold on all paths starting from the current state
E ϕ	$\mathcal{E} \phi$	$(\mathcal{E}\mathcal{B})(\psi) = (\exists \phi: \phi_0 = \psi \wedge \mathcal{B}(\phi))$	Exists : существует хотя бы одна ветвь, на которой ϕ выполняется Exists : there is at least one branch on which ϕ is executed

Проблема логического вывода в темпоральной логике сводится к известной проблеме согласования (удовлетворения) ограничений (*constraint satisfaction problem*). Для решения этой проблемы построена темпоральная интервальная алгебра Аллена, позволявшая формализовать алгоритмы в терминах алгебраических операций. Многообразие алгоритмов решения задачи согласования ограничений и ее конкретизации в виде за-

дачи согласования временных ограничений позволяет построить темпоральную логику, способную решать задачи реальной размерности за приемлемое время [32]. Именно такая возможность является ключевым фактором для выбора интервальной логики Аллена в качестве основы системы представления темпоральных и причинно-следственных зависимостей.

Пример 2: План проекта «Конструирование башни из кубиков».

В этом учебном, шуточном и известном [32] примере показано, как сети *IA* могут использоваться в нелинейном планировании с одновременными действиями по реализации плана.

Задача: При планировании расстановки кубиков рассмотреть и проанализировать согласование временной информации с используемой сетью *IA*.

Есть три кубика: **A**, **B** и **C**. В исходном состоянии все они находятся на столе. Цель эксперимента – из кубиков построить «башню»:

«**A** поставить на **B**, и **B** поставить на **C**».

Решение: связываем состояния, действия и свойства с интервалами, которыми они обусловлены, и сразу можем предоставить какому-то юному «зрителю-клоуну» [25] следующую временную информацию:

Начальные условия: Целевые условия:

Initial {*d*} Clear(**A**) Goal {*d*} On(**A**, **B**)
Initial {*d*} Clear(**B**) Goal {*d*} On(**B**, **C**)
Initial {*d*} Clear(**C**)

Существует действие, которое называется *Stack* (стек – стопка, стекинг – англ. *stacking* – «укладка»). Эффект действия стекинга – это *On* (*x*, *y*):

«Кубик *x* находится сверху кубика *y*».

Первоначально для успешного стекинга должно соблюдаться выполнение условий *Clear* (*x*) и *Clear* (*y*): ни место *x*, ни место *y* не содержат кубик.

Проектное планирование предусматривает два действия по укладке кубиков и следующие временные ограничения:

Действия по укладке кубиков:

Stack(**A**, **B**) {*bi*, *mi*} Initial *Stack*(**B**, **C**) {*bi*, *mi*} Initial
Stack(**A**, **B**) {*d*} Clear(**A**) *Stack*(**B**, **C**) {*d*} Clear(**B**)
Stack(**A**, **B**) {*f*} Clear(**B**) *Stack*(**B**, **C**) {*f*} Clear(**C**)
Stack(**A**, **B**) {*m*} On(**A**, **B**) *Stack*(**B**, **C**) {*m*} On(**B**, **C**)

Все рассмотренные моменты времени *Initial*, *Clear*(**A**), *Clear*(**B**), *Clear*(**C**), *Goal*, *On*(**A**, **B**) *On*(**B**, **C**), *Stack*(**A**, **B**) и *Stack*(**B**, **C**) логически собираются в *IA*-сеть [32] (рис. 3) с учетом интервальных *I*-отношений и их дизъюнкций (см. табл. 1):

{*bi*, *mi*}, {*d*}, {*f*}, {*m*}.

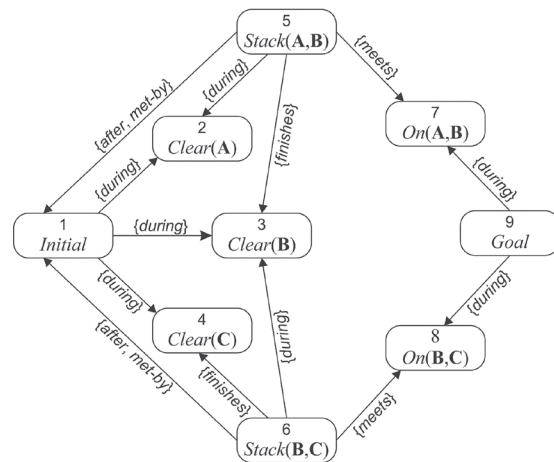


Рис. 3. Темпоральная *IA*-сеть плана проекта «Конструирование башни из кубиков»

Fig. 3. Temporal *IA*-network of the project plan "The tower of cubes construction"

В нашей *IA*-сети видны две базовые задачи (а) и (б):

(а) определить, является ли временная информация согласованной, и, если это так, то следует ли, что

(б) нужно найти один или несколько сценариев, которые совместимы с временной информацией.

Задача (а). Сеть *IA* является темпорально-согласованной только тогда, когда существует такое отображение *M* действительного интервала *M*(*u*) на оси времени для каждого события или вершины *u* в сети, при котором отношения между событиями удовлетворяются интервальными *I*-отношениями (т. е. выполняется хотя бы один из дизъюнктов).

Показанная на рис. 3 подсеть, составленная из событий *On*(**A**, **B**), *On*(**B**, **C**) и *Goal*, согласована, о чем свидетельствует, например, такое назначение «вручную» интервалов:

$M(On(A, B)) = [1, 5]$, $M(On(B, C)) = [2, 5]$ и $M(Goal) = [3, 4]$,

где в квадратных скобках обозначены моменты реального времени.

Если бы мы изменили подсеть и настаивали на том, что событие $On(A, B)$ должно свершиться до $On(B, C)$, то согласованности не было бы, и подсеть была бы и несогласованной, и несовместимой с основной сетью IA .

Задача (b). Нахождения хотя бы одного темпорально-согласованного сценария событий в IA -сети в рассматриваемом примере соответствует нахождению такого порядка действий, который позволяет достигнуть конечной цели объединения трех блоков в виде одной башни. Один такой согласованный сценарий реконструирован в виде качественного отображения n случайных событий на параллельных m осях времени $m \leq n$, ($n=9$, $m=6$) как показано на рис. 4.

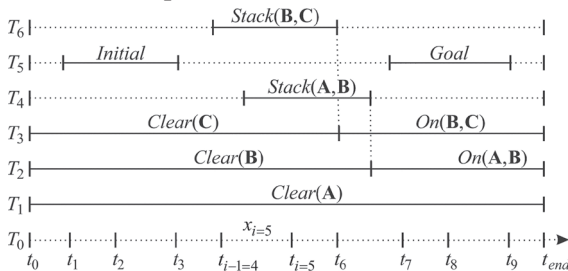


Рис. 4. Проявление логических взаимосвязей между временными интервалами происходящих событий, и формирование суперпозиции всего потока событий

Fig. 4. The manifestation of the logical relationships between the time intervals of occurring events, and the formation of a total events flow superposition

Итак, задачи примера 2 решены.

Замечание.

Может возникнуть желание пронаблюдать динамику событий в IA -сети в серии последовательных реализаций плана проекта «Конструирование башни из кубиков». Для этого есть две реальные возможности [2]: создать несложную модель на GPSS Word или в системе Actor Pilgrim.

1. В GPSS, начиная с GPSS-360, имеются средства для работы со списками событий пользователей. Создание имитационной модели для реализации IA -сети с помощью GPSS Word принципиальных сложностей не создает. Самая логически сложная часть gpss-модели – это создание списка пользователя для наблюдения за событиями в IA -сети.

2. В Actor Pilgrim внутренний механизм реализации таймера виртуального времени – это по сути работающая в динамике IA -сеть в любой pilgrim-модели. Агентная программа, даже простейшая, включаемая в модель, имеет доступ к временным параметрам любых событий в модели на уровне адресной арифметики (в моделирующей системе и в руководствах по системе всё для этого есть).

Далее нужно обратиться к опубликованым в [5] результатам. Есть некая аналогия с предварительным планированием инновационного проекта или проекта импортозамещения, когда вариантов реализации много, но они различаются по параметрам: стоимостным, временным, степенью привлечения или обучения высокоинтеллектуальных исполнителей, степенью реализации вспомогательных мероприятий, не освоенные ранее промышленностью страны.

Основные события проектировщикам известны, неизвестны только их детали и события во времени. В результате диаграмму сценария построить можно, и предварительные варианты проекта можно анализировать встраиванием предполагаемых событий в сценарий. Однако применять методы сетевого планирования и управления (*PERT*, *Program Evaluation Review Technique*) для получения критического пути или график Ганта (*Gantt chart*) для получения ответа на вопрос «Как скоро можно выполнить проект?» пока невозможно из-за отсутствия четких, хотя бы вероятностных исходных данных.

Понятно, что сценарий составляется практически в условиях неопределенности и риска. Однако, если существуют хоть какие-то рабочие соотношения, известные из стати-

стики или есть знания о проектах-прецедентах, то можно выдвинуть рабочие гипотезы о распределении времени совершения всех событий и выполнения всех работ на интервале $[t_0, t_{end}]$ (см. рис. 4).

В рассматриваемом выше примере известно только то, что должно произойти девять событий ($n = 9$), которые разнесены по *шести* временным осям ($m = 6$), причем моменты времени их свершения неизвестны, интервалы между событиями также неизвестны. Известны только некоторые ограничения, заданные интервальными *I*-отношениями (см. рис. 3). Последнее событие, которое должно произойти, это *Goal* – башня построена. Но этого достаточно, чтобы пользоваться *рабочей гипотезой* о распределении выполнения всей постройки башни. Одного вывода о распределении недостаточно, чтобы рассчитать математическое ожидание интервала времени, необходимого для постройки, но достаточно, чтобы выбрать функцию принадлежности времени строительства и в случае необходимости применить аппарат нечеткого логического вывода.

Гипотеза. Функцию принадлежности m планируемого интервала времени $[t_0, t_{end}]$ реализации проекта строительства башни можно аппроксимировать функцией Гаусса.

Доказательство гипотезы. Воспользуемся двумя предельными теоремами, результаты которых часто используются в гибридных моделях с элементами искусственного интеллекта [8].

1. *Предельная теорема для суперпозиции потоков событий* в процессах восстановления (см. [2, с. 96–97] и [23, с. 434–435]) утверждает сходимость суммы независимых, ординарных, стационарных m потоков к простейшему потоку с интенсивностью

$$\Lambda = \sum_{j=1}^m \lambda_j,$$

где λ_j – интенсивности суммируемых m потоков; $m = 6$ (см. рис. 4).

На практике часто возникают потоки в результате сложения не строго независи-

мых, а слабо зависимых потоков событий. Исследования, проведенные методом статистических испытаний, показывают, что и в этом случае (при достаточном числе слагаемых) суммарный поток также оказывается близок к простейшему.

И действительно, в *I*-сети на рис. 4 имеются пары «тесно» последовательных событий, между которыми установлены отношения *meets*, *finishes*, *met-by*. Но такие пары могут быть только «слабо зависимыми» или независимыми.

Во-первых, «соседство» событий в каждой паре совсем не обязательно происходит сразу – в одно мгновение сразу после другого, если они даже имеют последовательные номера типа $(i, i-1)$.

Во-вторых, пары не обязательно имеют последовательные номера, поскольку между ними могут «вклиниваться» события с других временных осей $j \in [1, m]$, не нарушая темпоральной согласованности.

Поэтому зависимости слабые, и можно утверждать, что все интервалы распределены по закону, близкому к экспоненциальному.

2. Классическая центральная предельная теорема утверждает следующее (см. [2, с. 90–91] и [22, с. 249–250]). Пусть $\{x_i\}$, где $x_i = t_i - t_{i-1}$, – последовательность взаимно независимых случайных величин с одинаковыми распределениями, с математическим ожиданием α и дисперсией β . Тогда сумма n независимых одинаково распределенных случайных величин (см. рис. 4)

$$X = \sum_{i=1}^{end} x_i$$

имеет распределение, близкое к нормальному закону, с математическим ожиданием $a = n \cdot \alpha$ и дисперсией $d = n \cdot \beta$, причем распределение становится строго нормальным при $n \rightarrow \infty$ (у нас $n = 9$).

Нормальное распределение симметрично относительно математического ожидания и имеет среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{n \cdot \beta}.$$

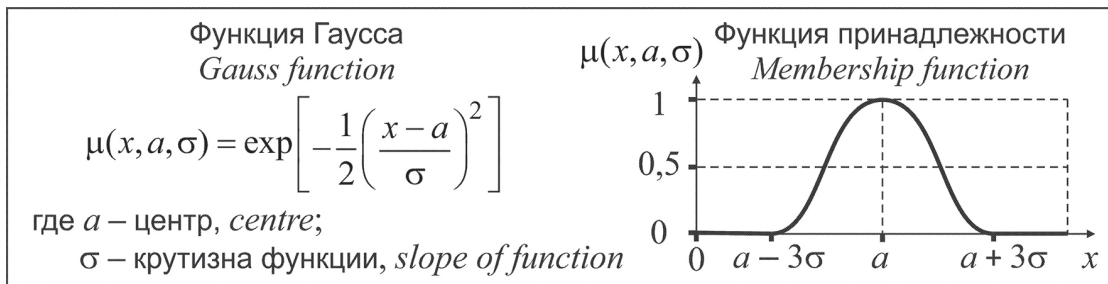


Рис. 5. Применение нормализованной функции Гаусса в качестве функции принадлежности $\mu(x, a, \sigma)$ планируемого интервала времени

Fig. 5. Application of the normalized Gauss function as a membership function $\mu(x, a, \sigma)$ of the planned time interval

Плотность нормального распределения задается функцией Гаусса $g(x)$ с множителем, не равным единице:

$$g(x) = (\sigma\sqrt{2\pi})^{-1} \exp\left\{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right\}.$$

Нормальное распределение симметрично относительно математического ожидания $M(x) = a$ и имеет дисперсию $D(x) = \sigma^2$. Соответственно, среднеквадратичное отклонение равно σ . Поскольку условия вышеуказанных теорем практически выполняются, в соответствии с изложенным в качестве искомой функции принадлежности $\mu(x, a, \sigma)$ выбирается нормализованная функция Гаусса с единичным множителем (рис. 5).

Результат: применимость гипотезы можно считать доказанной, но параметры функции принадлежности a и σ пока не определены.

Замечание: рассмотренный выше шуточный пример – элементарный. В реальных, и даже в не очень сложных проектах число параллельных осей m и число событий n существенно больше, что усиливает полученный результат.

Темпоральная логика ветвящегося времени СТЛ

Решение сложных задач прогнозирования в реальном времени требует рассматривать время как ветвящееся в будущем.

В таких случаях следующие модальные операторы интерпретируются так (см. табл. 2):

$\Box\phi$ – « ϕ должно быть истинно во всех будущих состояниях»;

$\Diamond\phi$ – « ϕ должно стать истинным хотя бы в одном состоянии в будущем».

Другими словами, $\Box p$ истинно в момент времени t , тогда и только тогда, когда p истинно при всех t' на всякой ветви времени, выходящей из t , а $\Diamond p$ истинно при всех t , тогда и только тогда, когда p истинно при некотором t' хотя бы на одной ветви, выходящей из t .

Модели логики ветвящегося времени могут быть полезны двух случаях:

- 1) прогнозирование последствий принимаемых решений на несколько шагов вперед;
- 2) анализ развития какой-то не обязательно удачной ситуации в условиях дефицита времени, т. е. в реальном времени развития событий [9, 27].

Пропозициональная темпоральная логика PTL является модальной темпоральной логикой, построенной на основе классической логики с добавленными модальными операторами для дискретного линейного времени [27]. В целом ее можно рассматривать как некое расширение логики Аллена. Для описания временных зависимостей используют простые и сложные темпоральные высказывания. При этом предполагается, что, если время «в прошлом ограничено», то оно имеет начало. В этом случае, например,

если в модели рассматривается текущий момент времени n , то время имеет конечный отсчет «в прошлое» на интервале $[n-1, n-2, \dots, k+1, k]$, состоящем из составляющих базовых интервалов времени τ , а «прошлое» имеет смысл на протяжении отрезка времени

$$\tau_n^k = \tau(n-k).$$

Простое темпоральное высказывание формируется применением к источнику риска одного из унарных темпоральных операторов прошлого времени пропозициональной темпоральной логики [27] (см. табл. 2):

◆ ϕ – « ϕ должно быть истинно иногда в прошлом»;

■ ϕ – « ϕ должно быть истинно всегда в прошлом»;

◆ ϕ_n^k – « ϕ должно быть истинно иногда в прошлом на интервале»;

■ ϕ_n^k – « ϕ должно быть истинно всегда в прошлом на интервале».

Пример 3. Проект установки дизель-генератора в полевых условиях. Рассмотрим применение PTL на конкретном примере управления риском. Данный пример – учебный, из практики специалистов по безопасности в электроэнергетике [10, 15].

Задача: в данном примере необходимо оценить риск устанавливаемого серийного дизель-генератора для работы в полевых условиях (например, на предприятии АПК), где существуют различные источники риска, которые, как правило, распределяются на «человеческий фактор», внутренние и внешние.

В общем случае, на основе опроса экспертов или с помощью ведомственного справочника составляется перечень *источников риска* для каждого из компонентов системы:

«Человек (Ч) – Электроустановка (ЭУ) – Среда (С)».

Их можно использовать для оценки рисков разных классов опасности (например, пожар в электроустановке, авария, электро-травма и др.).

Краткие описания источников риска представляют собой лингвистические переменные в базе знаний. В [10] рассмотрены следующие источники:

X_i – источники риска, связанные с человеком;

Y_j – источники, связанные с электро-агрегатом;

Z_k – связанные с внешней рабочей средой;

Al – связанные с законодательно-нормативной средой;

Bm – связанные с макроэкономической средой;

Cn – связанные с инновационной средой.

Для каждого источника формируют обозначение и смысловое описание (наименование), задают его долю (вес) в совокупности причин возникновения риска и термножество лингвистических значений.

Для каждого источника формируют обозначение и смысловое описание (наименование), задают его долю (вес) в совокупности причин возникновения риска и термножество лингвистических значений.

Нами в эксперименте использована база знаний [10], которую разработал А. Ф. Калинин (г. Улан-Удэ), с включенным ведомственным перечнем источников риска. Исходные данные для этого рассматриваемого наглядного примера содержатся в работе Калинина [10]. Позднее, в [15] другим научным коллективом была использована эта же база знаний, что дает возможность сопоставить результаты разных авторов. В табл. 3 сделана выборка из базы знаний [10].

В сложном темпоральном высказывании простые высказывания связываются между собой I -отношениями (см. табл. 1) или с использованием логической операции $\wedge_{\text{пр}}$ – «приоритетное И».

В логических схемах операция «приоритетное И» обозначается и расшифровывается так [27]: *выходное событие происходит в случае, если все входные события происходят на входах A, B, C в нужном темпорально-логическом порядке – «слева направо».*

Операция $\wedge_{\text{пр}}$ определяется формулой:

$$\wedge_{\text{пр}}(A, B, C) = A \wedge_{\text{пр}} B \wedge_{\text{пр}} C =$$

$$= (A \text{ before } B \text{ before } C) \vee (A \wedge B \wedge C), \quad (1)$$

Событие где A, B, C – простые темпоральные высказывания;

 $\wedge$ – логическая операция нечеткой конъюнкции И;
 before – интервальное отношение логики Аллена (см. табл. 1);
 $\vee$ – логическая операция нечеткой дизъюнкции ИЛИ;

$\wedge$ – логическая операция нечеткой конъюнкции И.

Далее рассмотрим и сопоставим два решения задачи в нашем примере.

Решение (а). Автор: А. Ф. Калинин [10, с. 185–187] (2015, г. Улан-Удэ).

Таблица 3. Источники риска аварии электроагрегата на производственном объекте (для примера 2)

Table 3. Sources of risk accident for an electrical unit at a production facility (for ex-ample 2)

Подсистема Sub-sys-tem	Источник риска Source of risk	Краткое описание источника риска (лингвистическая переменная) Brief description of the risk source (linguistic variable)	Вес источника риска Risk source weight	Индикатор опасности Danger indicator	Терм-множество лингвистических значений	Term-set of linguistic meanings
1	2	3	4	5	6	7
Человек (Ч) Man (H)	X_3	Соблюдение техники безопасности <i>Safety precautions</i>	0,036	1,36	Плохое Удовлетворительное Хорошее	<i>Bad</i> <i>Satisfactory</i> <i>Good</i>
	X_4	Уровень профессионализма <i>Professionalism level</i>	0,034	1,28	Низкий Средний Высокий	<i>Low</i> <i>Middle</i> <i>High</i>
	X_7	Ошибки в оперативных решениях <i>Errors in operational decisions</i>	0,022	0,08	Часто Периодически Редко	<i>Often</i> <i>Periodically</i> <i>Seldom</i>
Электроустановка (ЭУ) Elec-trical instal-lation (EI)	Y_1	Уровень опасности возникновения аварийных режимов <i>Danger level of emergency conditions</i>	0,093	3,01	Высокий Средний Низкий	<i>High</i> <i>Middle</i> <i>Low</i>
	Y_2	Степень износа изоляционных частей ЭУ <i>Wear degree of the EI insulating parts</i>	0,78	1,85	Высокая Средняя Низкая	<i>High</i> <i>Middle</i> <i>Low</i>
	Y_3	Срок эксплуатации ЭУ <i>EI service life</i>	0,072	1,72	Большой Средний Малый	<i>Big</i> <i>Middle</i> <i>Small</i>
	Y_6	Отказ (отсутствие) средств электрозащиты <i>Failure (absence) of electrical safety equipment</i>	0,045	1,06	Частое Периодическое Редкое	<i>Often</i> <i>Periodically</i> <i>Seldom</i>
Среда (С) Env-i-ron-ment (E)	Z_1	Уровень деструктивного воздействия микро-климата <i>The level of destructive effects of the microclimate</i>	0,055	2,62	Высокий Средний Низкий	<i>High</i> <i>Middle</i> <i>Low</i>
	Z_3	Диагностика технического состояния ЭУ <i>Diagnostics of EI technical condition</i>	0,042	2,00	Неудовлетворительная Эпизодическая Удовлетворительная	<i>Unsatisfactory</i> <i>Episodic</i> <i>Unsatisfactory</i>
	Z_4	Частота проявления источников риска <i>Occasion frequency of risk sources</i>	0,028	1,33	Часто Периодически Редко	<i>Often</i> <i>Periodically</i> <i>Seldom</i>
	Z_5	Состояние условий труда <i>State of working conditions</i>	0,002	0,09	Хорошее Удовлетворительное Неудовлетворительное	<i>Good</i> <i>Satisfactory</i> <i>Unsatisfactory</i>

Значения термов из терм-множеств лингвистических переменных – нечеткие числа, полученные на основе сформированных функций принадлежности (см. табл. 3). Экспертом выбираются источники риска и устанавливают причинно-следственные связи между ними, которые изображаются в виде ориентированного графа без циклов. Один из таких графов показан на рис. 6 [10].

Данное решение выполняется без применения алгоритмов нечетко-логического вывода и практически без применения темпоральной логики. С алгоритмической точки зрения, дерево решений на рис. 6 является схемой связи между «парами» источников риска. Связи ставятся в соответствие с операциями нечеткой и темпоральной логики, по определению имеющими вид:

«Приоритетное И»: $A \wedge_{\text{пр}} B = (A \text{ before } B) \vee (A \wedge B)$;
«И»: $\min(A, B)$; «ИЛИ»: $\max(A, B)$.

Для вычисления риска используется следующее логическое выражение:

$$\wedge(C, \exists Y, C) = \wedge \left\{ \vee(X_3, X_4, X_7), \wedge \left(\wedge_{\text{пр}}(Y_3, Y_2, Y_1), Y_6 \right) \wedge \wedge \left(\wedge_{\text{пр}}(Z_1, Z_3, Z_5), Z_4 \right) \right\}. \quad (2)$$

Формула (2) переписана в [10] с помощью операций нечеткой логики так:

$$\wedge(C, \exists Y, C) = \min \left\{ \max(X_3, X_4, X_7), \min \left(\min(Y_3, Y_2, Y_1), Y_6 \right), \min \left(\min(Z_1, Z_3, Z_5), Z_4 \right) \right\}. \quad (3)$$

Можно заметить, что в формуле 3 «Приоритетное И» при этом заменено просто на операцию «И» нечеткой логики. Такое «упрощение» в данном случае к ошибке в расчетах не приводит (но только в данном случае).

Значения переменных X_p, Y_j, Z_k получаются с помощью табл. 3 и таблиц значений лингвистических переменных для соответствующих источников риска, которые задаются экспертно с помощью функции принадлежности. Например, для терм-множества X_3 такие значения можно задать как в табл. 4:

Таблица 4. Функция принадлежности лингвистической переменной X_3

Table 4. The membership function of a linguistic variable X_3

Элемент терм-множества для X_3 из табл. 3 The term set element for X_3 from table. 3	Численное значение Numerical value
Плохое, <i>Bad</i>	0,9
Удовлетворительное, <i>Satisfactory</i>	0,5
Хорошее, <i>Good</i>	0,1

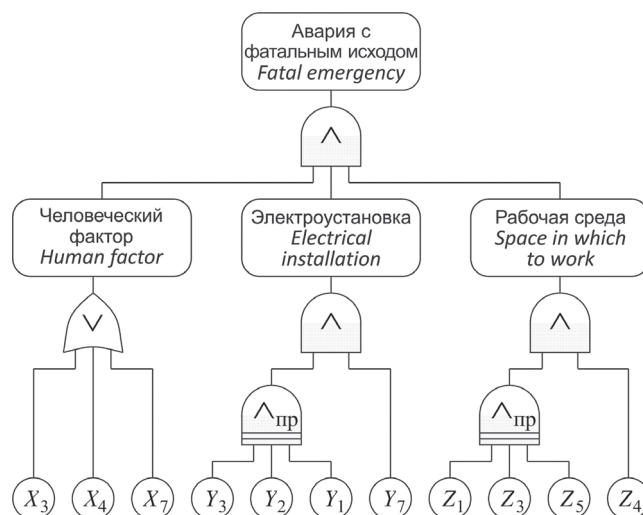


Рис. 6. Дерево риска аварийной ситуации в электроопасном объекте

Fig. 6. An emergency risk tree in an electric dangerous facility

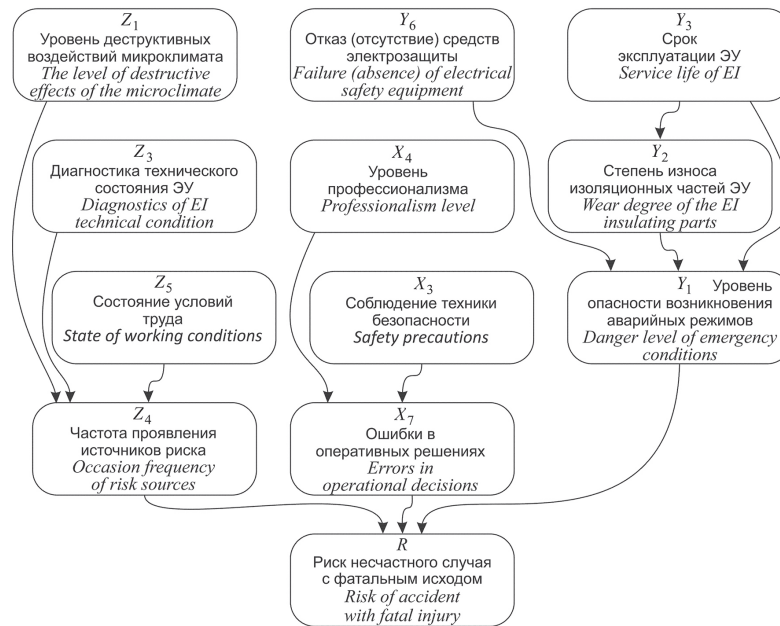


Рис. 7. Причинно-следственные связи между источниками риска несчастного случая с фатальным исходом в результате аварии на электроустановке

Fig. 7. Causal relationships between of risk sources accident with fatal outcome at an electrical installation

В табл. 3 экспертно выбрано значение «Удовлетворительное» = 0,5 (столбец 6). Это значение умножается на «Вес» = 0,036 (столбец 4).

Результат: $X_3 = 0,018$.

В итоге с помощью формулы (2) получается значение уровня риска для системы «Человек (Ч) – Электроустановка (ЭУ) – Среда (С)».

$$R(Ч, ЭУ, С) = \min(0,018; 0,036; 0,001) = 10^{-3}. \quad (4)$$

Такая величина риска с фатальным исходом – «на грани допустимого» (более чем одно событие за три года). Естественно, требуются дополнительные мероприятия по обеспечению электробезопасности на объекте.

Решение (b). Авторы: О.К. Никольский, А.Н. Тушев, Л.Ю. Качесова [15] (2017, г. Барнаул). Применяется темпоральная логика PTL. Логическая схема (типа рис. 6) авторами [15] не показана. Поэтому на рис. 7 изображена только приблизительная схема причинно-следственных связей.

Авторы [15] используют ту же базу зна-

ний [10], в том числе табл. 3. Ниже рассмотрены два варианта *решения (b)*.

Вариант 1. Выполнена оценка уровня риска с помощью нечеткой логики:

$$R_{B1}(Ч, ЭУ, С) = \min(0,0023; 0,038; 0,0021) = 2,1 \cdot 10^{-3}. \quad (5)$$

По сути значения (4) и (5) разные, т.к. причинно-следственные связи на рис. 6 и рис. 7 интерпретируются неодинаково. Однако результаты имеют одинаковый порядок – «на грани допустимого».

Вариант 2. Выполнена оценка уровня риска с помощью темпоральной логики PTL. С помощью аппарата PTL могут быть вычислены риски от источников-компонентов системы «Ч-ЭУ-С»:

$$\left\{ \begin{array}{ll} ((\blacksquare X_4 \wedge_{\text{пр}} \blacksquare X_3) \wedge_{\text{пр}} X_7) & \text{– Человек,} \\ ((\blacklozenge Y_6 \wedge_{\text{пр}} \blacksquare Y_2 \text{ before } \blacksquare_n^k Y_3) \wedge_{\text{пр}} Y_1) & \text{– Электроустановка,} \\ ((\blacksquare Z_1 \wedge_{\text{пр}} \blacksquare Z_3 \wedge_{\text{пр}} \blacksquare Z_5) \wedge_{\text{пр}} Z_4) & \text{– Среда.} \end{array} \right. \quad (6)$$

Авторы [15] применили алгоритм нечет-

ко-логического вывода Мамдани – по сути гибридную схему в связи с использованием выражений (6) в составе правил логического вывода. Основная сложность при этом заключается в выборе функций принадлежности для работы с операторами «в прошлом на интервале» типа $\blacklozenge_n^k\phi$, $\blacksquare_n^k\phi$. Если, например, рассматривается интервал длиной $t_n^k = \tau(n-k)$, где $\tau = 1$, то на 5-летнем периоде какие-то функции принадлежности могут иметь разные значения, изменяясь хотя бы по простейшему линейному закону. В итоге был получен следующий результат:

$$R_{B_2}(Ч, ЭУ, С) = \min(0,018; 0,026; 0,001) = 10^{-3}. \quad (7)$$

Опять результат имеет порядок «на грани допустимого». Однако по какой-то странной случайности результаты (7) и (4) практически совпали, чего не должно было быть, т. к. алгоритмы и периоды времени разные.

Итак, задачи примера 3 решены.

В результате обнаружен парадокс: при наличии одних и тех же численных исходных данных наблюдается значительное несовпадение результатов разных авторов там, где они должны быть очень похожими, и значительное совпадение там, где этого не ожидалось. Такой разброс результатов объяснить в данном случае сложно, но можно. Единственное логическое объяснение этого парадокса заключается в следующем:

1. Дерево причинно-следственных связей обычно строится при расследовании аварий или несчастных случаев – при поиске причин уже произошедших аварий или виновных. Дерево содержит только те сочетания источников риска, которые могут быть очевидными эксперту при расследовании, т. е. имеют причинно-следственные связи. Но таких деревьев можно построить не одно. В [10] и [15] деревья разные, но в каждом из двух случаев рассматривается только одно дерево – «свое», возможно по не вполне объективным причинам.

2. Однако при анализе и оценке возможностей риска, когда рисковое событие еще не произошло, следует учитывать не только возможные деревья причинно-следственных

связей, но и просто сочетания источников, которые совсем не связаны взаимным влиянием, но могут и совместно сосуществовать, и совместно проявляться. А это означает, что авторами [10] и [15] использована далеко не вся информация о причинах и источниках рискового события. Возможность получения более полной информации о причинах и источниках рисков при наличии базы знаний обсуждается в следующем разделе.

5. Информационное обеспечение моделей, используемых в управлении рисками импортозамещения

Разновидности проектов импортозамещения. Импортозамещение может проявляться в трех принципиально разных вариантах проектов:

А. Замена импорта на импорт из другой страны, которая не поддерживает санкции. В этом случае возможны какие-то предварительные экспертные выводы о рисках импортозамещения, хотя статистика о них небогатая [1].

В. Начало выпуска замещающей продукции в стране. Это типовой и наиболее желательный вариант, который не всегда может быть осуществлен.

С. Разработка новой системы, в состав которой входит этот продукт, если аналогичный продукт не может быть закуплен в третьей стране или произведен внутри страны. И, если эта система неработоспособна без такого продукта-компонента сложной выпускаемой системы, то следует прекращение выпуска систем освоенного типа и переход к началу выпуска другой системы. Последствия в таком случае могут быть весьма дорогими.

Пример 4. Решение задачи импортозамещения дизельных двигателей для выпускаемые серийно судов береговой охраны. Этот известный пример освещался в профильных СМИ – журналах и интернет-источниках. Экспертный анализ принимаемых решений и ошибок кратко рассма-



Рис. 8. Рубрикатор источников риска импортозамещения

Fig. 8. The rubricator of import substitution risk sources

тривался авторами в статье [5]. Сущность рассматриваемой ситуации заключалась в следующем.

Судостроительной промышленностью России несколько лет выпускался перспективный вариант малых судов береговой охраны проекта 22460 «Охотник». Эти суда являются кораблями мирного времени и используются для охраны побережья от контрабандистов, защиты биоресурсов акваторий и берегового шельфа от браконьеров, а также для борьбы с последствиями аварий и стихийных бедствий. Суда таких типов поставлялись в том числе и на экспорт: в Словению, во Вьетнам. Однако российские производители после 2014 г. подверглись санкциям со стороны ЕС. Для судов проекта 22460 главный двигатель марки MTU16V4000M73L (характеристики: 16 цилиндров, высокооборотный, мощность 2880 кВт, сборка из 4-х двигателей на одно судно) поставлялся на договорной основе германским концерном Friedrichshafen GmbH. Но поставки прекратились. Были задействованы все варианты – А, В, С. Для варианта А был выбран двигатель китайского производства CHD622V20CR – почти полный аналог MTU16V4000M73L. Однако при реализации вариантов А и В рискованные события «по факту» произошли.

Одна из причин: если пытаться применить методы, известные из [10, 15], то построить логичный вариант дерева причинно-следственных связей как на рис. 6 и рис. 7 нереально. В результате рискованных событий «по факту» пришлось пойти на значимые потери и выбрать на некоторое время вариант С [5].

Таковы итоги решения задачи примера 4.

Получение дополнительной информации для анализа возможных рисков.

В рассмотренном выше примере с проектом «Охотник» источников риска всего восемь, но последствия рискованных событий – чрезвычайно дорогие. Далее основное внимание уделим выявлению *дополнительной информации об источниках рисков* [5]. Для этого потребовался специальный рубрикатор (рис. 8).

Далее предлагается ожидаемый (интегральный) риск поставить в соответствие не перечню из восьми источников риска, а совокупности источников. Если кратко проанализировать источники риска на рис. 8, то можно понять, что комбинации источников «по два» вполне вероятны, и возможны даже комбинации «по три». И при этом даже не нужно выявлять причинно-следственных связей. Рассмотрим этот рубрикатор с позиций теории множеств и теории информации. Пойдем также на некоторые упрощения.

Каждый источник – это лингвистическая

переменная. Однако одновременно предположим, что источник – это одна интеллектуальная буква какой-то азбуки или алфавита $ABC(W)$, где $W = 8$ – это число букв в «алфавите». Суммарный объем информации этого набора букв, не смотря на их интеллектуальность, здесь невелик: $\log_2 W$ [24]. Далее будем использовать такие эффекты теории систем и системного анализа, как эмерджентность и синергия [4].

Источники рисков могут «срабатывать» в смысле создания рискованной ситуации как в отдельности, так и в сочетании. Но если они будут срабатывать в сочетании, то в зависимости от числа элементов в сочетании, в большей или меньшей мере будет проявляться свойство эмерджентности.

Эмерджентность или системный эффект – возникновение у сложной системы новых свойств за счет взаимодействия составляющих систему узлов или подсистем. Свойства системы не совпадают со свойствами ее составляющих подсистем. Одним из главнейших свойств является количество информации о системе в результате объединения составляющих подсистем. В том случае, если возникает принципиально новое качество или эффект, не присущий подсистемам, то говорят, что имеет место такой эффект как **синергия**.

Пример 5. Эффекты в РИНЦ (Elibrary). Любое печатное произведение (книга, научная статья), как в бумажном, так и в электронном виде, – это элементарная система с внутренними элементами (название, аннотация, оглавление, рубрики, библиографический список, язык – алфавит написания и др.) и с правилами их взаимного расположения и сочетаний. Все значимые в России печатные произведения регистрируются и размещаются в национальной электронной библиотечной системе Elibrary (РИНЦ). Однако количество всей информации в Elibrary больше суммарного количества информации по всем статьям, размещенным в этой библиотеке. Величина превышения – это

системный эффект, информация нового качества (публикационная активность журналов, импакт-факторы журналов, индексы Хирша авторов произведений, ядро РИНЦ и др.), которая получается в результате обработки сочетаний поступающей в систему информации – статей, книг, причем эта информация подвержена изменениям во времени, что тоже является новым качеством.

Вывод: в РИНЦ, как и в любой другой наукометрической базе данных, имеет место эффект синергии.

Сначала рассмотрим трехбуквенный алфавит $A = \{a, b, c\}$. Будем полагать, что любая комбинация букв из алфавита – буквосочетание без повтора букв в пределах этой комбинации – это возможное слово, которое несет информацию. Полное число таких возможных слов определяется множеством типа булеана.

Булеаном множества A [16] (в англ. лит. power set), называется множество всех подмножеств A , которое обычно обозначается стилизовано как $\mathcal{P}(A)$.

Мощность множества A – это число элементов множества. Мощность самого булеана определяется по мощности исходного множества формулой $W(\mathcal{P}(A)) = 2^W$. На рис. 9 показана структура булеана в виде полного графа всех сочетаний для простейшего случая: множество трехбуквенного алфавита $A = ABC \{a, b, c\}$ имеет мощность $W(A) = 3$, а мощность булеана $W(\mathcal{P}(A)) = 8$.

Общее число слов из соответствующего алфавита определяется как $W(\mathcal{P}(A)) - 1 = 2^3 - 1 = 7$, т. к. сочетание $\{\emptyset\}$ – нулевое подмножество, которое не является ни буквой, ни словом, и не несет информации. В результате вместо трехбуквенного алфавита получен «словарь» из семи слов.

Системный эффект объединения источников рисков. Сначала рассмотрим следующую ситуацию. Будем полагать, что имеем дело системами – рубриками источников риска. В результате объединения этих систем в один рубрикатор мощность объединенной

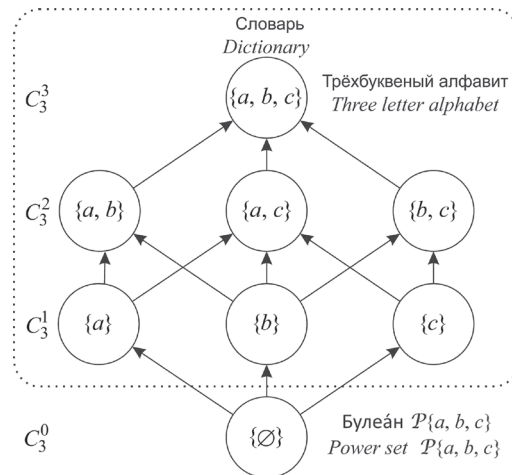


Рис. 9. Создание «Словаря» из трехбуквенной «азбуки» с использованием свойств множества типа «булеан»

Fig. 9. Creation of the “Dictionary” using three letter alphabet and “power set” properties

системы может превзойти сумму S мощностей объединения порождающих множеств на величину системного эффекта, возникающего за счет объединения систем. Возникает вопрос: насколько могло произойти увеличение мощности «из ниоткуда»? Ответ: «из ниоткуда» новые элементы могут появиться только как составные – сочетания из других элементов, если имеем дело с системами типа булеан. С точки зрения «материальности» такое объяснение не выдерживает критики: могут появиться только «виртуальные» составные элементы. Однако с применением теории информации Ральфа Хартли [24] можно показать, что в действительности системный эффект – это дополнительная информация, возникающая при объединении.

Согласно теории информации «по Хартли» количество информации, содержащейся в сообщении (или мера Хартли) – это логарифмическая мера:

$$I_{\text{inf}} = L \cdot \log_2 W, \text{ бит} \quad (8)$$

где I_{inf} – количество информации в сообщении в битах);

L – длина сообщения (количество символов или букв в сообщении);

W – количество символов в используемом алфавите (мощность алфавита).

Соответственно, из (8) следует, что количество информации, получаемой при идентификации буквы – элемента множества мощностью W при равновероятной встрече различных букв-элементов, равно:

$$I_{\text{inf}} = \log_2 W, \text{ бит.} \quad (9)$$

Применение коэффициента эмерджентности Хартли, теоретически отражающего величину системного эффекта, было предложено в [17]. Практически при работе с одним рубрикатором этот коэффициент имеет вид:

$$\mathfrak{Z} = \frac{\log_2 \sum_{e=1}^E C_W^e}{\log_2 W}, \quad (10)$$

где $\mathfrak{Z}$ – коэффициент эмерджентности Хартли (стилизованная буква I);

W – количество базовых неделимых элементов системы типа рубрикатор;

e – сложность составного элемента системы – количество базовых элементов рубрикатора (букв) в составном элементе (буквосочетании);

E – максимальная сложность подсистем, т.е. практически максимально допустимое количество базовых элементов в составном элементе;

C_W^e – комбинаторное число сочетаний из W элементов по e .

Непосредственно из вида коэффициента эмерджентности Хартли (8) ясно, что это безразмерный множитель, который представляет собой относительное превышение количества информации в системе при учете системных эффектов (смешанных состояний, иерархической структуры ее подсистем и т.п.) над количеством информации без учета системности, т. е. этот коэффициент качественно отражает некий уровень системности объекта. Коэффициент эмерджентности Хартли может изменяться в пределах $[\mathfrak{Z}_{\min}, \mathfrak{Z}_{\max}]$, где:

- а) системность минимальна или отсутствует, если $\mathfrak{Z} = \mathfrak{Z}_{\min} = 1$;
- б) системность максимальна, если $\mathfrak{Z} = \mathfrak{Z}_{\max}$ определяется по формуле (10).

Поскольку коэффициент эмерджентности Хартли в виде (10) множителя в математических расчетах используется нечасто, в квалиметрических обоснованиях его можно называть **индикатором эмерджентности** [5].

Фактически максимальная сложность подсистем E не может быть больше количества базовых элементов в системе W : $E \leq W$, т.к. самым сложным элементом системы может быть элемент, состоящий из всех базовых элементов. Будем считать, что в реальности всегда существуют правила запрета – ограничения на максимальное и/или минимальное число базовых элементов в составе составного или на некоторые сочетания базовых элементов в составном.

Если система образована на основе W базовых элементов, то в ней существует системное ограничение на сложность сочетаний: $E \leq W$:

- на 1-м (нижнем) булеана находятся сами базовые элементы, и этот уровень иерархии системы является тождественным порождающему множеству;
- на 2-м – составные элементы, образованные сочетаниями из W по 2;
- на последнем – сочетаниями из W по E .

$$I_{\text{inf}} = \log_2 \sum_{e=1}^E C_W^e, \text{ бит.}$$

В реальности может возникнуть необходимость одновременной работы с двумя рубрикаторами источников риска. В таком случае они сравнительно просто объединяются в один рубрикатор [5].

Пример 6. Системный эффект при работе с рубрикаторм источников риска импортозамещения. Риск проектов замещения ранее импортируемой продукции R продукцией из других источников, расположенных в стране или за рубежом, имеет много источников, функцией f которых он является:

$$R = f(S_1, S_2, \dots, S_W),$$

где W – общее количество включенных в рубрикатор источников рисков, имеющих отношение к конкретному проекту (следует отметить, что $W = 8$ для рубрикатора на рис. 8); S_1 – страновой риск замены импортера новым, продукция которого удовлетворяет всем требованиям, но который в свою очередь сам может оказаться под действиями введенных другим государством санкций; S_2 – страновой риск обнаружения неожиданных свойств продукции – это самый опасный риск несогласования режимов эксплуатации поставляемого оборудования, о возможности которого импортер-поставщик продукта-импортозамещения мог либо не знать, либо не отразил это в документации, причем предварительные испытания на предприятии импортера с представителем заказчика были успешны; S_3 – нехватка интеллектуального ресурса в стране, когда решено срочно начать выпуск импортозамещающей продукции; S_4 – нехватка финансовых или материальных ресурсов в стране; S_5 – нетехнологичность производства импортозамещения, которая может возникнуть из-за несовпадения особых технологий производства в стране и за рубежом, что может привести к значительным задержкам;

S_6 – выход из строя новой замещающей продукции; данная ситуация простая: продукт-импортозамещение, приобретенный у другого импортера или произведенный внутри страны-экспортера выходит из строя из-за поломки, и, как правило, надолго;

S_7 – ошибочный выбор варианта импортозамещения – замена импортера или производство импортозамещающей продукции внутри страны;

S_8 – невосполнимая потеря времени, возникает совместно с другими источниками риска. Например, на практике, при проектировании импортозамещения в примере 4 «не сработали» только два источника риска. А остальные проявились фактически без наличия сильных причинно-следственных связей.

Далее продолжаем работать с рис. 8. Проще всего анализировать риски, полагая, что если рисковое событие и произойдет, то оно имеет отношение к одному источнику из рубрикатора. Для простоты (и только) полагаем, что каждый источник – это базовый элемент рубрикатора. Однако с учетом фактора времени возможны ситуации, когда, рисковое событие по совокупности может быть проявлением сочетаний по 2 или 3 источника из рубрикатора. С помощью коэффициента эмерджентности Хартли по формуле (8) можно получить относительное превышение количества информации в рубрикаторе рисков импортозамещения при учете системных эффектов (смешанных состояний, иерархической структуры ее подсистем и т.п.) над количеством информации без учета системности, т.е. этот коэффициент отражает уровень системности объекта.

Задача: рассчитать значения коэффициента Хартли для рассматриваемого примера. Нам потребуется вспомогательная расчетная табл. 5 или программа, поскольку потребуется многократно вычислять число сочетаний $C_W^m = \frac{W!}{m!(W-m)!}$ и собственно ко-

$$\text{эффицент Хартли } \mathfrak{Z} = \frac{\log_2 \sum_{e=1}^E C_W^e}{\log_2 W}.$$

Таблица 5. Коэффициент эмерджентности Хартли (при мощности рубрикатора W и варьировании числа сочетаний источников риска от 1 до W)

Table 5. Hartley's emergence coefficient for the rubricator (with the number of elements W and with varying quantity of risk source combinations from 1 to W)

PCE_e Число сочетаний C_w^e при мощности рубрикатора Риска $W=8$ <i>The number of combinations C_w^e with the power of the risk sources rubricator $W=8$</i>	MCE_E $\sum_{k=1}^E C_W^e$ $\log_2 \sum_{k=1}^E C_W^e$	Коэффициент Хартли $\mathfrak{Z}$ при $\log_2 W=3$ Hartley's coefficient $\mathfrak{Z}$ with $\log_2 W=3$			
-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-
1	8	1	8	3,000	1,000
2	28	2	36	5,170	1,723
3	56	3	92	6,524	2,175
4	70	4	162	7,340	2,447
5	56	5	218	7,768	2,589
6	28	6	246	7,943	2,648
7	8	7	264	8,044	2,681
8	1	8	275	8,103	2,701

В табл. 5 использованы обозначения: PCE – (англ. *permissible complexity of a composite element*) допустимая сложность составного элемента C_W^e – число теоретически рассматриваемых сочетаний источников рисков, $e=\overline{1...8}$; MCE – (англ. *max-admissible element complexity*) максимально допустимая сложность элемента E – максимальное число источников рисков, которые теоретически могут совместно проявиться, $E=\overline{1...8}$, $e \leq E \leq W$.

Столбцы 4, 5 и 6 заполнены в предположении, что рубрикатор – это полный булеан $P(A)$, т.к. в этих столбцах максимально возможные теоретические значения. Однако существуют ограничения на допустимые сочетания, поэтому реальные значения в этих столбцах для $M = 3, 4, 5$ и 6 будут меньше, а для значения $M = 2$ все сочетания «по два» допустимы, а коэффициент Хартли $\mathfrak{Z}=1,723$. Это значение показывает, что информации

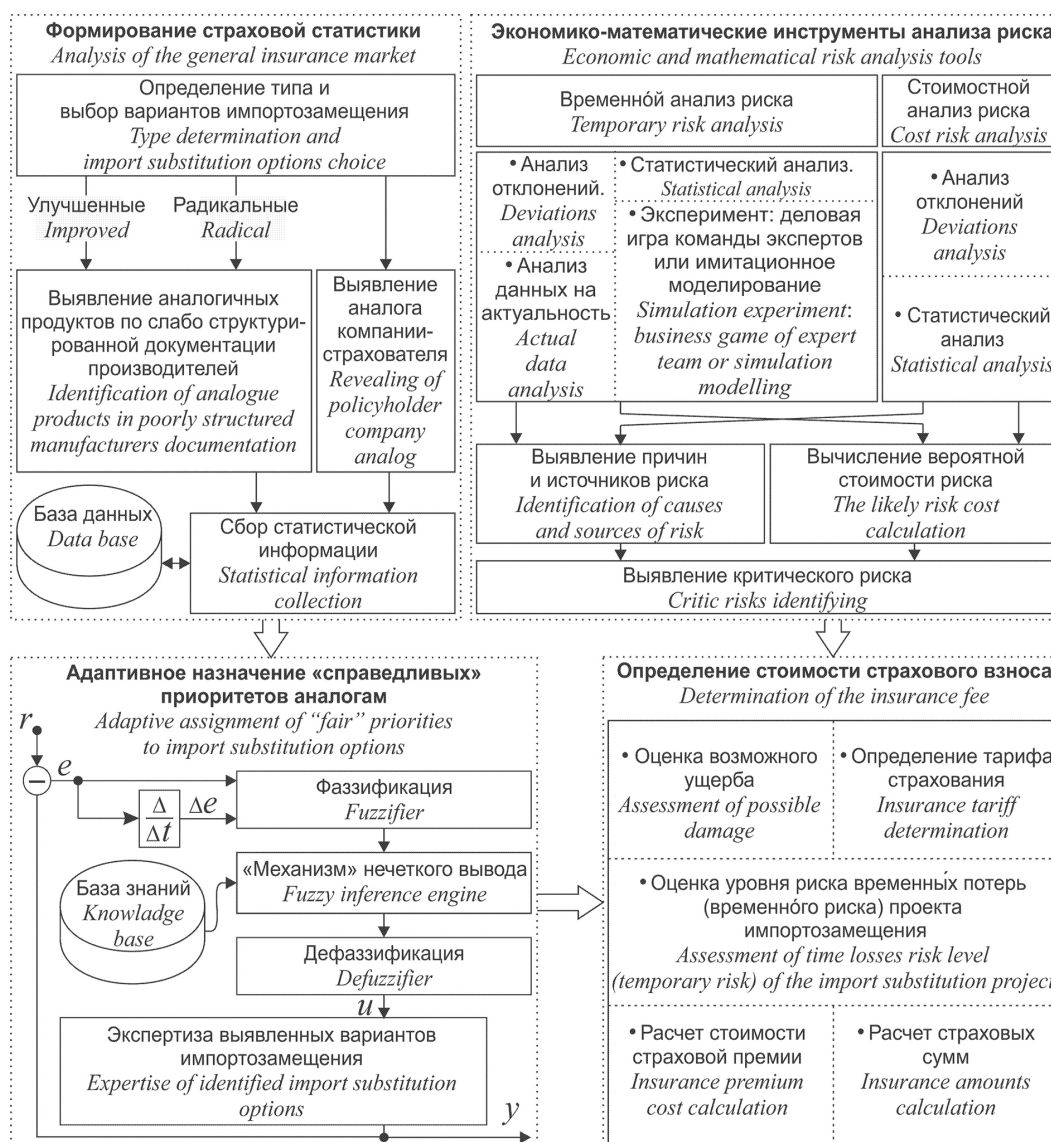


Рис. 10. Информационная система в управлении риском импортозамещения

Fig. 10. Information system in the risk management of import substitution

о рисках за счет системного эффекта объединения существенно превосходит сумму информации о допустимых частных рисках, и появившаяся синергетическая составляющая в 1,723 раза превышает эту суммарную информацию.

Но из этого следует вывод: если синергетическая информация превышает количество суммарной информации источников рисков, вошедших в анализируемую подси-

стему рисков в результате их сочетания, то и анализировать информацию о совокупном риске нужно совместно по этим частным рискам. И поскольку анализировать вероятности частных рисков без привлечения экспертов не рекомендуется из-за скудности статистических данных по рискам импортозамещения, то для совместного анализа в данном случае желательно использовать аппарат нечеткого логического вывода.

Рекомендация: иногда можно объединять рубрикаторы «Инновационный риск» и «Риск импортозамещения», где есть значимые составляющие и по инноватике, и по импортозамещению, если риск невосполнимой потери времени S_8 практически незначим в анализируемом проекте.

Информационная система поддержки страховых решений состоит из четырех модулей, которые выполняют анализ рисков, генерируют статистику страхования, рассчитывают премию за риск и определяют стоимость рисковой надбавки [5]. Общая структура информационной системы показана на рис. 10.

На начальном этапе функционирования информационной системы используется *модуль формирования страховой статистики*, который осуществляет подбор аналогов.

В этом случае сначала определяется тип замещения, поскольку его можно отнести к одному из двух типов: улучшенный или радикальный. И в зависимости от этого выполняется одна из процедур: либо формирование статистики страхования для улучшенных инноваций на основе выбора аналогичных инновационных продуктов, либо формирование статистики страхования радикальных инноваций на основе анализа аналогичных страховых организаций, обслуживающих такую инновацию или этого страхователя. Такие процедуры используют аппарат растущих пирамидальных сетей. Основная сложность при составлении страховой статистики заключается в том, что экспертам приходится иметь дело с разнородной, плохо структурированной информацией от разных производителей.

Выбранные аналоги, которых может быть довольно много, затем ранжируются путем назначения справедливых приоритетов. Эту функцию выполняет *модуль адаптивного назначения справедливых приоритетов аналогам*. Фактически этот модуль выполняет действия программы-контроллера, показанного на рис. 1. Контроллер назна-

чения справедливых приоритетов в некоторой степени похож на простой PD-нечеткий контроллер, поскольку он имеет дело не только с четкими переменными, которые подлежат фаззификации, но и со скоростью изменения некоторых переменных во времени.

Контроллер является агентной программой, причем возможны два варианта ее реализации.

1. В схеме его работы на рис. 1 и рис. 10 показана сильная обратная связь, благодаря которой можно реализовать алгоритм Мамдани [13]. Обратная связь нивелирует «огрехи» этого алгоритма в динамике.
2. Однако весьма возможны ситуации, когда обратная связь либо символическая (весьма слабая), либо отсутствует. В таком случае реализуется алгоритм нечетко-логического вывода Сугено [там же].

Что касается правил в базе знаний, то в обоих вариантах для реализации логики Аллена или пропозициональной темпоральной логики PTL применение пакета MatLab может стать невозможным из-за включения в правила логического вывода темпоральных логических выпадений, подобных (6) (см. табл. 2). Однако в настоящее время существуют несколько открытых пакетов прикладных программ в исходном виде (например, система программирования Са́шо Мага́рича¹), что снимает остроту проблемы программирования такого контроллера.

Модуль общего анализа страховых рисков предназначен для временного анализа рисков, анализа стоимостных рисков, выявления причин и источников риска, а также для расчета вероятной стоимости риска. Основное назначение этого модуля

¹ Madarić Sašo. C++ Fuzzy Logic API + Simple DSL // Code Project. 2012. No. 1. Slovenia: FERi Univerza v Mariboru. URL: <http://www.codeproject.com/Articles/316668/Cplusplus-Fuzzy-Logic-API-plus-Simple-DSL> (дата обращения 01.06.2020).
Magarich Sasho. C++ Fuzzy Logic API + Simple DSL // Code Project. 2012. No. 1. Slovenia: FERi University of Maribor. Available at: <http://www.codeproject.com/Articles/316668/Cplusplus-Fuzzy-Logic-API-plus-Simple-DSL> (accessed 01.06.2020).

– выявлять критичные риски. В будущем этот модуль должен использовать некоторые экспериментальные методы системного анализа, основанные на имитации: это либо *деловая игра команды экспертов*, либо *имитационное моделирование* с использованием специального программного обеспечения. Деловая игра – это организационно сложный эксперимент. Но он позволяет использовать методы системного анализа, такие как метод Дельфи, мозговой штурм, а также теорию полезности фон Неймана-Моргенштерна. Основная сложность заключается в подборе команды экспертов с хорошим коэффициентом конкуренции.

Модуль определения страхового возмещения выполняется с учетом нормативных правил страхового дела и страхового законодательства. Используются специальные правила страховых сделок и страхового учета [5].

Заключение

Вкратце о полученных выводах и результатах:

1. Экспресс-анализ практически любого эскизного проекта может быть выполнен с помощью операторов-действий аналогично проекту «Конструирование башни из кубиков» и представлен в виде темпоральной *IA*-сети.
2. Выявлен сильный системный эффект выполненного рубрицирования возможных сочетаний проявляющихся источников риска – как факторов совокупного риска, позволяющий принимать обоснованные решения в экспериментальном процессе гибридного имитационного моделирования для принятия решений в процессе проектного риск-менеджмента. В качестве индикатора эмерджентности ис-

пользован коэффициент эмерджентности Хартли.

3. Обоснована архитектура информационной системы поддержки принятия решений по предоставлению страховых услуг в инновационной сфере, учитывающая специфику как инновационных рисков, так и рисков импортозамещения. В результате создан информационно-моделирующий комплекс для расследования процессов импортозамещения и возникающих рисков, проверенный на конкретном примере.
4. Гибридные имитационные модели, использующие нечеткую и темпоральную логику и алгоритмы роевого интеллекта, включены в лабораторное обеспечение учебного процесса подготовки студентов по направлению «Прикладная информатика», профиль «Экономика и управление».

Список литературы

1. Бадалова А. Г. Риски импортозамещения: виды, проблемы оценки и особенности управления // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2017. № 7 (190). С. 47–57.
2. Булыгина О. В., Емельянов А. А., Емельянова Н. З. Имитационное моделирование в экономике и управлении / Под ред. А. А. Емельянова. М.: ИНФРА-М, 2019. – 592 с.
3. Булыгина О. В., Емельянов А. А., Емельянова Н. З. Назначение приоритетов в технологических хабах на основе имитационного моделирования и нечеткой логики // Прикладная информатика. 2017. Т. 12. № 5 (71). С. 71–92.
4. Булыгина О. В., Емельянов А. А., Емельянова Н. З., Кукушкин А. А. Системный анализ в управлении / Под ред. А. А. Емельянова; 2-е издание, перераб. и доп. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2017. – 450 с.
5. Булыгина О. В., Емельянов А. А., Росс Г. В., Яшин Е. С. Инвестиции, инновации, импортозамещение: имитационное моделирование с элементами искусственного интеллекта в управлении проектными рисками // Прикладная информатика. 2020. Т. 15. № 1 (85). С. 63–102. DOI: 10.24411/1993–8314–2020–10006.
6. Валькман Ю. Р. Моделирование НЕ-факторов – основа интеллектуализации компьютерных технологий // Новости искусственного интеллекта. 2004. № 2. С. 64–81.
7. Емельянов А. А., Булыгина О. В., Росс Г. В. Гибридное кибермоделирование в экономике: теория акторных сетей, симуляция, НЕ-факторы и сверхнечеткая логика // Прикладная информатика. 2018. Т. 13. № 6 (78). С. 78–90.
8. Емельянов А. А., Булыгина О. В., Халин В. Г. Экономико-имитационное моделирование с элементами искусственного интеллекта. М.: Неолит, 2018. – 160 с.
9. Еремеев А. П., Куриленко И. Е. Темпоральные модели на основе логики ветвящегося времени в интеллектуальных системах // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 1. С. 14–26.
10. Калинин А. Ф. Оценка и управление интегральным риском опасности электроустановок на предприятиях АПК в условиях неопределённости: дисс. ... канд. техн. наук. Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2015. – 198 с.
11. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 446 с.
12. Карпов Ю. Г. Темпоральные логики для спецификации свойств программных и аппаратных систем // Компьютерные инструменты в образовании. 2009. № 2. С. 45–56.
13. Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
14. Нариньяни А. С. НЕ-факторы: краткое введение // Новости искусственного интеллекта. 2004. № 2. С. 52–63.
15. Никольский О. К., Тушев А. Н., Качесова Л. Ю. Использование аппарата темпоральной логики для управления техногенными рисками в человеко-машинных системах // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31. № 3. С. 41–45.
16. Новиков Ф. А. Дискретная математика для программистов. СПб: Питер, 2009. – 384 с.
17. Орлов А. И., Луценко Е. В. Системная нечеткая интервальная математика. – Краснодар: КубГАУ. 2014. – 600 с.
18. Руководство к Своду знаний по управлению проектами (Руководство РМВОК). Шестое издание. Ньютаун Сквер, Пенсильвания: Институт управления проектами, 2017. – 762 с.
19. Рыбина Г. В. Приобретение знаний, содержащих НЕ-факторы // Новости искусственно-го интеллекта. 2004. № 2. С. 82–94.
20. Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. М.: Либроком, 2010. – 520 с.
21. Тарасов В. Б. Логико-семиотический подход к моделированию НЕ-факторов в теории агентов // Новости искусственного интеллекта. 2004. № 2. С. 95–114.
22. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 1. М.: Мир, 1967. – 498 с.
23. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 2. М.: Мир, 1968. – 752 с.
24. Хартли Р. В.-Л. Передача информации // Теория информации и ее приложения / Под ред. А. А. Харкевича. М.: Физматгиз, 1959. С. 5–35.
25. Allen J. F. Maintaining knowledge about temporal intervals // Communications of the ACM. 1983. Vol. 26. No. 11. P. 832–843.
26. Beynon M. DS/AHP method: A mathematical analysis, including an understanding of uncertainty // European Journal of Operational Research. 2002. No. 140. P. 148–164.
27. Huth M., Ryan M. Logic in computer science. Modelling and reasoning about systems. Cam-bridge: Cambridge University Press, 2004. – 438 p.
28. Emelyanov A. A., Bulygina O. V., Emelyanova N. Z. Complex swarm-simulation modeling of innovative projects promotion into the regions // 2018 IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), Moscow, Russia. IEEE Xplore, 2020, pp. 1–4. DOI: 10.1109/INFORINO.2018.8581762.

29. Emelyanov A. A., Bulygina O. V., Emelyanova N. Z., Yashin E. S. Simulation and fuzzy logic in import substitution risk management of high-tech equipment // 2020 V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), Moscow, Russia. IEEE Xplore, 2020, pp. 1–4. DOI: 10.1109/Inforino48376.2020.9111761.
30. Emelyanov A., Khalin V., Tukaev D., Morozov A. Decision-making by airport ground services by means of math-economic simulation and fuzzy logic // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13. No. 16. P. 6748–6753. DOI: 10.3923/IEASCI.2018.6748.6753.
31. Latour B. Reassembling the social: an introduction to actor network theory. Oxford: Oxford University Press Inc., 2005. – 302 p.
32. Van Beek P., Manchak D. W. The design and experimental analysis of algorithms for temporal reasoning // Journal of Artificial Intelligence Research. 1996. No 4. P. 1–18.

Сведения об авторах

Булугина Ольга Валентиновна, ORCID 0000-0001-6890-2842, канд.экон.наук, доцент, кафедра информационных технологий в экономике и управлении, Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске, Россия, baguzova_ov@mail.ru

Емельянов Александр Анатольевич, ORCID 0000-0001-8446-5937, докт.экон.наук, профессор, профессор кафедры безопасности и информационных технологий, Национальный исследовательский университета «МЭИ», г. Москва, Россия, appliedinformaticsjournal@gmail.com

Яшин Евгений Сергеевич, ORCID 0000-0001-5991-1974, соискатель уч. степени канд. экон. наук., преподаватель, кафедра информационных технологий в экономике и управлении, Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске, Россия, mite@smbpei.ru

Поддержка исследований

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-1534.2020.9 «Методы моделирования сложных систем с использованием нечетко-сетевых алгоритмов и речевого интеллекта»

Статья поступила 22.06.2020, рассмотрена 26.06.2020, принята 29.06.2020

References

1. Badalova A. G. *Riski importozameshcheniya: vidy, problemy otsenki i osobennosti upravleniya* [Risks of import substitution: types, problems of assessment and management features]. *Imushchestvennye otnosheniya v Rossiiskoi Federatsii*, 2017, no. 7(190), pp. 47-57 (in Russian)
2. Bulygina O. V., Emelyanov A. A., Emelyanova N. Z. *Imitatsionnoe modelirovanie v ekonomike i upravlenii*. Pod red. A. A. Emelyanova. [Simulation in economics and management. Edited by A. A. Emelyanov]. Moscow, INFRA-M Publ., 2019, 592 p.
3. Bulygina O., Emelyanov A., Emelyanova N. Assigning priorities in technological hubs using simulation and fuzzy logic. *Prikladnaya Informatika=Journal of Applied Informatics*, 2017, vol. 12, no. 5 (71), pp. 71-92 (in Russian)
4. Bulygina O. V., Emelyanov A. A., Emelyanova N. Z., Kukushkin A. A. *Sistemnyi analiz v up-ravlenii*. Pod red. A. A. Emelyanova. 2-e izdanie. [System analysis in management. Edited by A. A. Emelyanov. 2nd edition]. Moscow, FORUM: INFRA-M Publ., 2017, 450 p.
5. Bulygina O., Emelyanov A., Ross G., Yashin Y. Investments, innovations, import substitution: simulation with elements of artificial intelligence in project risk management. *Prikladnaya Informatika=Journal of Applied Informatics*, 2020, vol. 15, no.1 (85), pp. 68-102 (in Russian). DOI: 10.24411/1993-8314-2020-10006
6. Val'kman Yu. R. NON-factors modeling as the basis for intelligent technologies. *Novosti iskusstvennogo intellekta=Artificial intelligence news*, 2004, no. 2, pp. 64-81 (in Russian)
7. Emelyanov A., Bulygina O., Ross G. Hybrid cyber-modeling in economics: actor-network theory, simulation, NON-factors and super fuzzy logic. *Prikladnaya Informatika=Journal of Applied Informatics*, 2018, vol. 13, no. 6 (78), pp. 78-90 (in Russian)
8. Emelyanov A. A., Bulygina O. B., Khalin B. G. *Ekonomiko-imitatsionnoe modelirovanie s el-ementami iskusstvennogo intellekta*. [Economical-simulator modeling with elements of artificial intelligence]. Moscow, Neolit Publ., 2018, 160 p.
9. Eremeev A. P., Kurilenko I. E. *Temporal'nye modeli na osnove logiki vetvyashchegosya vremeni v intellektual'nykh sistemakh*. [Temporal models based on branching logic time in intelligent systems]. *Iskusstvenny intellekt i prinyatie resheniy=Artificial intelligence and decision-making*, 2011, no. 1, pp. 14-26 (in Russian)

10. Kalinin A. F. *Otsenka i upravlenie integral'nym riskom opasnosti elektroustanovok na predpriyatiyakh APK v usloviyakh neopredelennosti. Diss. cand. tekhn. nauk* [Assessment and management of the integrated risk of electrical installation hazards at agricultural enterprises in conditions of uncertainty. Dr. cand. sci. diss.]. Ulan-Ude, East Siberia State University of Technology and Management, 2015, 198 p.
11. Karpenko A. P. *Sovremennye algoritmy poiskovoi optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy*. [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature]. Moscow, Bauman University Publishing House, 2014, 446 p.
12. Karpov Yu. G. *Temporal'nye logiki dlya spetsifikatsii svoystv programmnykh i apparatnykh system*. [Temporal logic for specifying the properties of software and hardware systems]. *Komp'yuternyye instrumenty v obrazovanii*=Computer Tools in Education Journal, 2009, no. 2, pp.45-56 (in Russian)
13. Kruglov V., Dli M., Golunov R. *Nechetkaya logika i iskusstvennyye neironnyye seti*. [Fuzzy log-ic and artificial neural networks]. Moscow: Nauka-Fizmatlit Publ, 2001, 224 p.
14. Narin'yani A. S. Non-factors: a brief introduction. *Novosti iskusstvennogo intellekta*=Artificial intelligence news, 2004, no. 2. pp.52-63 (in Russian)
15. Nikolsky O. K., Tushev A. N., Kachesova L. Yu. *Ispol'zovanie apparata temporal'noi logiki dlya upravleniya tekhnogennymi riskami v cheloveko-mashinnykh sistemakh*. [Using of temporal logic instruments for control technogenic risk factors in human-machine systems]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2017, vol. 31, no. 3 (in Russian)
16. Novikov F. A. *Diskretnaya matematika dlya programmistov*. [Discrete mathematics for programmers]. St. Petersburg, Piter Publ., 2009, 384 p.
17. Orlov A. I., Lutsenko E. V. *Sistemnaya nechetkaya interval'naya matematika*. [Systemic fuzzy interval mathematics]. Krasnodar, KubGAU Publ., 2014, 600 p.
18. A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide). Sixth edition. New-town Square, Pennsylvania, Project Management Institute Inc., 2017, 762 p.
19. Rybina G. V. Acquiring knowledge marked by non-factors. *Novosti iskusstvennogo intellekta*=Artificial intelligence news, 2004, no. 2. pp.82-94.
20. Saaty T. *Elementy teorii massovogo obsluzhivaniya i ee prilozheniya*. [Elements of queuing theory and its applications]. Moscow, Librocom Publ., 2010. 520 p.
21. Tarasov V. B. Non-factors: from semiotic analysis to formalized techniques. *Novosti iskusstvennogo intellekta*=Artificial intelligence news, 2004, no. 2, pp.95-114 (in Russian)
22. Feller W. *Vvedenie v teoriyu veroyatnostei i ee prilozheniya. Tom 1*. [An introduction to probability theory and its applications. Volume 1]. Moscow, Mir Publ., 1967, 498 p.
23. Feller W. *Vvedenie v teoriyu veroyatnostei i ee prilozheniya. Tom 2*. [An introduction to probability theory and its applications. Volume 2]. Moscow, Mir Publ., 1968, 752 p.
24. Hartley R. W.-L. *Peredacha informatsii. Teoriya informatsii i ee prilozheniya. Pod red. A. A. Kharkevicha*. [Information transfer. Information theory and its applications, Edited by A. A. Kharkevich]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1959, pp.5-35
25. Allen J. F. Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM*, 1983, vol. 26, no. 11, pp.832-843
26. Beynon M. DS/AHP method: A mathematical analysis, including an understanding of uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 2002, no.140, pp.148-164
27. Huth M., Ryan M. *Logic in computer science. Modelling and reasoning about systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004, 438 p.
28. Emelyanov A. A., Bulygina O. V., Emelyanova N. Z. Complex swarm-simulation modeling of innovative projects promotion into the regions. 2018 IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), Moscow, Russia. IEEE Xplore, 2018, pp.1-4. DOI: 10.1109/INFORINO.2018.8581762
29. Emelyanov A. A., Bulygina O. V., Emelyanova N. Z. E. Yashin T. S. Simulation and fuzzy logic in import substitution risk management of high-tech equipment. 2020 V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), Moscow, Russia, IEEE Xplore, 2020, pp.1-4. DOI: 10.1109/Inforino48376.2020.9111761
30. Emelyanov A., Khalin V., Tukaev D., Morozov A. Decision-making by airport ground services by means of mathematical simulation and fuzzy logic. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, no. 16, pp.6748-6753. DOI: 10.3923/IEASCI.2018.6748.6753
31. Latour B. *Reassembling the social: an introduction to actor network theory*. Oxford, Oxford University Press Inc., 2005, 302 p.
32. Van Beek P., Manchak D. W. The design and experimental analysis of algorithms for temporal reasoning. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1996, no.4, pp.1-18

About the authors

Olga V. Bulygina, ORCID 0000-0001-6890-2842, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Information Technology in Economics and Management, The Branch of National Research University MPEI in Smolensk, Russia, baguzova_ov@mail.ru

Alexander A. Emelyanov, ORCID 0000-0001-8446-5937, Dr Sci. (Econ.), Professor, Security and Information Technology Department, National Research University MPEI, Moscow, Russia, appliedinformaticsjournal@gmail.com

Evgeny S. Yashin, ORCID 0000-0001-5991-1974, Applicant for Cand. Sci. (Econ.), Lecturer, Department of Information Technology in Economics and Management, The Branch of National Research University MPEI in Smolensk, Russia, mite@sbmpei.ru

Acknowledgments

The reported study was funded by the Grant of Russian Federation President MK-1534.2020.9 "Methods of modeling complex systems using fuzzy network algorithms and swarm intelligence"

Received 22.06.2020, reviewed 26.06.2020, accepted 29.06.2020