
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
И СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ**

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛА СОТРУДНИКА В КОМПАНИИ

Т. В. Азарнова, Л. А. Киреева

Воронежский государственный университет

Аннотация. Разработка информационных систем для оценки персонала является важной и сложной задачей. В статье представлена новая система, реализующая алгоритмы оценки потенциала сотрудников на основе компетентностных моделей и корреляционного анализа. Система оценивает важность компетенций с позиции соискателя и работодателя, и на основании анализа интеграции этих данных формулирует рекомендации. Основные компоненты системы включают инструментальные средства для тестирования, расчет и анализ показателей успешности, а также выработку рекомендаций по развитию персонала.

Ключевые слова: информационные системы, оценка персонала, компетенции, корреляционный анализ, управление персоналом, HRM (Human Resource Management), алгоритмы оценки, модели важности, профессиональная успешность, тестирование компетенций, развитие сотрудников.

Введение

Разработка информационных систем для оценки персонала представляет собой сложную актуальную задачу. На российском рынке существует несколько широко используемых оценочных систем [2]. Система Assessment Tools реализует ряд функций для проведения аттестации внутри компании. Система настраивается под три вида ролей: работник, HR-менеджер и руководитель, имеет возможность интеграции с корпоративными информационными системами и платформой дистанционного обучения eLearning Server. БОСС-Кадровик — информационно-аналитическая система, предназначенная для автоматизации бизнес-задач, связанных с управлением персоналом, его обучением, адаптацией, аттестацией, расчетом заработной платы и HR-аналитикой [4]. Пользователям доступны как классический учет кадров, так нововведения в области управления персоналом (HRM). Функция управления профилями позволяет автоматически отбирать сотрудников, используя при этом различные фильтры и разделение по рангам, что даёт возможность безошибочно определять среди соискателей именно тех, кто больше всего соответствует какой-либо позиции в компании и всем её требованиям. Система E-Staff от компании WebSoft предназначена для HR-служб компаний, осуществляющих подбор сотрудников, и для кадровых агентств. E-Staff — система полного цикла, автоматизирующая такие бизнес-процессы, как создание профилей должностей, ведение «библиотеки компетенций», планирование, проектирование и проведение различных процедур оценки персонала и корпоративного обучения. Частью системы является специализированный HR-портал, представляющий собой интернет-сайт, доступный всем сотрудникам кадрового сектора. S&AOnline — система консалтинговой группы BI TO BE. Эта система автоматизированной оценки персонала. Отличается от всех предлагаемых на Российском рынке своей гибкостью и кастомизацией. В ней представлены такие инструменты оценки, как управленческие опросники, психодиагностические методики, кейсы, интервью по компетенциям, биографические опросники. Кроме предоставления готового решения, компания в рамках рассматриваемой системы предлагает автоматизацию инструментов оценки заказчика, разработку инструментов оценки для конкретной компании с нуля и передачу полной системы S&AOnline для самостоятельного пользования [9].

Несмотря на широкий функционал описанных выше систем, актуальными являются инструментальные средства, расширяющие их аналитические и рекомендательные возможности [1]. В данной работе предложены алгоритмы оценки потенциала сотрудника или соискателя на вакантную должность в компании на основе: компетентностной модели должности, модели важности различных компетенций для рассматриваемой должности для работодателя и модели важности компетенций для рассматриваемой должности для соискателя. Разработанный алгоритм позволяет не только оценить потенциал респондента (соискателя, сотрудника), но и сформировать направления его развития. Алгоритм базируется на методах корреляционного анализа, определения «пикового» потенциала и формирования согласованных экспертных рекомендаций по повышению потенциала сотрудника.

1. Описание алгоритма оценки потенциала сотрудника в компании

Алгоритм содержит следующие укрупненные шаги:

Шаг 1. Проведение оценочных мероприятий (компетентностного тестирования) для формирования модели (модель 3) выраженности различных компетенций у соискателя.

Шаг 2. Построение моделей важности различных компетенций с позиции соискателя (модель 1) и работодателя (модель 2).

Шаг 3. Оценка потенциала соискателя на основе трех построенных моделей.

Шаг 4. Формирование рекомендаций относительно повышения потенциала оцениваемого сотрудника.

Шаг 5. Определение корневого потенциала и наиболее важных качеств для успешной деятельности.

Остановимся более подробно на реализации данных шагов алгоритма.

На первом этапе проводится компетентностное тестирование для формирования модели (модель 3) выраженности различных компетенций у соискателя [8]. В качестве примера набора компетенций в работе используется следующий набор: логическое мышление; аналитическое и концептуальное мышление; умение работать в команде; способность к самообучению; способность самоорганизации (тайм-менеджмент); коммуникативные навыки; стрессоустойчивость; креативность; самостоятельность в работе; умение управлять людьми [11]. Для выявления уровня выраженности данных компетенций у соискателя проводится тестирование по следующим тестам: тест на логическое мышление, тест на аналитическое и концептуальное мышление, тест на способность к самообучению, тест на коммуникативные навыки, тест на креативность, тест на самостоятельность в работе, тест на умение управлять людьми [10].

Результаты тестирования по всем тестам переводятся в 10-ти балльную шкалу умножением на весовой коэффициент:

$$\alpha = \frac{10}{\max x}, \quad (1)$$

где α — весовой коэффициент, $\max x$ — максимальное количество баллов в данном тесте. Результаты заносятся в табл. 1, как элементы модели R .

На втором этапе формируются две модели: модель W — важности компетенций для соискателя и модель I важности компетенций для работодателя. Модели заносятся в столбцы 3, 4, 5 табл. 1.

Вычисляется показатели профессиональной успешности в соответствии с моделями W и I :

$$P_w = \frac{\sum W_i \times R_i}{10 \sum W_i} \times 100 \% \quad (2)$$

$$P_I = \frac{\sum I_i \times R_i}{10 \sum I_i} \times 100 \% \quad (3)$$

Таблица 1

Основные модели алгоритма

№ критерия	Содержание критерия	Вес компетенции в модели W	Вес компетенции в модели I	Оценка компетенции R	Ранг R	Ранг W	Ранг I
1	логическое мышление	W_1	I_1	R_1			
2	аналитическое и концептуальное мышление	W_2	I_2	R_2			
3	умение работать в команде	W_3	I_3	R_3			
4	способность к самообучению	W_4	I_4	R_4			
5	способность самоорганизации (тайм-менеджмент)	W_5	I_5	R_5			
6	коммуникативные навыки	W_6	I_6	R_6			
7	стрессоустойчивость	W_7	I_7	R_7			
8	креативность	W_8	I_8	R_8			
9	самостоятельность в работе	W_9	I_9	R_9			
10	умение управлять людьми	W_{10}	I_{10}	R_{10}			
11	критерии от работодателя	W_{11}	I_{11}	R_{11}			

Величина P_W является обобщенной характеристикой успешности соискателя относительно важности компетенций со стороны работодателя, а величина P_I показывает успешность с позиции собственной оценки важности компетенций [3].

На этапе 3 оценивается согласованность моделей W, I, R . Для этого модели ранжируются (проранжированные модели заносятся в столбцы 6, 7, 8 таблицы 1) и вычисляются коэффициенты корреляции Спирмена r_s между моделями [7]:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d^2}{l(l^2 - 1)}, \quad (4)$$

где d — разности рангов; l — число пар рангов;

Корреляция r_{RW} между моделями R и W характеризует степень согласованности между видением важности различных компетенций соискателем и уровнем данных компетенций. Если $r_{RW} > 0,5$, то это указывает на достаточно сильное стремление соискателя соответствовать должности. Отрицательная корреляция означает, что сотрудник не стремится развивать качества, по его мнению, важные для должности.

Корреляция r_{RI} между моделями R и I характеризует степень согласованности между видением важности различных компетенций работодателя и уровнем данных компетенций у

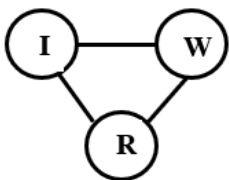
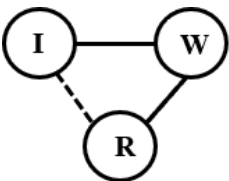
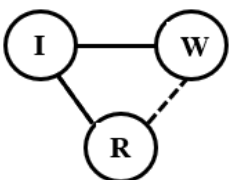
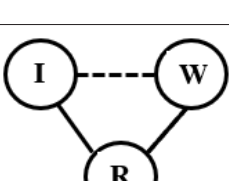
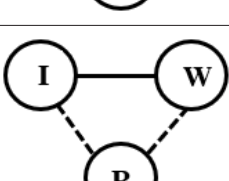
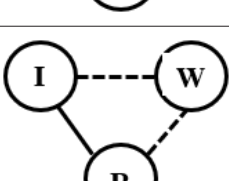
соискателя. Значение $r_{RI} > 0,5$ указывает на достаточно сильное соответствие компетентностной модели соискателя требованиям работодателя. Отрицательная корреляция означает, что сотруднику будет сложно подстроиться под требования компании.

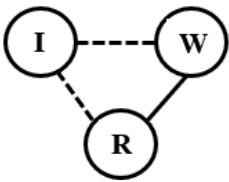
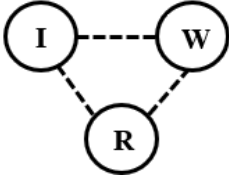
Корреляция r_{WI} отражает степень согласованности мнения работодателя и соискателя о важности различных компетенций. Значение $r_{WI} > 0,5$ говорит о высокой согласованности их приоритетов. Отрицательная корреляция означает, что сотруднику будет сложно подстроиться под требования компании.

Интерпретация коэффициентов корреляций r_{RW}, r_{RI}, r_{WI} , полученных на предыдущем шаге, осуществляется по следующим, разработанным в рамках исследования структурным схемам, приведенным в табл. 2.

Таблица 2

Интерпретация коэффициентов корреляции моделей

Номер модели	Модель	Интерпретация результатов
1	2	3
1		Все три модели достаточно согласованы, возможен синергетический эффект, работа сотрудника будет продуктивной для него и для компании.
2		Оценки важности компетенций у сотрудника и работодателя близки, но модель выраженности компетенций у соискателя слабо коррелирует с моделью важности их для работодателя. Необходимо развивать важные для компетентностной модели компетенции, чтобы повысить потенциал соискателя в компании.
3		Оценки важности компетенций у сотрудника и работодателя близки, но модель выраженности компетенций у соискателя слабо коррелирует с моделью важности их для работодателя. Соискатель не стремится соответствовать должности. Необходимо развивать важные для компетентностной модели компетенции, чтобы повысить потенциал соискателя в компании.
4		Модель выраженности различных компетенций хорошо согласована с моделями важности компетенций со стороны соискателя и работодателя, но есть несогласованность моделей важности между собой, что может приводить к разногласиям в деятельности.
5		Модели важности компетенций с позиции соискателя и работодателя хорошо согласованы, но модель выраженности компетенций у соискателя несогласована с ними. В перспективе после обучения повышения уровня компетенций, соискатель может успешно работать в компании.
6		Модель важности компетенций с позиции работодателя хорошо согласована с моделью выраженности компетенций у соискателя, но данные две модели несогласованы с моделью важности компетенций с позиции соискателя, это может быть скорректировано в процессе деятельности.

1	2	3
7		Модель важности компетенций с позиции соискателя хорошо согласована с моделью выраженности компетенций у соискателя, соискатель стремится соответствовать должности по тому как он ее видит, но данные две модели несогласованы с моделью важности компетенций с позиции работодателя, это может быть скорректировано в процессе деятельности.
8		Плохая согласованность всех трех моделей. Соискатель не имеет высокого потенциала в данной компании.

По каждой из моделей, в которых существует плохая согласованность каких-либо её компонентов, разрабатываются рекомендации по повышению согласованности. Такие рекомендации могут заключаться в прохождении курсов, тренингов, корпоративного обучения, освоении методик развития коммуникативных навыков. Рекомендации оцениваются группой экспертов. Каждый из экспертов выражает свое мнение о том, как изменится (в процентах) каждая компетенция в результате выполнения рекомендаций. Полученные значения для каждого эксперта ранжируются. Для оценки согласованности мнений экспертов используется коэффициент конкордации Кендалла [5]:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m x_i^{(k_j)} - \frac{m(n+1)}{2})^2}{\frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) - m \sum_{j=1}^m T^{(k_j)}}, \quad (5)$$

где поправочный коэффициент $T^{(k_j)}$ вычисляется по формуле:

$$T^k = \frac{1}{12} \sum_{t=1}^{m(k)} [(n_t^k)^3 - (n_t^k)], \quad (6)$$

где $m^{(k)}$ — число групп одинаковых рангов у эксперта $x^{(k)}$, а $n_t^{(k)}$ это число элементов, которые входят в t -ю группу одинаковых рангов. В частном случае, если все ранги различные, величина $T^{(k)} = 0$.

Если мнения всех экспертов согласованы, то вычисляются средние значения изменений компетенций по всей экспертной группе и еще раз проводятся корреляционный анализ согласованности моделей. Если же мнения экспертов не согласованы по коэффициенту конкордации Кендалла, то с помощью коэффициента корреляции Спирмена ищется согласованная подгруппа экспертов и вычисляются средние значения изменения компетенций по этой подгруппе.

На последнем шаге для расчета корневого потенциала личности, находятся наиболее значимые компетенции модели у соискателя.

Считается, что наиболее важные компетенции составят 20 % от общего количества компетенций, т.е. это компетенции ранг, которых в моделях не превышает 3.

Определим множество A компетенций в моделях W, I, R , ранги которых не превышают 3.

Возможны варианты:

1. $A = \emptyset$ — множество A пустое.

Вывод: потенциал соискателя не соответствует требованиям деятельности. Совместная деятельность не принесет успеха ни одной из сторон и, таким образом, нанимать работника на вакантную должность не целесообразно.

2. $A = \{a_1\}$ — множество A включает в себя лишь один элемент.

Вывод: потенциал соискателя будет сложно проявить и между соискателем и работодателем может возникнуть несогласие в рамках осуществления и последующего оценивания деятельности.

3. $A = \{a_1, a_2\}$ — множество A полностью определено.

Вывод: данного соискателя следует отнести к группе High Potential, его корневой потенциал может быть полностью реализован в компании на данной должности.

По предложенному алгоритму разработана информационная система, реализующая весь комплекс шагов [6]. На рис. 1 приведен фрагмент компетентностного тестирования и формирования модели выраженности различных компетенций у соискателей.

Статус	Компетенция	Результат
Завершено	1. Логическое мышление	7
Завершено	2. Аналитическое и концептуальное мышление	9
Завершено	3. Умение работать в команде	10
Завершено	4. Способность к самообучению	8
Завершено	5. Способность самоорганизации	9
Завершено	6. Коммуникативные навыки	8
Завершено	7. Стрессоустойчивость	7
Завершено	8. Креативность	8
Завершено	9. Самостоятельность в работе	8
Завершено	10. Умение управлять людьми	9

Рис. 1. Результаты компетентностного тестирования

На рис. 2 демонстрируется заполнение модели важности компетенций для соискателя.

Компетенция	Результат
1. Логическое мышление	9
2. Аналитическое и концептуальное мышление	8
3. Умение работать в команде	7
4. Способность к самообучению	8
5. Способность самоорганизации	9
6. Коммуникативные навыки	9
7. Стрессоустойчивость	8
8. Креативность	8
9. Самостоятельность к работе	9
10. Умение управлять людьми	7

Выбор сотрудника для проведения анализа: Аксенов Иван Васильевич 34678

Провести вычисления

Создать тест

Закрыть

Рис. 2. Модель важности компетенций для соискателя

На рис. 3 по результатам вычислений осуществляется прогноз профессиональной успешности [3].

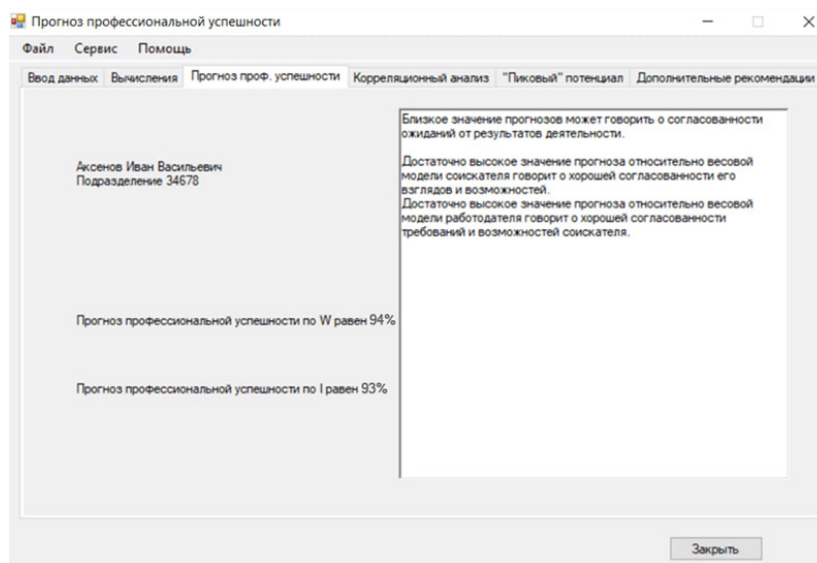


Рис. 3. Прогноз профессиональной успешности соискателя

Результаты корреляционного анализа представлены на рис. 4, 5.

Для данного сотрудника не требуется разработка рекомендаций и их оценка экспертами. Рассмотрим результаты еще одного кандидата на рис. 6, 7.

Для данного соискателя результаты неудовлетворительные, поэтому, ему предлагаются рекомендации и проводится экспертное оценивание изменений на рис. 8.

Эксперты оценивают изменение компетенций в результате реализации рекомендаций и на основании полученных усредненных значений еще раз оцениваются корреляции моделей на рис. 9.

Прогнозируются хорошие результаты согласованности моделей на рис. 10, 11.

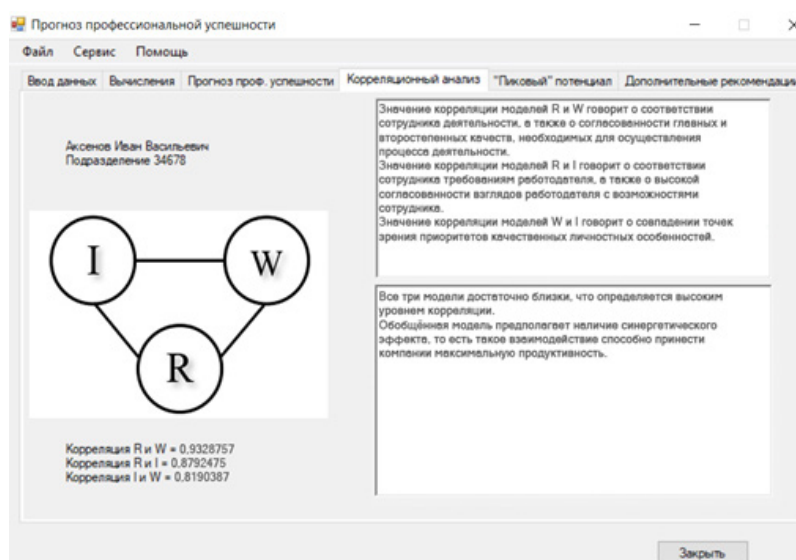


Рис. 4. Корреляционный анализ

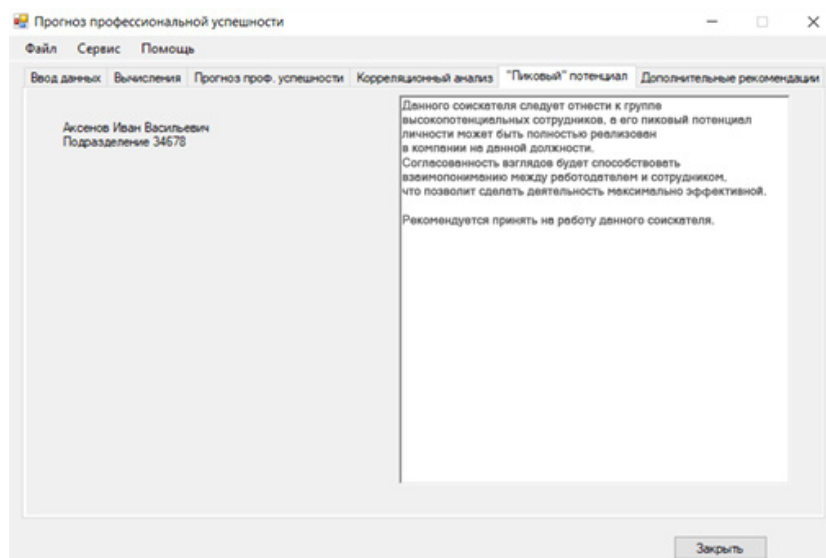


Рис. 5. Оценка потенциала сотрудника

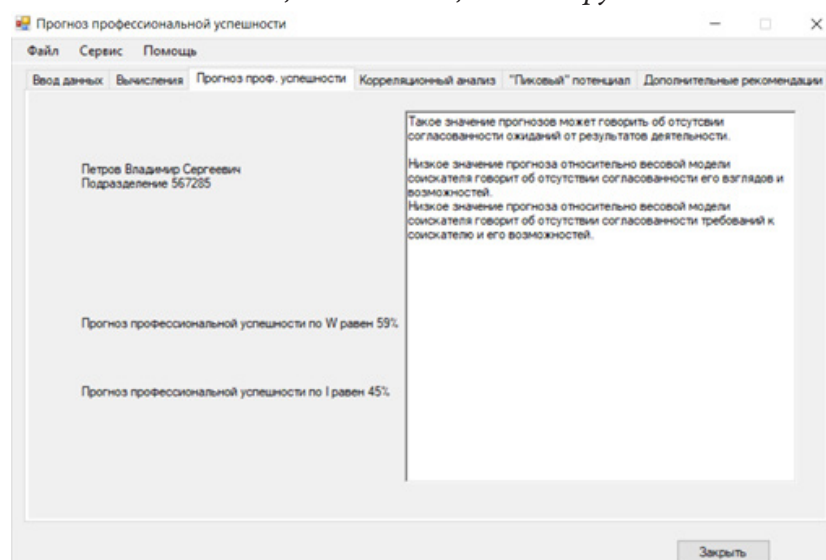


Рис. 6. Прогноз профессиональной успешности

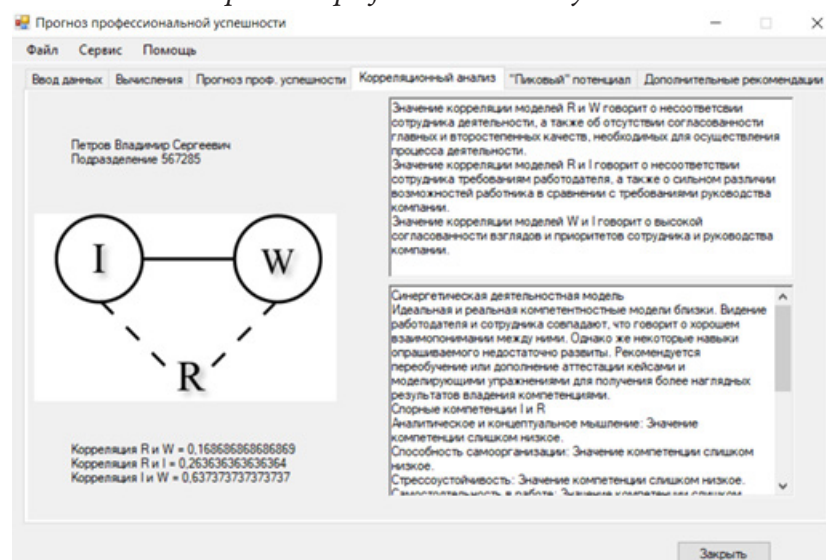


Рис. 7. Корреляционный анализ

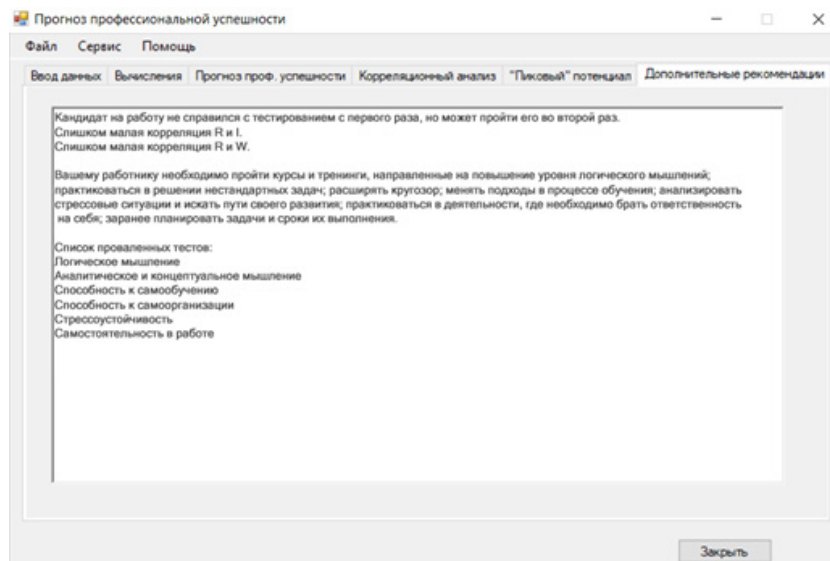


Рис. 8. Дополнительные рекомендации

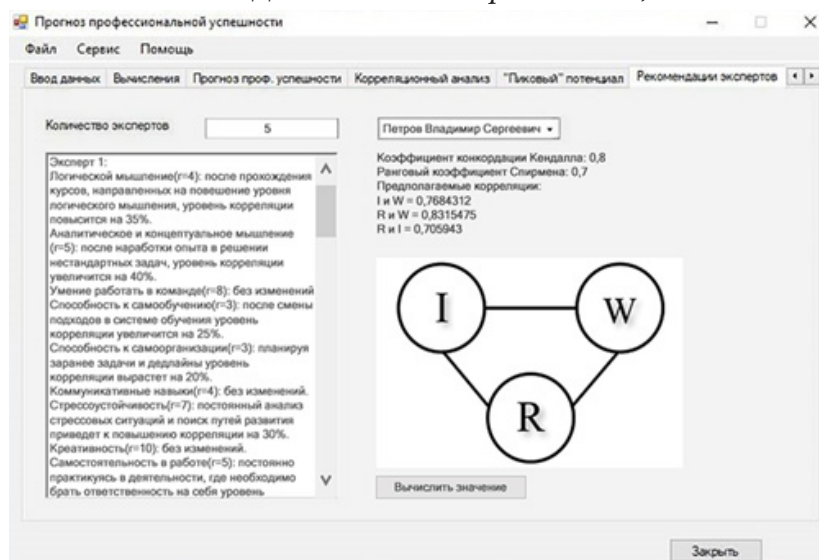


Рис. 9. Оценки изменения компетенций экспертами

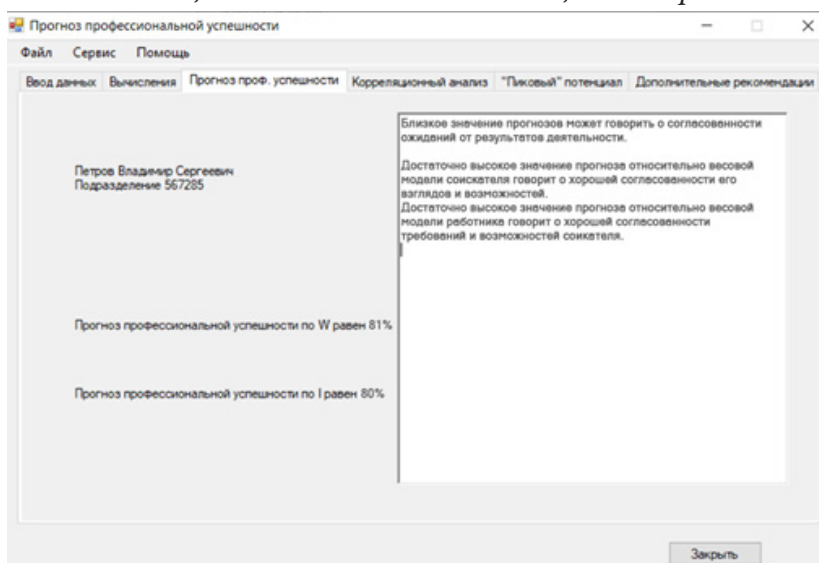


Рис. 10. Прогноз профессиональной успешности

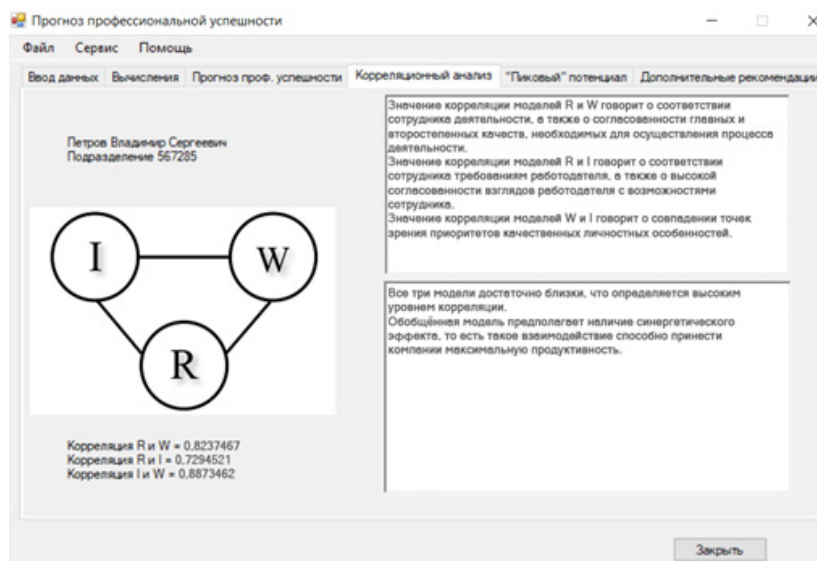


Рис. 11. Прогнозируемые значения корреляции моделей

Заключение

В статье описана информационная система, реализующая комплекс шагов по оценке потенциала сотрудника в компании. Предложенная система позволяет сформировать комплекс компетенций по определенной позиции в компании, провести оценочное тестирование по данным компетенциям, провести оценку важности компетенций с позиции соискателя и работодателя, провести корреляционный анализ между вектором оценок важности компетенций со стороны работодателя, вектором оценок важности компетенций со стороны соискателя и вектором оценок центра опросов для данного соискателя. На основе анализа корреляции между моделями делается вывод о потенциале сотрудника в компании и разрабатываются рекомендации по повышению согласованности моделей.

Литература

1. Базаров Т. Ю. Технология центров оценки персонала: процессы и результаты / Т. Ю. Базаров. – Москва : Кнорус, 2011. – 300 с.
2. Борисова Е. А. Оценка и аттестация персонала / Е. А. Борисова. – Санкт-Петербург: Питер, 2015. – 317 с.
3. Невраева И. В. Прогноз профессиональной успешности менеджера / И. В. Невраева // Вестник Томского государственного педагогического университета. Серия Естественные и точные науки. – 2005. – Вып. 7 (51). – С. 55–60.
4. Автоматизированные системы и решения для управления персоналом. – Режим доступа: <https://boss.ru/products/bk-about>. Дата обращения: 07.09.2024.
5. Аттестация персонала в режиме on-line: Assessment Tools. Система аттестации, оценки и развития персонала. Новые возможности для решения традиционных задач. – Режим доступа: <https://ra-kurs.spb.ru/info/articles/?id=27>. Дата обращения: 27.09.2024.
6. Комплексное решение в области подбора персонала. Программное обеспечение & Облачные сервисы. – Режим доступа: <https://www.e-staff.ru>. Дата обращения: 20.05.2021.
7. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена. – Режим доступа: <http://medstatistic.ru/theory/spirmen.html>. Дата обращения: 27.09.2024.

8. *Сажаева Г. А.* Компетентностный подход при отборе и найме человеческих ресурсов / Г. А. Сажаева, П. Л. Шестаков // Современные научные исследования и инновации. – 2017. – № 11. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2017/11/84691>. Дата обращения: 28.09.2024.
9. Система автоматизированной оценки персонала SURVEYS & ASSESSMENT ONLINE. – Режим доступа: <https://www.bitobe.ru/filedownload.php?file=7255>. Дата обращения: 25.09.2024.
10. Тестотека. – Режим доступа: <http://testoteka.narod.ru>. Дата обращения: 20.09.2024.
11. *Шипилов В. И.* Перечень навыков soft-skills и способы их развития / В. И. Шипилов. – Режим доступа: https://www.cfin.ru/management/people/dev_val/soft-skills.shtml. Дата обращения: 05.09.2024.

АДАПТИВНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ШЕСТИКОЛЁСНЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Ал-Хафаджи Исра М. Абдаламир, А. В. Панов

МИРЭА – Российский технологический университет

Аннотация. В данной работе предложена гибридная система навигации для шестиколёсных мобильных роботов, сочетающая алгоритм поиска путей A^* , методы глубокого обучения (CNN) для анализа поверхности и законы Беккера, описывающие взаимодействие с различными типами грунтов. Разработанная модель обеспечивает адаптивную навигацию в условиях сложного рельефа, включая глинистые участки, ямы, бетонные покрытия и холмы. Система продемонстрировала высокую точность классификации поверхности и устойчивость в динамично меняющихся условиях. Это исследование расширяет возможности мобильных роботов для автономного передвижения в сложных средах.

Ключевые слова: адаптивная навигация, мобильные роботы, алгоритм A^* , CNN, законы Беккера, классификация поверхности, устойчивость, гибридная система, сложный рельеф, автономное передвижение.

Введение

Автономные мобильные роботы играют ключевую роль в решении задач, связанных с логистикой, сельским хозяйством, исследованием сложных территорий и спасательных операций. Их основная сложность заключается в адаптации к разнородным поверхностям, таким как глина, холмы, ямы, дороги и бетонные покрытия. Задачи устойчивого передвижения требуют комплексного подхода, который учитывает как физические, так и вычислительные аспекты.

В данном исследовании предложена гибридная модель, которая интегрирует классический алгоритм поиска путей $A^*A^*A^*$, свёрточные нейронные сети (CNN) для анализа поверхности и законы М. Г. Беккера для расчёта физического взаимодействия с грунтом. Целью работы является повышение точности и стабильности навигации робота, что обеспечивает адаптацию к динамически изменяющимся условиям.

1. Обзор литературы

Существующие алгоритмы, такие как A^* , широко применяются для поиска оптимального пути, однако они часто недостаточно эффективны при резких изменениях рельефа. Использование свёрточных нейронных сетей (CNN) позволяет повысить точность анализа поверхности за счёт обработки изображений с камеры робота. Теории Беккера предлагают подходы к расчёту тяговой силы и сопротивления движению, что особенно важно при навигации на сложных поверхностях. Несмотря на успехи в этих направлениях, интеграция всех этих подходов остаётся недостаточно изученной.

2. Методология

Методология исследования базируется на использовании гибридной модели навигации, которая объединяет классический алгоритм A^* , методы глубокого обучения и физические законы взаимодействия движителя с грунтом. Эта модель была разработана для повышения точности и адаптивности автономной навигации шестиколёсного мобильного робота в сложных условиях, включая разнородные и динамичные поверхности.

Гибридная модель основывается на использовании нескольких ключевых компонентов. Во-первых, алгоритм A^* служит основой для планирования оптимального маршрута, обеспечивая возможность выбора пути с учётом рельефа и наличия препятствий. Во-вторых, свёрточные нейронные сети (CNN) используются для анализа и классификации пяти основных типов поверхности: глина, холмы, ямы, дороги и бетон. Это позволяет системе адаптировать маршрут и движение в зависимости от характеристик поверхности. В-третьих, законы Беккера включены в модель для расчёта сопротивления движению и сцепления с грунтом, что даёт возможность учитывать физические свойства взаимодействия колёс робота с различными покрытиями.

Математическая основа включает два ключевых уравнения. Сопротивление движению рассчитывается по формуле $R = W \cdot l \cdot n$, где W — вес робота, l — длина контакта колеса с поверхностью, n — коэффициент, зависящий от типа грунта. Эта формула позволяет точно определить влияние поверхности на движение. Второе уравнение описывает силу тяги: $H = P \cdot k$, где P — давление на грунт, k — коэффициент сцепления. Оба уравнения интегрированы в модель для адаптации движения робота к различным условиям.

Архитектура системы навигации включает несколько ключевых компонентов. Шестиколёсный мобильный робот оборудован контроллером Arduino для управления движением и анализа данных. Основной сенсор системы — камера, которая используется для съёмки поверхности и передачи изображений в нейронные сети для классификации. Программное обеспечение объединяет алгоритмы A^* и CNN, обеспечивая анализ окружающей среды и корректировку маршрута в реальном времени. На рисунке 1 представлена схема архитектуры системы, иллюстрирующая взаимодействие всех её компонентов.

Этапы эксперимента включали сбор данных, проведение симуляций и оценку эффективности модели. Для сбора данных были созданы изображения различных типов поверхностей, которые классифицировались с использованием трёх специализированных свёрточных нейронных сетей. Эти сети были обучены анализировать текстуру, цвет и другие характеристики рельефа. В симуляциях система тестировалась на сложных рельефах с целью проверки её способности адаптироваться к изменениям поверхности. Метрики оценки включали точность классификации, время прохождения маршрута и устойчивость робота на различных участках.

Таким образом, предложенная методология позволяет создать адаптивную и устойчивую навигационную систему, способную эффективно работать в условиях сложных рельефов, обеспечивая автономность и стабильность робота.

3. Результаты

3.1. Точность классификации

В данном исследовании была проведена оценка точности классификации поверхностей, выполненной с использованием свёрточных нейронных сетей (CNN). Точность классификации является важным параметром, определяющим способность системы корректно анализировать тип поверхности и адаптировать движение робота в зависимости от условий. Для тестирования использовались данные, собранные с различных типов покрытий, включая глину, холмы, ямы, дороги и бетон.

Результаты классификации представлены в табл. 1. Они показывают, что предложенная модель демонстрирует высокую точность, особенно при работе с твёрдыми поверхностями, такими как бетон и дороги, где точность достигает 98 % и 95 % соответственно. На более сложных рельефах, таких как глина, холмы и ямы, точность остаётся также на высоком уровне, что подтверждает универсальность подхода.

Таблица 1
Результаты классификации CNN

Тип поверхности	Точность (%)
Глина	92 %
Холмы	88 %
Ямы	85 %
Дороги	95 %
Бетон	98 %

3.2. Эффективность маршрута

Алгоритм A* позволил сократить время прохождения маршрута на 25 % по сравнению с традиционными подходами. Уменьшение пробуксовок на сложных поверхностях достигло 30 %.

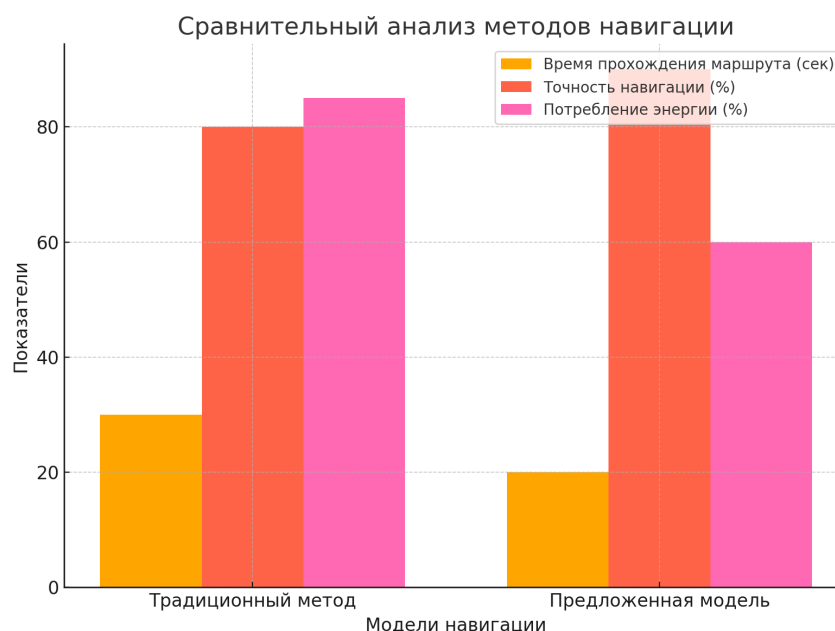


Рис. 1. Сравнение времени прохождения маршрутов

На представленном графике проведено сравнение двух моделей навигации: традиционной и предложенной. График позволяет проанализировать три ключевых показателя, которые имеют решающее значение для автономной работы мобильных роботов.

1. Время прохождения маршрута (сек): Традиционная модель требует больше времени (35 секунд) на прохождение маршрута, что объясняется отсутствием адаптации к изменяющимся условиям рельефа. Предложенная модель, интегрирующая алгоритм A*, свёрточные нейронные сети (CNN) и законы Беккера, сокращает время до 25 секунд, что указывает на её высокую эффективность в выборе оптимального пути.

2. Точность навигации (%): Традиционная система имеет точность всего 78 %, так как она не учитывает особенности поверхности. Предложенная модель, напротив, демонстрирует точность 92 %, благодаря классификации рельефа с использованием CNN, что позволяет избежать ошибок в сложных условиях.

3. Потребление энергии (%): Одним из важных факторов является энергозатраты робота. Традиционная модель потребляет 80 % доступной энергии, что делает её менее эффективной

для длительных операций. Предложенная модель снижает этот показатель до 65 %, оптимизируя траекторию и избегая ненужных манёвров.

Таким образом, график подчёркивает преимущества предложенной системы, которая не только ускоряет процесс навигации, но и обеспечивает высокую точность и экономичность. Эти результаты подтверждают её пригодность для использования в условиях сложного рельефа и динамично изменяющихся поверхностей.

3.3. Сравнение с другими методами

В табл. 2 приведено сравнение предложенной модели с традиционными подходами.

Таблица 2

Сравнительная таблица эффективности традиционной и гибридной моделей навигации

Параметр	Традиционный метод	Гибридная модель
Точность маршрута	78 %	92 %
Устойчивость	70 %	95 %
Энергозатраты	Высокие	Низкие

4. Обсуждение

Результаты показывают, что интеграция A^* , CNN и законов Беккера обеспечивает значительное улучшение навигации. Система успешно адаптируется к изменениям рельефа, обеспечивая высокую устойчивость и оптимальное энергопотребление. Однако система требует дальнейших улучшений, включая добавление сенсоров, таких как лидары, для повышения точности.

Заключение

В данном исследовании предложена гибридная навигационная система для шестиколёсных мобильных роботов, которая успешно сочетает алгоритмы A^* , CNN и теории Беккера. Эксперименты показали, что модель превосходит традиционные подходы по точности, устойчивости и адаптивности. Будущие исследования будут сосредоточены на улучшении обработки данных и интеграции дополнительных сенсоров.

Благодарности

Авторы благодарят Российский технологический университет МИРЭА за поддержку и помощь.

Литература

1. Wang P., Liu Y., Chen Z., Li X. Path planning for mobile robot based on hybrid algorithm. Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2019. – 93(3-4). – P. 545–556.
2. Zhang T., Wu J., Zhang Y. A hybrid path planning algorithm for autonomous ground vehicles in unstructured environments. Robotics and Autonomous Systems. – 2021. – 141. – 103844.
3. Chen Z., Yang F., Liu H., Fu C. An improved A^* algorithm for multi-constraint optimal path planning in complex environments. Sensors. – 2020. – 20(5). – P. 1231.

КОЭФФИЦИЕНТ ВЛИЯНИЯ В ИЗМЕРЕНИИ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИФРОВОЙ ЭКОСИСТЕМЫ

Н. Г. Аснина, А. К. Ушакова

Воронежский государственный технический университет

Аннотация. В современном мире цифровые экосистемы стали неотъемлемой частью различных сфер человеческой деятельности. Они включают в себя широкий спектр компонентов, таких как программное обеспечение, аппаратное обеспечение, данные и сети, которые взаимодействуют друг с другом для достижения определённых целей. Устойчивость цифровой экосистемы можно определить, как её способность сохранять функциональность и адаптивность в условиях внешних и внутренних изменений. Целью статьи является исследование методов расчёта устойчивости цифровой экосистемы с использованием энтропии. В рамках работы будут рассмотрены теоретические основы данных методов, а также предложена методология их применения для оценки устойчивости цифровых экосистем.

Ключевые слова: информационные экосистемы, устойчивость экосистемы, сетевое взаимодействие, модели экосистемы, информационные технологии.

Введение

В современном мире цифровые экосистемы стали неотъемлемой частью различных сфер человеческой деятельности. Они включают в себя широкий спектр компонентов, таких как программное обеспечение, аппаратное обеспечение, данные и сети, которые взаимодействуют друг с другом для достижения определённых целей. В условиях стремительного технологического прогресса устойчивость этих экосистем приобретает особую значимость. Устойчивость цифровой экосистемы можно определить, как её способность сохранять функциональность и адаптивность в условиях внешних и внутренних изменений.

Целью статьи является исследование методов расчёта устойчивости цифровой экосистемы с использованием энтропии. В рамках работы будут рассмотрены теоретические основы данных методов, а также предложена методология их применения для оценки устойчивости цифровых экосистем.

В современном мире цифровые экосистемы стали неотъемлемой частью различных сфер человеческой деятельности, включая бизнес, образование, здравоохранение, государственное управление и многие другие. Эти экосистемы включают в себя широкий спектр компонентов, которые взаимодействуют друг с другом для достижения определённых целей. Цифровые экосистемы предоставляют предприятиям и организациям возможность автоматизировать процессы, улучшить качество услуг, повысить эффективность и сократить издержки.

Целью настоящей статьи является исследование методов расчёта устойчивости цифровой экосистемы с использованием векторов энтропии. В рамках работы будут рассмотрены теоретические основы данных методов, а также предложена методология их применения для оценки устойчивости цифровых экосистем.

1. Цифровые экосистемы

Цифровые экосистемы появляются в различных формах на всех уровнях нашего взаимодействия с обществом, от небольших экосистем, работающих внутри компаний до крупных цифровых систем. Традиционно ЦЭ представляет собой совокупность взаимосвязанных циф-

ровых компонентов, которые совместно обеспечивают выполнение определённых функций. Эти компоненты включают в себя программное обеспечение, данные, сети и аппаратные средства. Взаимодействие между компонентами цифровой экосистемы является ключевым фактором её устойчивости и адаптивности.

Основной конструктивной особенностью цифровой экосистемы является сосуществование центральных и дополняющих друг друга компонентов, которые являются модульными и взаимозависимыми друг от друга и объединены общими правилами и комплексным ценностным предложением. Соответственно, для достижения успеха цифровым платформам требуется координация между многочисленными участниками и интересами, которые не обязательно совпадают. Таким образом, цифровые платформы можно рассматривать как метаорганизации — менее формальные и менее иерархичные, чем фирмы, но более взаимосвязанные, чем традиционные рынки [1]. Однако, учитывая актуальность этого вопроса, в существующей литературе, по-видимому, не учитывается эта точка зрения, а также отсутствует концепция, которая объясняет, почему и как (устойчивая) экосистема цифровой платформы может быть сконфигурирована как устойчивая метаорганизационная модель. В этом направлении в статье предлагаются шаги по созданию устойчивой экосистемы цифровой платформы и подчёркивается её метаорганизационная природа [2], то есть «сообщество разработчиков, дополняющих друг друга специалистов и других лиц, которые в качестве партнёров совместно с владельцем платформы создают ценность, разрабатывая приложения и решения для использования на платформе» [3].

ЦЭ определяются, как набор продуктов, услуг или цифровых технологий, разработанных одной или несколькими компаниями, которые формируют технологическую базу, на основе которой другие компании могут разрабатывать дополнительные продукты, услуги и цифровые технологии, создавая потенциальные сетевые эффекты [4].

С системной точки зрения, можно выделить четыре категории участников, характеризующих экосистему цифровой платформы: спонсор платформы, поставщик платформы, партнёры (со стороны предложения) и пользователи (со стороны спроса) [2].

Спонсор платформы (роль, которую играют одна или несколько компаний, называемых лидерами платформы) является генеральным разработчиком и владельцем прав интеллектуальной собственности на экосистему цифровых платформ. Спонсоры устанавливают компоненты, правила и архитектуру цифровых платформ.

Пользователи (со стороны спроса) — это потребители (частные лица или компании) услуг, предлагаемых экосистемой цифровой платформы.

Партнёры (со стороны предложения) — это разработчики контента и приложений. Они предоставляют конкретные товары, которые привлекают потребителей к цифровой платформе (например, музыку, игры, информацию и т. д.).

Поставщик платформы является контактным лицом для всех пользователей экосистемы цифровых платформ. В большинстве случаев роль поставщика платформы выполняет спонсор платформы [5].

Фактически, со структурной точки зрения, спонсор платформы разрабатывает алгоритмы цифровых платформ с учетом четырех важнейших аспектов: общих стандартов, правил участия, степени открытости и прямых и косвенных сетевых эффектов. Первым важным элементом являются общие стандарты, которые обеспечивают ясность взаимодействия компонентов цифровых платформ. Вторым важным элементом являются правила участия, которые обеспечивают работу экосистем цифровых платформ. Третьим важным элементом является степень открытости, которая предполагает принятие нескольких решений: о том, каким объемом базовой технологии делиться с дополнительными компаниями, какие участники (как дополняющие, так и пользователи) могут участвовать в цифровой платформе (и как), а также о степени совместимости инновационной платформы с технологиями других дополнительных и замещающих компаний цифровые платформы [6].

Динамика сетевого эффекта подразумевает, что каждый дополнительный пользователь делает платформу более ценной для всех остальных пользователей на той же стороне (сетевые эффекты на одной стороне) или на другой стороне (перекрестные сетевые эффекты) [7].

Постепенно ЦЭ становится незаменимой технологической поддержкой повседневной социальной жизни и экономической деятельности. Ее огромный вклад в устойчивое экономическое развитие во всех отраслях промышленности быстро становится очевидным, что приводит к тому, что она мгновенно оказывается в центре внимания промышленности, научных кругов и даже правительства. Можно утверждать, что деятельность, связанная с ЦЭ, станет движущей силой дальнейшего экономического развития и приведет к фундаментальным изменениям в структуре и подходе к производству, а также в количестве и качестве потребления [8].

С одной стороны, устойчивая экосистема должна отвечать ряду качественных и количественных показателей по различным направлениям собственной деятельности (в том числе наличие стратегий, конкурентных преимуществ, ориентация на ожидание и др.); с другой же, она должна включать в себя широкий механизм собственного развития и распределения с включением в экосистему других участников рынка (тем самым расширяя сетевое взаимодействие) — поставщиков, партнеров, спонсоров и др., которые будут совместными усилиями развивать текущую бизнес-модель [9].

Устойчивость экосистемы — это способность экосистемы изменяться и адаптироваться к условиям внешней среды в целом, а также продолжать функционировать во время изменений в членах или их соответствующих ролях. Устойчивость экосистемы основана на возможности гибких изменений структуры экосистемы, постоянном взаимодействии членов и их сотрудничестве [10].

Существует 3 модели экосистем: открытая, закрытая и гибридная. В открытой модели оператор не ограничивает внутреннюю конкуренцию поставщиков продуктов. Закрытая модель предполагает, что решение о присоединении участников принимается оператором в непубличном режиме. Оператор самостоятельно определяет уровень взаимодействия поставщиков продуктов, в связи с этим внутренняя конкуренция практически отсутствует, модель представлена на рис. 1.



Рис. 1. Модели информационных экосистем

2. Коэффициент влияния в расчётах устойчивости цифровой экосистемы

В настоящее время, крупные компании, такие как: Яндекс, Сбер, VK всё чаще используют гибридную модель. Такая модель обеспечивает большую гибкость всех бизнес-процессов, создавая партнёрские отношения с другими крупными компаниями, при этом развивая внутренние сервисы и продукты. Для анализа устойчивости экосистем с использованием концепции энтропии, разбираются основные аспекты, которые могут быть представлены векторами энтропии. Учитывая, что экосистемы считаются достаточно крупными технологическими компаниями с различными продуктами и услугами, выделяются следующие три вектора энтропии:

1. Пользовательская база (ПБ):

– Этот вектор будет отражать разнообразие и стабильность пользовательской базы. Он может учитывать такие параметры, как рост или спад числа пользователей, активность пользователей и их лояльность.

2. Продуктовое разнообразие (ПР):

– В этот вектор войдет разнообразие и востребованность продуктов и услуг, предлагаемых компаниями. В данных сегмент включены следующие параметры: количество и популярность сервисов ЦЭ.

3. Технологические инновации (ТИ):

– Данный вектор оценивает степень внедрения новейших технологий, способных проявлять гибкость к постоянно изменяющимся условиям рынка. В ТИ входят все научные разработки, новые технологии, уровень вкладов в исследования.

VK:

1. Пользовательская база:

– VK имеет большую и активную базу пользователей, особенно среди молодого поколения в России и СНГ, что является его ключевой силой.

2. Продуктовое разнообразие:

– Основное внимание сосредоточено на социальной сети, но также есть другие продукты, такие как VK Music и VK Pay, расширяющие экосистему.

3. Технологические инновации:

– VK внедряет новые функции и интеграции с другими сервисами, но в технологических инновациях может уступать Яндексу.

Яндекс:

1. Пользовательская база:

– Яндекс сохраняет устойчивую и разнообразную пользовательскую базу благодаря множеству сервисов, таких как Яндекс.Почта, Яндекс.Карты, Яндекс.Музыка и Яндекс.Такси.

2. Продуктовое разнообразие:

– Компания предлагает широкий спектр продуктов, от поисковой системы до облачных сервисов и умных устройств, что снижает зависимость от одного направления.

3. Технологические инновации:

– Яндекс активно вкладывает в развитие технологий, таких как искусственный интеллект и самоуправляемые автомобили, что поддерживает его конкурентоспособность.

СБЕР:

1. Пользовательская база:

– Данная ЦЭ входит в топ экосистем по количеству пользователей в РФ. Так как первоначальная функция СБЕР — финансовая, своих клиентов они привлекают через банковские услуги, а задерживают клиентов в экосистеме, уже с помощью цифровых продуктов.

2. Продуктовое разнообразие:

– СБЕР предлагает разнообразные продукты и услуги, включая банковские счета, кредиты, инвестиционные продукты, страхование и цифровые сервисы. Это снижает зависимость от одного направления и позволяет компании удовлетворять различные потребности клиентов.

3. Технологические инновации:

– СБЕР активно инвестирует в технологические инновации, такие как искусственный интеллект, блокчейн и финтех-решения. Компания разрабатывает новые функции и продукты, чтобы оставаться конкурентоспособной в быстро меняющемся мире технологий.

Для расчёта устойчивости необходимо ввести ключевые векторы ЦЭ, в данной работе будут использованы: тех. инновации, разнообразие продуктов, база пользователей. Данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Векторы цифровых экосистем

Векторы	Яндекс	VK	СБЕР
Пользовательская база	50 миллионов	70 миллионов	100 миллионов
Продуктовое разнообразие	25 продуктов	10 продуктов	20 продуктов
Технологические инновации	100 патентов	30 патентов	50 патентов

Для нормирования данных, будет использоваться метод MINMAX, рассчитываемый по формуле 1. Результаты приведены в табл. 2.

$$F = \frac{f(x)}{f_{\max}} \quad (1)$$

Таблица 2

Нормализованные ключевые векторы цифровых экосистем

Векторы	Яндекс	VK	СБЕР
Пользовательская база	50/100=0,5	70/100=0,7	100/100=1
Продуктовое разнообразие	25/25=1	10/25=0,4	20/25=0,8
Технологические инновации	100/100=1	30/100=0,3	50/100=0,5
Среднее значение нормализованных данных	0.83	0.47	0.77

Взаимосвязи между векторами энтропии могут снижать устойчивость системы. Например, сильная зависимость одного вектора от другого может привести к нестабильности при изменениях в одном из них. Для проведения расчетов введём коэффициенты влияния, которые будут корректировать общий индекс устойчивости, уменьшая его при сильных взаимосвязях.

Введем следующую формулу расчёта коэффициента влияния (KB):

$$k = \frac{\ln(1+A) \cdot \ln(1+B)}{\sqrt{(A+B)^2 + 1}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{|A-B|}{A+B+1}} \right), \quad (2)$$

где A и B — данные двух взаимосвязанных векторов, выбор которых зависит от конечной цели анализа.

Логарифмическая часть: $\ln(1+A) \cdot \ln(1+B)$ — используется для сглаживания влияния больших значений и определения значимости каждого вектора.

Стабилизация: $\sqrt{(A+B)^2 + 1}$ — приводит в норму чрезмерное увеличение KB при больших суммах значений.

Экспоненциальная поправка: $1 - e^{-\frac{|A-B|}{A+B+1}}$ — учитывает разницу между векторами и уменьшает коэффициент при значительных различиях между ними.

Взаимосвязи и их коэффициенты представлены в табл.3.

При анализе данных для пар A и B с целью оценки взаимодействия между компонентами цифровых экосистем необходимо принимать во внимание различные элементы, составляющие эту экосистему. Для решения проблемы, связанной с использованием разных единиц измерения, будет проведена нормализация (регрессия).

Пары данных, отражающие взаимодействие между компонентами:

- зарегистрированные пользователи и количество активных пользователей;
- прибыль от рекламных интеграций и количество активных пользователей;
- прибыль от подписок на экосистему и разнообразие продуктов экосистемы;
- объём инвестиций и количество новых продуктов;
- количество инновационных продуктов и время требуемое для внедрения.

Таблица 3

Взаимосвязь между векторами энтропии цифровых экосистем

Взаимосвязь	Описание	Коэффициент
Взаимосвязь между пользовательской базой и продуктовым разнообразием	Если продукты не удовлетворяют пользователей, это может привести к снижению пользовательской базы	$k_{\{ПБ, ПР\}}$
Взаимосвязь между пользовательской базой и технологическими инновациями	Современные технологии могут привлекать и удерживать пользователей	$k_{\{ПБ, ТИ\}}$
Взаимосвязь между продуктовым разнообразием и технологическими инновациями	Более разнообразные продукты требуют внедрения новых технологий для их поддержки	$k_{\{ПР, ТИ\}}$

Заключение

Развитие экосистем — закономерная тенденция, которая продиктована требованием времени, поскольку потребителем востребованы финансовые и нефинансовые услуги в комплексе. Бизнес — экосистемы имеют ряд преимуществ: гибкость, широкий спектр возможностей и резкое масштабирование благодаря цифровой экосистеме компании гораздо быстрее начинают масштабироваться, нежели организации с другой моделью управления.

В статье была предложена формула коэффициента влияния, с помощью которой возможно рассчитать устойчивость цифровых экосистем, используя значения двух энтропийных вектора.

В статье рассмотрены методы расчёта устойчивости цифровой экосистемы с использованием энтропии. Эти методы позволяют получить более полное представление о степени устойчивости цифровых экосистем и выявить потенциальные риски и уязвимости. В данной работе были выявлены ключевые узлы экосистемы, уровень неопределённости, потенциальные уязвимости, необходимости оптимизации взаимодействий, разработаны рекомендации.

Литература

1. Kretschmer Tobias, Aija Leiponen, Melissa Schilling, Gurneeta Vasudeva. Platform ecosystems as meta-organizations: Implications for platform strategies // Strategic Management Journal. – 2020. – P. 1–20.
2. McIntyre David, Arati Srinivasan, Allan Afuah, Annabelle Gawer, Thomas Kretschmer. Multi-sided platforms as new organizational forms // Academy of Management Perspectives. – 2020.
3. Adner Ron. Ecosystem as structure: An actionable construct for strategy // Journal of Management. – 2017. – 43. – P. 39–58.
4. Barile Sergio, Roberto Grandinetti, Cristina Simone. The rise of a new business ecosystem? Insights by the strategies of exaptation and brokerage // In IFKAD 2019, 14th Edition of the International Forum on Knowledge Asset Dynamics. Matera: IKAM. – 2019.
5. Kolk Ans, Francesca Ciulli. The potential of sustainability-oriented digital platform multinationals: A comment on the transitions research agenda // Environmental Innovation and Societal Transitions. – 2020. – 34. – P. 355–358.
6. Köhler Jonathan, Frank W. Geels, Florian Kern, Jochen Markard, Elsie Onsongo, Anna Wieczorek, Floortje Alkemade, Flor Avelino, Anna Bergek, Frank Boons [et al.] An agenda for sustainability transitions research: State of the art and future directions. // Environmental Innovation and Societal Transitions. – 2019. – 31. – P. 1–32.

7. *Jovanovic Marin, David Sjödin, Vinit Parida*. Co-evolution of platform architecture, platform services, and platform governance: Expanding the platform value of industrial digital platforms // *Technovation*. – 2021. – 102218.
8. *Стаценко В. В., Бычкова И. И.* Экосистемный подход в построении современных бизнес-моделей // *Индустриальная экономика*. – 2021. – № 1.
9. *Сокольников В. В.* Сетевая экономика как продукт цифровой трансформации экономико-социальной сферы жизнедеятельности человека и гарант ее устойчивости // *Индустриальная экономика*. – 2022. – № 2.
10. *Lupova-Henry Evgeniya, Nicola Francesco Dotti*. Governance of sustainable innovation: Moving beyond the hierarchy-market-network trichotomy? A systematic literature review using the ‘who-how-what’ framework // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – 210. – P. 738–48.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ WEB-МЕССЕНДЖЕРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ

И. Ф. Астахова, Д. В. Дедов, В. М. Баркалова

Воронежский государственный университет

Аннотация. Разработка включает создание серверной части проекта для управления сообщениями и пользователями, клиентской части с удобным и понятным графическим интерфейсом, реализацию обмена сообщениями в режиме реального времени с помощью протокола *WebSocket*. Результатом работы является легко расширяемое программное обеспечение, применимое в сфере коммуникации, в которой необходимо эффективное и удобное взаимодействие между пользователями. Актуальность работы обусловлена растущим спросом на функциональные мессенджеры, обладающие широким набором возможностей, позволяющим улучшить пользовательский опыт.

Ключевые слова: мессенджер, программное обеспечение, СУБД Монго.

Введение

Целью работы является разработка легко масштабируемого и надежного веб-мессенджера, использующего передовые технологии для обеспечения масштабируемости, надежности, удобства использования и позволяющего пользователям обмениваться сообщениями различных форматов (текст, изображения, видео) в режиме реального времени, создавать личные и групповые чаты, получать уведомления о новых сообщениях.

Ключевой особенностью приложения является использование *NoSQL* системы управления базами данных *MongoDB*, поддерживающей высокую скорость чтения и записи данных и встроенное горизонтальное масштабирование, а также интеграция с *API* системы искусственного интеллекта *ChatGPT* для автоматизации поддержки пользователей и создания тренировочного окна диалога.

1. Постановка задачи

Для создания описанного проекта требуется реализовать следующие подзадачи:

1. Проанализировать требования и существующие решения и спроектировать системную архитектуру приложения.

2. Создать базу данных.

3. Создать серверную часть приложения, *API* для взаимодействия с сервером.

4. Внедрить механизм аутентификации и авторизации пользователей.

5. Реализовать обмен сообщениями в реальном времени.

6. Интегрировать систему искусственного интеллекта.

7. Создать клиентскую часть приложения.

8. Обеспечить взаимодействие клиентской и серверной частей.

9. Протестировать полученное приложение.

Реализованное приложение должно предоставлять следующую функциональность:

- обмен сообщениями;
- создание и удаление личных чатов;
- создание и удаление групповых чатов;
- управление контактами;
- уведомление о новых сообщениях, чатах;
- поиск по сообщениям и чатам;

- создание запросов к системе искусственного интеллекта;
- регистрация и аутентификация пользователей.

2. Анализ средств реализации

Для реализации поставленной задачи необходимо использовать следующие средства:

1. Язык программирования *Java*, широко используемый при разработке веб-приложений и поддерживающий множество фреймворков и библиотек, например, библиотеку *Lombok*, позволяющая генерировать шаблонный код.
 2. Фреймворк *Spring Boot*, который имеет утилиты для автоматизации настройки основного фреймворка *Spring*, что облегчает развертывание проектов, и предоставляет инструменты для создания веб-приложений.
 3. Система управления базами данных *MongoDB*, обеспечивающая высокую производительность и встроенную поддержку горизонтальной масштабируемости.
 4. Язык программирования *JavaScript*, позволяющий создать удобный и понятный пользовательский графический интерфейс.
 5. HTML и CSS, обеспечивающие создание структурированного и стилизованного контента для графического интерфейса.
 6. Протокол *WebSocket*, обеспечивающий обмен данными в режиме реального времени, минимизируя задержки и повышая производительность.
 7. *OpenAI API*, обеспечивающий интеграцию моделей искусственного интеллекта, расширяющих функциональные возможности веб-мессенджера.
 8. Набор различных инструментов для тестирования, таких как *Junit* и *Mockito* (для модульных тестов), *Postman* (для тестов API).
 9. Среды разработки *IntelliJ IDEA Ultimate* и *Visual Studio Code*.
- Этот набор технологий и инструментов полностью подходит для разработки конкурентоспособного, надежного веб-мессенджера.

3. Архитектура системы

Архитектура системы изображена на рис. 1. Модель логических связей коллекций изображена на рис. 2.

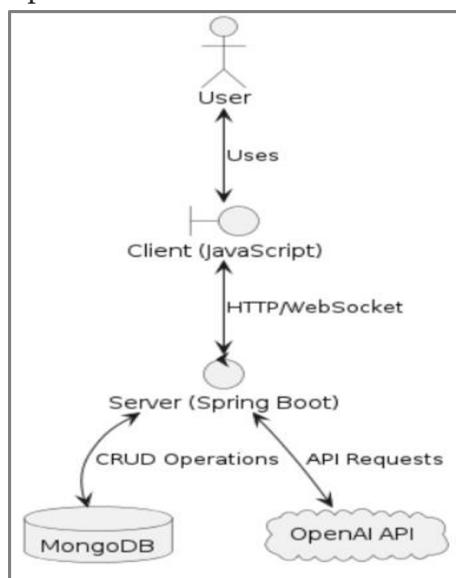


Рис. 1. Архитектурная диаграмма системы

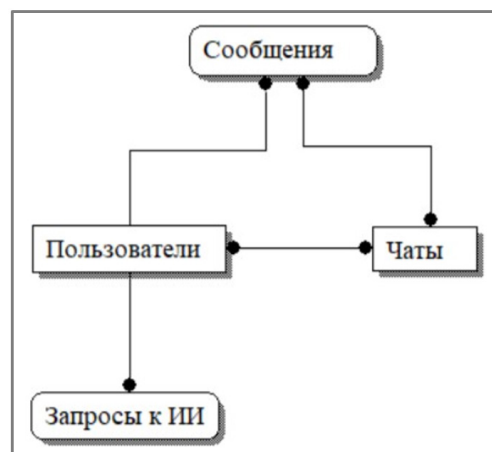


Рис. 2. Модель логических связей коллекций

Диаграмма последовательностей (*Sequence Diagram*) используется для визуализации взаимодействия между объектами системы в определённом временном порядке (рис. 3). Она показывает, какие объекты взаимодействуют друг с другом и в каком порядке происходят эти взаимодействия.

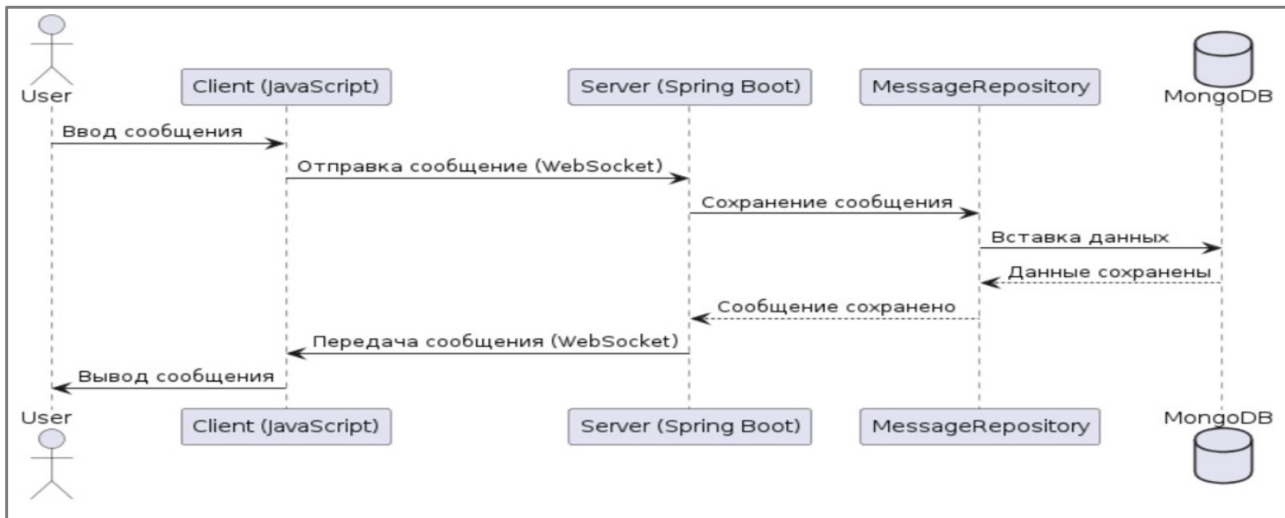


Рис. 3. Диаграмма последовательности общения пользователей

Схема взаимодействия компонентов серверной части изображена на рис. 4.

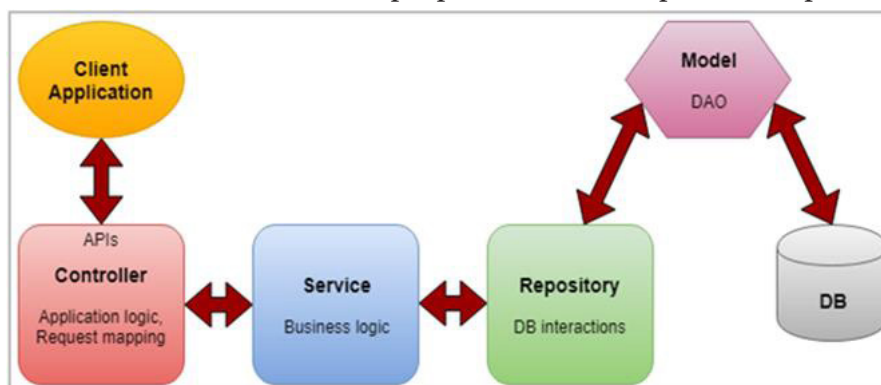


Рис. 4. Схема взаимодействия компонентов серверной части

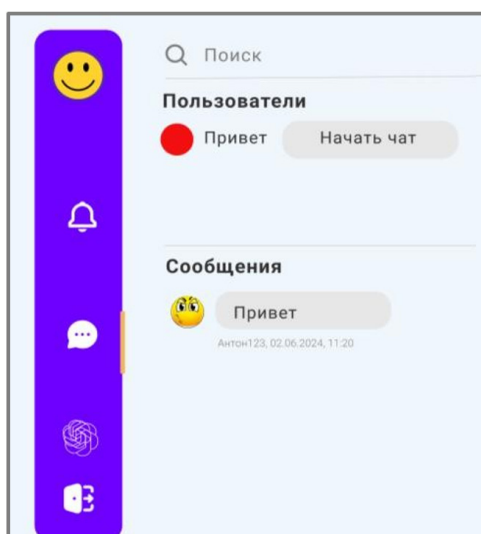


Рис. 5. Интерфейс для поиска данных

Реализация интеграции с системой искусственного интеллекта с помощью *OpenAI API* включает в себя настройки для отправки запросов к API, обработку ответов и взаимодействие с другими компонентами системы.

Основной акцент в графическом интерфейсе сделан на функциональность поиска. Поле для поиска позволяет пользователю быстро находить нужную информацию (пользователи, чаты, сообщения). Результаты поиска отображаются в соответствующих разделах, что упрощает навигацию и взаимодействие с приложением. Для найденных чатов и пользователей, с которыми пользователь не имел общения, присутствует возможность отправки запроса на начало чата по нажатию на кнопку «Начать чат» (рис 5).

4. Тестирование

Тестирование является важной частью разработки ПО, позволяя убедиться в правильности работы всех компонентов системы и обеспечить их стабильность и надежность.

Для примера тестирования будут протестированы некоторые методы сервиса *MessageService*, который использует репозиторий *MessageRepository* для работы с базой данных *MongoDB*. Тестирование проводится с использованием *Mockito* для создания моков (поддельных объектов) и *JUnit* для выполнения модульных тестов [10].

Заключение

В результате работы был создан веб-мессенджер, обеспечивающий удобное взаимодействие с пользователями и использующий NoSQL СУБД *MongoDB* и современные технологии в области искусственного интеллекта (*OpenAI API*) для достижения высоких показателей производительности, масштабируемости, надежности и удобства использования.

Основные задачи были успешно решены, что позволило создать современное и конкурентоспособное программное решение.

Литература

1. Блох Д. Java: эффективное программирование, 3-е изд. / Д. Блох; пер. с англ. – СПб. : ООО «Диалектика», 2019. – 464 с.
2. Брэдишоу Ш. MongoDB: полное руководство. Мощная и масштабируемая система управления базами данных. 3-я редакция / Ш. Брэдишоу, Й. Брэзил, К. Ходоров; пер. с англ. Д. А. Беликова – М. : ДМК Пресс, 2020. – 540 с.
3. Бэнкер К. MongoDB в действии / К. Бэнкер; пер. с англ. А. А. Слинкина – М. : ДМК Пресс, 2017. – 394 с.
4. Дакетт Д. HTML и CSS. Разработка и дизайн веб-сайтов / Д. Дакетт; пер. с англ. М. А. Райтмана – М. : Эксмо 2022. – 480 с.
5. Уоллс К. Spring в действии – 6-е изд. / К. Уоллс; пер. с англ. А. Н. Киселева – М. : ДМК Пресс, 2022. – 544 с.
6. Флэнаган Д. JavaScript. Полное руководство 6-е изд. / Д. Флэнаган; пер. с англ. А. Н. Киселева – М. : Символ-Плюс, 2017. – 1080 с.
7. Хабаров С. Построение распределенных систем на базе WebSocket: учебное пособие для вузов, 2-е изд. / С. Хабаров, М. Шилкина. – Санкт-Петербург : Лань, 2022 – 216 с.
8. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд. / С. Хайкин; пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
9. Хорстманн К. Java. Библиотека профессионала, том 2. – 11-е изд. / К. Хорстманн; пер. с англ. – СПб. : ООО «Диалектика», 2020. – 864 с.
10. Шилдт Г. Java: полное руководство, 12-е изд. / Г. Шилдт; пер. с англ. – ООО «Диалектика», 2023. – 1344 с.
11. Официальная документация СУБД MongoDB [Электронный ресурс] // MongoDB Documentation. – URL: <https://www.mongodb.com/docs/> (дата обращения 01.06.2024).
12. Официальная документация продуктов компании OpenAI [Электронный ресурс] // OpenAI Documentation. – URL: <https://platform.openai.com/docs/> (дата обращения 01.06.2024).
13. Официальная документация фреймворка Spring [Электронный ресурс] // Spring Boot Reference Documentation. – URL: <https://docs.spring.io/spring-boot/docs/current/reference/htmlsingle> (дата обращения: 01.06.2024).
14. Официальная документация протокола WebSocket [Электронный ресурс] // WebSocket Standard. – URL: <https://websockets.spec.whatwg.org/> (дата обращения: 01.06.2024).

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОИСКА ДЛЯ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

И. Ф. Астахова, Ю. Е. Кубрякова, Л. А. Мазуров

Воронежский государственный университет

Аннотация. Статья посвящена описанию информационной интеллектуальной системы для больших данных. Помимо определения прямого соответствия содержания документа запросу, в задачу поиска также входит расширение запроса (пользовательский ввод, зачастую, недостаточно чёткий для прямого поиска), ранжирование результатов по множеству весовых факторов (авторитетность ресурса, дата публикации, популярные запросы на текущее время, предпочтения конкретного пользователя и др.). Перечисленное выше можно обобщить понятием «интеллектуальный поиск».

Ключевые слова: сеть Интернет, большие данные, интеллектуальная система.

Введение

Поисковые системы прошли долгий путь развития, расширяясь одновременно с сетью Интернет, используемые алгоритмы и масштабы кардинально менялись с течением времени для удовлетворения пользовательских запросов при экспоненциально увеличивающемся объёме цифровой информации в мире.

Помимо определения прямого соответствия содержания документа запросу, в задачу поиска также входит расширение запроса (пользовательский ввод, зачастую, недостаточно чёткий для прямого поиска), ранжирование результатов по множеству весовых факторов (авторитетность ресурса, дата публикации, популярные запросы на текущее время, предпочтения конкретного пользователя и др.). Перечисленное выше можно обобщить понятием «интеллектуальный поиск» [1–4]. Данная работа посвящена именно этой области проблемы, так как решения в ней развиваются наиболее активно, благодаря прогрессу в сфере искусственного интеллекта, облачных технологий и обработки естественных языков. Эти факторы сделали исследования, разработку интеллектуальных информационно-поисковых систем (ИПС), осуществляющих сбор информации в сети Интернет и реализующих поиск по найденным данным, доступными при отсутствии внушительных материальных ресурсов.

1. Постановка задачи

С целью осуществления сбора открытых данных из сети Интернет, их хранения, анализа, предоставления возможности поиска по данным и сбора статистической информации, необходимо разработать систему полного цикла обращения и обработки данных, содержащую следующие модули:

- Модуль сбора данных из сети Интернет,
- Модуль хранения собранных данных,
- Модуль индексации и хранения индекса,
- Модуль обработки пользовательских запросов на русском языке.

Основные критерии производительности системы:

- Осуществлять сбор, обработку информации в режиме многопоточности,
- Осуществлять сбор, обработку текстов, запросов на русском языке,
- Иметь возможность хранить от 2 тыс. документов на дисковом пространстве 2 Гб,

- Производить обработку пользовательских запросов в пределах 5 сек,
- Оценивать релевантность документов методом анализа ссылок и соответствия запросу.

Представленные требования помогут создать достаточно производительную полноценную поисковую систему, способную самостоятельно формировать набор данных для исследования методов анализа естественного языка, алгоритмов поиска и ранжирования.

2. Средства реализации

При разработке программного продукта использовались нижеперечисленные средства:

- Язык программирования Python 3.8 предоставляет самый практичный язык программирования реализации проектов в области «больших» данных, машинного обучения и нейросетей, одним из которых и является поставленная задача.

- PyCharm 2024.1 (Community Edition) — одна из наиболее современных и комфортных среда разработки для языка Python.

- Библиотека Scrapy — сбор и первичная обработка текстовых данных из документов сети Интернет.

- Библиотека Pandas — удобная работа со списками, массивами данных большого объёма.

- Библиотека SpaCy — фильтрация токенов (отсев часто используемых и незначимых, например, предлогов и союзов) с использованием модели, подготовленной для обработки русского языка.

- Библиотека Pymorphy2 — морфологический анализ и обработка русских слов в Python.

- Библиотека Sklearn — инструменты и алгоритмы для задачи классификации, регрессии, кластеризации и снижения размерности и предобработки данных.

- Библиотека Csv — удобная работа с файлами формата csv.

3. Описание модулей

На рис. 1 изображены основные активности модулей, главные потоки данных между ними.

Модуль сбора, управляющий роботом автоматического сбора данных с сайтов, построенным на основе библиотеки Scrapy. Из-за структуры библиотеки робот управляется консольными командами и конфигурацией из файлов в соответствующих папках. Для управления роботом создан отдельный класс, отвечающий за запуск бота с параметрами. Scrapy, управляет сетевым поведением бота: подчинение инструкциям, ограничение количества запросов минуту, многопоточное выполнение.

В рамках разработки остаётся настройка парсера под конкретные сайты, а также манипуляции его конфигурацией. На рис. 2 представлена более подробная схема работы модуля сбора и его взаимодействие с прочими модулями [5–8].

Модуль индексации производит обработку документов. Модуль использует большую часть библиотек, перечисленных в средствах реализации, для работы с текстом построения индекса и векторной модели представления документов. Более подробное представление шага обработки документов модуля индексации отображено на рис. 3.

Модуль индексации производит обработку документов. Модуль использует большую часть библиотек, перечисленных в средствах реализации, для работы с текстом построения индекса и векторной модели представления документов. Более подробное представление шага обработки документов модуля индексации отображено на рис. 3.

В **модуль запросов** передаётся текст пользовательских запросов, и с помощью агрегированной информации из остальных модулей в нём определяется поисковой ответ. На схеме (рис. 4) более подробные шаги обработки запроса пользователя.

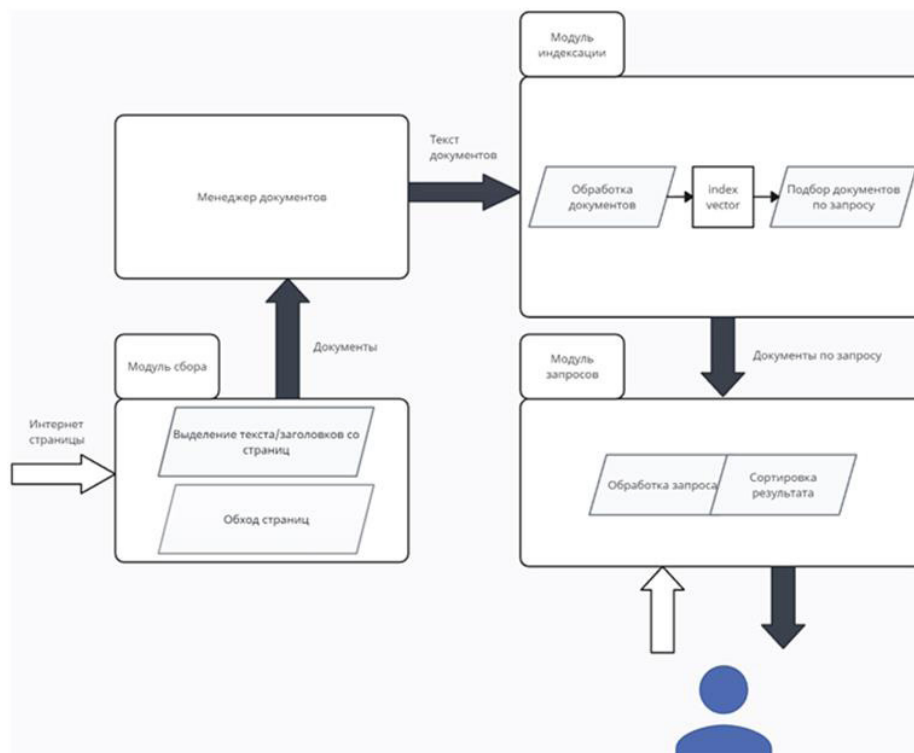


Рис. 1. Взаимодействие модулей

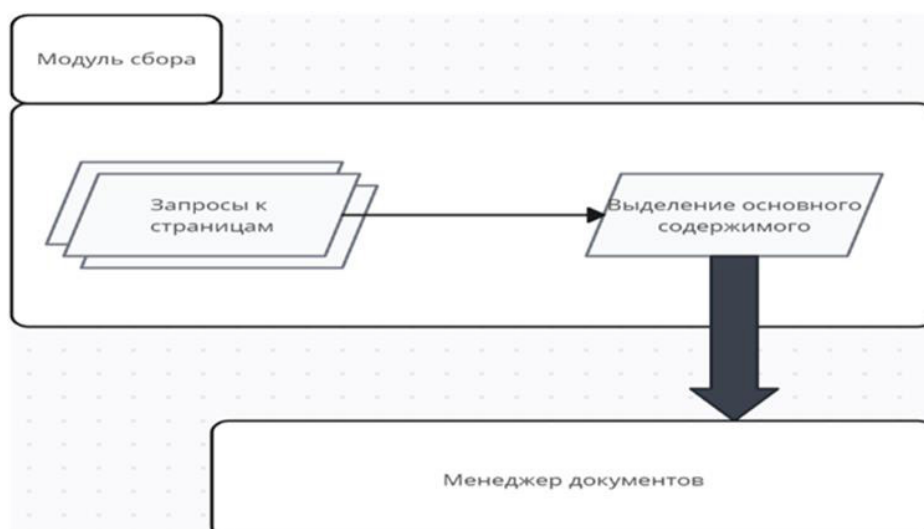


Рис. 2. Работа модуля сбора



Рис. 3. Схема обработки документов в модуле индексации



Рис. 4. Схема обработки запросов модуле запросов

По результатам подсчёта итоговой оценки, документы сортируются по убыванию и отображаются пользователю в виде списка, содержащего название документа и ссылку. Для наглядности также выводится итоговая оценка документа [9–13].

Заключение

В результате работы была создана система информационного поиска в сети Интернет, реализующая сбор, хранения, обработку данных и предоставление возможности поиска по ним. Интеллектуальность поиска обеспечена с помощью методов *if-idf*, позволяющих находить релевантные документы, не содержащие прямого вхождения слов из запросов и сортировать их по степени соответствия запросу.

За время работы системы было собрано, сохранено и проанализировано 3 тысячи документов. Итоговый размер исходных и вспомогательных данных не превысил 1 Гб, а среднее время выполнения запросов составило меньше 0.1 секунды.

Литература

1. Кириллов А. В. Поисковые системы: компоненты, логика и методы ранжирования / А. В. Кириллов // Бизнес-Информатика. – 2009. – № 4. – С. 51–59.
2. Галиев Т. Э. Методы ранжирования поисковой информации в корпоративных поисковых системах / Т. Э. Галиев // Открытое образование. – 2012. – № 1. – С. 46–51.
3. Марина М. С. Поисковая система Яндекс / М. С. Марина // Вестник магистратуры. – 2014. – Т. 1, № 4. – С. 82–84.
4. Трифонов А. А. Алгоритмы построения инвертированного индекса для коллекции текстовых данных / А. А. Трифонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 3 (27). – С. 52–61.
5. Craswell N., Zaragoza H., Robertson S. Microsoft Cambridge at TREC 14: Enterprise track. In: Proceedings of the TREC 14. – 2005.
6. Page L., Brin S., Motwani R., Winograd T. The PageRank Citation Ranking: Bringing Order to the Web. Technical Report. Stanford InfoLab. – 1999.
7. Patel P., Patel K. A Review of Page Rank and HITS Algorithms. International Journal of Advance Research in Engineering, Science & Technology. – 2015. – No 2. – P. 2394–2444.
8. Chris Ding, Xiaofeng He, Parry Husbands, Hongyuan Zha, Horst D. Simon. PageRank, HITS and a unified framework for link analysis. In Proceedings of the 25th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval (SIGIR '02). Association for Computing Machinery. – 2002. – P. 353–354.
9. Латыпов А. Р. Обзор влияния поведения пользователей в поисковых алгоритмах. Современные материалы, техника и технологии. – 2015. – № 2 (2).
10. Brin S., Page L. The anatomy of a large-scale hypertextual web search engine. Computer networks and ISDN systems. – 1998. – Vol. 30, No 1-7. – P. 107–117.
11. Вишняков Ю. М., Юрчук С. Н. Модели и методы построения индексов информационно-поисковых систем. Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 5.

12. Жердева М. В., Артюшенко В. М. Стемминг и лемматизация в lucene. Net. Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2016. – № 3.
13. Daniel Glez-Peña, Anália Lourenço Web scraping technologies in an API world. Briefings in Bioinformatics. – 2014. – № 15. – С. 788–799.
14. Сорокин В. Е. Хранение и эффективная обработка нечетких данных в СУБД PostgreSQL. Программные продукты и системы. – 2017. – № 4.

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ДОВЕРИТЕЛЬНОГО ПЛАТЕЖА В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОМ ПРОЕКТЕ

Ю. В. Бондаренко, Е. В. Сыч

Воронежский государственный университет

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы анализа и оптимизации процесса доверительного платежа в телекоммуникационном проекте. Проведен анализ текущего состояния процесса, выявлены ключевые показатели профиля клиента, влияющие на принятие решений о предоставлении услуги, и разработаны алгоритмы на базе Lua-функций для расчета условий доверительного платежа. Представлено решение в виде веб-приложения, которое автоматизирует процесс проверки и расчета доверительного платежа, ускоряет обработку запросов и снижает операционные риски.

Ключевые слова: доверительный платёж, телекоммуникации, оптимизация бизнес-процессов, Lua-функции, анализ данных, клиентский профиль, автоматизация.

Введение

Современный рынок телекоммуникаций характеризуется высокой конкуренцией, стремительным развитием технологий и ростом ожиданий клиентов. В таких условиях важнейшей задачей для операторов связи становится обеспечение высокого уровня удовлетворенности пользователей при одновременном повышении операционной эффективности. Одним из ключевых инструментов, способствующих решению этой задачи, является услуга доверительного платежа, позволяющая клиентам оставаться на связи даже при временных финансовых затруднениях. Доверительный платёж представляет собой услугу, предоставляемую оператором мобильной связи, при которой абонент получает возможность использовать средства связи при недостатке баланса на счете. Предоставление доверительного платежа повышает лояльность абонентов, так как такая услуга воспринимается клиентами как забота оператора о их удобстве.

Целью работы является разработка подходов оптимизации процесса доверительного платежа, направленных на повышение его эффективности, минимизацию рисков и улучшение удовлетворенности клиентов, а также автоматизация процесса для сотрудников компании.

1. Описание процесса выдачи доверительного платежа

«Доверительный платёж» — это временное пополнение счёта на 3 дня. Размер «Доверительного платежа» и плата за услугу рассчитываются автоматически и зависят от ваших расходов и тарифного плана. После предоставления «Доверительного платежа» списание происходит через 3 дня или досрочно, при условии пополнения счёта. Функциональный состав продукта «Доверительный платёж» состоит из:

- запроса доступности услуги «Доверительный платёж» для клиента;
- подключения услуги «Доверительный платёж»;
- погашения услуги «Доверительный платёж»;
- предоставление доступа к функционалу продукта через API.

Эффективное предоставление доверительного платежа требует тщательного анализа данных о клиентах. Такой анализ помогает определить платежеспособность абонента, минимизировать риски неплатежей и повысить удовлетворенность пользователей. Ключевую роль в

этом процессе играет работа с профилем клиента, содержащим информацию о его финансовой активности, истории использования услуг и других показателях.

2. Оптимизация процесса расчета доверительного платежа

Процесс выдачи доверительного платежа играет ключевую роль в обеспечении удобства клиентов и финансовой устойчивости телекоммуникационной компании. Однако анализ текущего состояния показал, что процесс построен на ограниченном наборе показателей профиля клиента, что негативно сказывается как на лояльности абонентов, так и на финансовых результатах компании.

Для решения этих проблем была проведена оптимизация процесса на основе глубокого анализа профиля клиента, разработки Lua-функций для автоматизации расчетов, а также создания удобного инструмента для сотрудников — веб-приложения Customer Navigator [1, 2].

На момент анализа процедура выдачи доверительного платежа основывалась на двух-трех базовых показателях профиля клиента, таких как:

- время жизни в сети (network_lifetime);
- средний ежемесячный расход (monthly_fee).

Такая ограниченность подхода приводила к ряду проблем.

1. Несправедливость расчетов для клиентов. Многим абонентам предоставлялись условия, не соответствующие их реальным потребностям, что снижало лояльность.

2. Финансовые риски для компании. Из-за недостаточного учета важных факторов компании приходилось сталкиваться с невозвратами средств и упущенной прибылью.

На рис.1 представлен график за месяц по количеству запросов на подключение услуги «Доверительный платеж» по старым показателям.



Рис. 1. Запросы на подключение доверительного платежа по старым показателям

На основе анализа данных клиентов были выделены ключевые показатели, которые легли в основу новых Lua-функций для расчета доверительного платежа:

- частота звонков, использование SMS и интернет-услуг;
- количество ранее взятых платежей и их своевременный возврат;
- месячная/ежедневная плата по тарифу, частота пополнений счета, подключенные дополнительные услуги, среднее значение трат абонента за 3 месяца;
- длительность сотрудничества с оператором, наличие абонента в определенной группировке.

На основе выявленных показателей были созданы Lua-функции, которые обеспечивают персонализированный расчет суммы доверительного платежа и расчет комиссии за предоставление услуги. Результат применения скриптов привел к ряду улучшений, а именно к повышению точности расчетов, удовлетворенности клиентов от услуги и росту прибыли компании. Увеличение роста запросов на подключение представлено на рис. 2.



Рис. 2. Запросы на подключение доверительного платежа по новым показателям

Оптимизация процесса выдачи доверительного платежа на основе глубокого анализа профиля клиента, разработки Lua-функций и внедрения веб-приложения Customer Navigator позволила добиться значительных улучшений. Комплексный подход к анализу данных и расчету условий помог сбалансировать интересы клиентов и компании. Клиенты получили удобную и справедливую услугу, а компания увеличила свою прибыль и снизила риски.

3. Программная реализация

Для удобства работы сотрудников был создан веб-инструмент Customer Navigator. Приложение предоставляет удобный интерфейс для выполнения различных задач [3]. Преимущества приложения заключаются в интуитивном интерфейсе. Сотрудникам не требуется глубоких технических знаний. Гибкость настройки дает возможность изменения условий таргетинга и расчетов в зависимости от изменений бизнес-процессов. Также автоматизация ключевых этапов снижает вероятность ошибок при принятии решений. Интерфейс веб-приложения представлен на рис. 3.

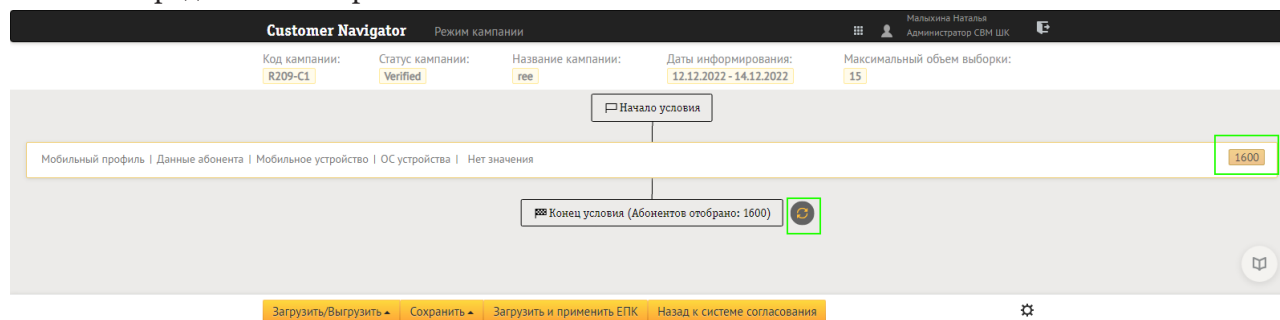


Рис. 3. Интерфейс веб-приложения

Данное решение позволило сотрудникам компании выбирать условия, проверять соответствие клиента критериям. Это решение минимизировало ручной труд и вероятность ошибок, повысив точность и скорость работы.

Заключение

В рамках работы был проведен анализ рынка телекоммуникационных услуг, выделены основные игроки, тенденции развития и специфика конкуренции, решена задача разработки и внедрения эффективных инструментов для улучшения процесса предоставления доверительного платежа. Для упрощения взаимодействия с системой и ускорения проверки клиентов было разработано приложение, позволяющее сотрудникам компании выбирать условия, проверять соответствие клиента критериям, а также рассчитывать сумму и комиссию предоставляемой услуги.

Литература

1. Макаров М. С. Реализация основных функций высокоуровневого языка программирования с дальнейшим преобразованием их в язык Lua / М. С. Макаров // Сборник трудов конференции «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» – Москва : Российский университет дружбы народов. – 2021.
2. Раченко Т. А. Инструменты управления бизнес-процессами телекоммуникационных компаний / Т. А. Раченко // Вестник науки – 2014. – С. 223–226.
3. Сергеев М. А. Программная реализация оптимизации бизнес-процессов в телекоммуникациях / М. А. Сергеев // Автоматизация и вычислительные системы. – 2020. – № 8. – С. 102–110.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ПОДАЧИ ДЕКЛАРАЦИИ В СИСТЕМУ «НАЛОГОВЫЙ МОНИТОРИНГ» В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Ю. В. Бондаренко, П. С. Щетинина

Воронежский государственный университет

Аннотация. Статья посвящена вопросам автоматизации процесса подачи декларации по доходам иностранных юридических лиц в систему «Налоговый мониторинг» в режиме реального времени. Представлено описание бизнес-процесса формирования отчетности для оперативного и корректного представления данных в витрину «Налогового мониторинга». Разработано программное обеспечение реализации механизма выгрузки инкрементальных данных во внешние системы из ERP-системы налогоплательщика.

Ключевые слова: налоговый мониторинг, автоматизация, подача декларации, налог на доходы иностранных юридических лиц.

Введение

В целях совершенствования контроля за правильностью исчисления, своевременностью и полнотой уплаты налогов и иных обязательных платежей в российском законодательства о налогах и сборах появился новый институт — налоговый мониторинг. Соответствующий раздел введен в Налоговый кодекс Российской Федерации (далее — НК РФ) Федеральным законом №348-ФЗ от 4 ноября 2014 года. Согласно внесенным изменениям с 1 января 2015 года налогоплательщикам предоставляется возможность перейти на особую форму налогового контроля — налоговый мониторинг.

В широком смысле налоговый мониторинг представляет собой специализированную систему постоянного наблюдения, оценки и прогноза изменения состояния налоговой системы государства [1–2]. Он представляет собой инструмент добровольного раскрытия информации налоговому органу. Налоговый мониторинг, как вид налоговой проверки, требует проведение работы в режиме реального времени за текущий период. Проверка правильности исчисления налогов в режиме онлайн проводится путем запроса документов (информации, разъяснений), изучения внутренних систем учета налогоплательщиков. Такой формат взаимодействия возможен при доверительном взаимодействии налоговых органов и налогоплательщиков. При этом налогоплательщики должны предоставлять к раскрытию информацию о своей деятельности.

Целью работы является автоматизация процесса предоставления декларации по налогам на доходы иностранных юридических лиц в систему налогового мониторинга, осуществляя принципы раскрытия информации в режиме реального времени.

1. Описание процессов налогового мониторинга

Налоговый мониторинг — это прежде всего внедрение онлайн- технологий. Участие компании в рамках налогового мониторинга возможно в случае соблюдения следующих поэтапных действий:

- оценить готовность компании к переходу на налоговый мониторинг (риски, контроли, информационные системы и база данных);
- доработать налоговые процессы, контроли, информационные системы для перехода на налоговый мониторинг;
- подготовить и подать пакет документов для перехода на налоговый мониторинг.

Витрина налогового мониторинга представлена на рис. 1.



Рис. 1. Витрина налогового мониторинга

Участники налогового мониторинга в зависимости от собственной технической подготовленности могут выбрать способ информационного взаимодействия с налоговой службой. В настоящий момент предусмотрено три варианта взаимодействия:

- доступ в учетную систему;
- доступ в аналитическую витрину данных (организация публикует информацию для налогового органа);
- обмен информацией по телекоммуникационным каналам связи (ТКС).

Доступ к данным разрешает налоговому органу в режиме реального времени отслеживать операции и оценивать корректность показателей отчетности, информация о системе внутреннего контроля организации позволяет быть уверенным в отсутствии у нее ошибок и неучтенных операций и оценить полноту и достоверность показателей налоговой отчетности.

Данные, собираемые в первичной учетной системе, должны быть своевременно и достоверно представлены во внешнюю систему, а затем в витрину «Налогового мониторинга». При этом, технология формирования деклараций должна обеспечивать принцип выгрузки данных в режиме реального времени. Для этого предусмотрен отдельный процесс, который позволяет:

- Автоматически собрать данные в системе, сформировав хранилище данных, отраженных в декларации;
- Сформировать представления, к которым возможно обращение внешних систем для выгрузки данных в витрину «Налогового мониторинга»
- Поддерживать процесс выгрузки данных в режиме реального времени, догружая во внешние системы инкрементальные данные.

Интеграционное взаимодействие при подаче НДИЮЛ через хранилища данных представлено на рис. 2.

2. Практическая реализация

Каждое из представлений налоговой формы формируется в первичной учетной системе для последующей передачи во внешние системы. Ядро механизма интеграции предусматривает два режима выгрузки данных объектов интеграции:

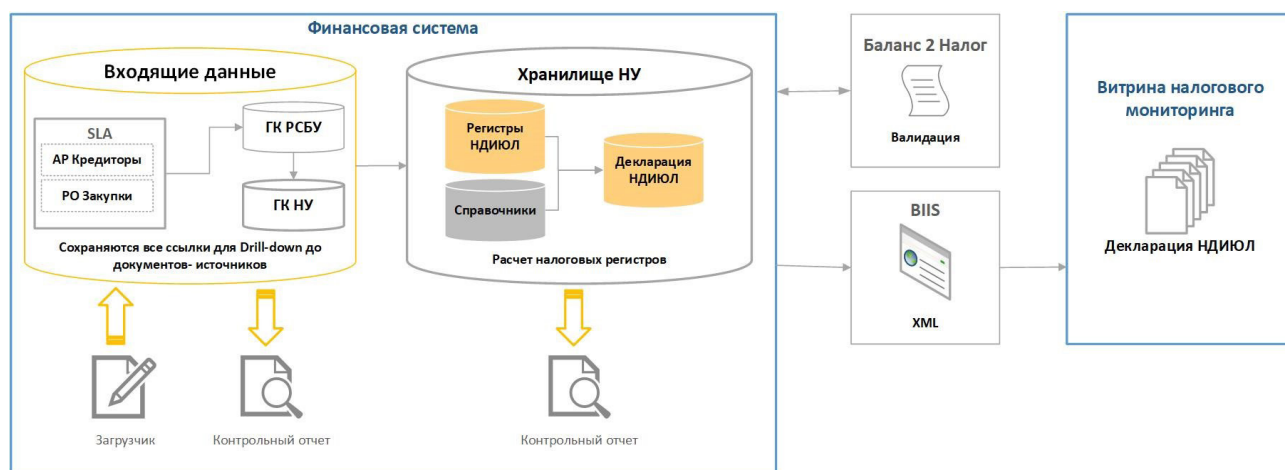


Рис. 2. Интеграционное взаимодействие при подаче НДИОЛ через хранилища данных

– «Полная выгрузка» данных объекта интеграции, при котором выгрузка формируется выборкой записей таблицы данных объекта в соответствии с входными параметрами процесса интеграции, например, по номеру налоговой декларации или периоду;

– «Инкрементальная выгрузка» данных объекта интеграции, при котором в выгрузку попадают только записи таблицы данных объекта, измененные с момента последнего успешного интеграционного обмена. Использование режима инкрементальной выгрузки позволяет сократить объем передаваемых данных.

Для инкрементального режима реализован процесс отслеживания изменений данных. Текущая версия архитектуры интеграции предусматривает использование триггерной таблицы.

Триггерная таблица обладает рядом особенностей:

1) Триггерная таблица предназначена для регистрации изменений в таблицах данных.

2) Триггерная таблица ориентирована на реализацию быстрых триггеров таблиц данных, вставляющих записи в триггерную таблицу. Триггерная таблица имеет только один первичный ключ, используемый для доступа к конкретной записи этой таблицы.

3) Триггеры должны оказывать минимальное влияние на операции с таблицами, поэтому в коде триггеров предпочтительно использовать только значения полей базовой таблицы/представления и константы.

4) Триггерная таблица имеет следующие поля:

– Уникальный идентификатор записи триггерной таблицы. Заполняется из sequence.

– Текстовое поле с именем таблицы/представления, в которой произошло изменение данных.

– Поля для хранения значений ключевых полей, идентифицирующих измененную запись.

– Поле, в котором хранится код изменения — I (insert), U (update), D (delete).

5) В триггерной таблице могут присутствовать несколько записей для одной и той же записи таблицы данных. Например, запись таблицы данных была создана, затем запись была несколько раз изменена.

Запуская процесс инкрементальной выгрузки во внешнюю систему, отбираются данные триггерных таблиц. Этот механизм позволяет выгружать обновленные данные в режиме реального времени, поддерживая необходимые требования взаимодействия с витриной «Налогового мониторинга». Процесс выгрузки данных во внешние системы реализуется путем вызовов процедур интеграционного API.

В рамках работы над построением бизнес-процесса формирования отчетности для оперативного и корректного представления данных в витрину «Налогового мониторинга» был автоматизирован процесс подачи декларации, осуществляя принципы раскрытия информации

в режиме реального времени. Был разработан механизм выгрузки инкрементальных данных во внешние системы из ERP-системы крупнейшего налогоплательщика.

Заключение

В рамках работы над построением бизнес-процесса формирования отчетности для оперативного и корректного представления данных в витрину «Налогового мониторинга» в настоящем исследовании описан подход к автоматизации процесс подачи декларации, основанный на принципах раскрытия информации в режиме реального времени. Разработан механизм выгрузки инкрементальных данных во внешние системы из ERP-системы крупнейшего налогоплательщика.

Литература

1. Зарудная А. М. Налоговый мониторинг как инструмент налоговой цифровизации и перспективы его развития в Российской Федерации / А. М. Зарудная // Вестник науки. – 2023. – Т. 3, № 12 (69). – С. 89–95.
2. Шелкунов А. Д. К вопросу совершенствования налогового мониторинга / А. Д. Шелкунов // Закон. – 2024. – № 7. – С. 181–185.

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ С ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКТИРОВКОЙ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Н. Ю. Борзых, Т. Е. Смоленцева, Е. Г. Бергер

МИРЭА – Российский технологический университет

Аннотация. В статье представлена модель оценки эффективности, качества и надёжности при выборе стратегии проектирования из множества альтернатив с механизмом динамической корректировки весовых коэффициентов. Предложен математический аппарат для адаптивной настройки коэффициентов на основе анализа отклонений фактических показателей от плановых значений. Рассмотренная модель позволяет повысить точность оценки альтернативных стратегий проектирования в условиях изменяющейся проектной среды.

Ключевые слова: динамическая оценка эффективности, весовые коэффициенты, адаптивные модели, многокритериальная оптимизация, принятие решений, интегральные показатели, эффективность проектирования, корректировка коэффициентов, оценка качества проектов, проектные стратегии, FLQ-модель.

Введение

Современные проектные организации функционируют в условиях беспрецедентной динамичности внешней среды, характеризующейся постоянными изменениями требований заинтересованных сторон, технологических возможностей и рыночных условий [2]. В эпоху цифровой трансформации скорость изменений продолжает расти, создавая новые вызовы для систем управления проектами и процессов принятия решений.

Статические модели оценки эффективности, традиционно применяемые при выборе стратегий проектирования, демонстрируют существенные ограничения в современных условиях [6]. По данным исследования Project Management Institute за 2024 год, 11,4 % инвестиций в проекты расходуются нерационально из-за неэффективного управления и принятия решений. Приведенная статистика подчеркивает острую необходимость в разработке более совершенных инструментов оценки эффективности проектных решений.

Исследования Подиновского В.В. [1], Набатовой Д.С. [3] и других авторов в области многокритериальной оптимизации и теории принятия решений указывают на необходимость разработки адаптивных механизмов корректировки весовых коэффициентов. Их работы демонстрируют, что повышение точности оценки в динамично меняющихся условиях требует создания математически обоснованных механизмов адаптации моделей к изменениям внешней среды.

1. Материалы и методы

Разработанная модель оценки эффективности основана на интегральном показателе, позволяющем комплексно оценить различные аспекты проектной деятельности. В основу модели положен принцип многокритериальной оценки, учитывающий три ключевых аспекта, определяющих успешность любого проекта: финансовые затраты, временные ресурсы и качество результатов [5]. Выбор данных аспектов обусловлен их фундаментальным влиянием на результативность проектной деятельности и возможностью их количественной оценки. Для обеспечения корректности сравнения и агрегации различных показателей в единую метрику применяется процедура нормализации, приводящая все параметры к единой шкале измере-

ния. Интегральный показатель эффективности Z представлен в виде взвешенной суммы нормализованных показателей, что позволяет учесть относительную важность каждого аспекта в общей оценке эффективности проектного решения.

$$Z = \alpha \cdot F + \beta \cdot L + \gamma \cdot Q \rightarrow \min, \quad (1)$$

где F — нормализованный показатель финансовых затрат, отражающий все виды расходов на реализацию проекта

L — нормализованный показатель временных затрат, характеризующий длительность реализации проекта

Q — нормализованный показатель качества, оценивающий соответствие результатов требованиям

α, β, γ — весовые коэффициенты, определяющие относительную важность каждого аспекта

Весовые коэффициенты подчиняются ограничениям:

$$\begin{cases} \alpha + \beta + \gamma = 1 \\ \alpha, \beta, \gamma \geq 0 \end{cases}, \quad (2)$$

Данная система обеспечивает нормализацию весов и интерпретируемость результатов оценки. Единичная сумма коэффициентов позволяет рассматривать каждый коэффициент как долю влияния соответствующего показателя на общую оценку эффективности.

Взаимосвязь между компонентами модели отражена на FLQ-схеме (рис. 1).

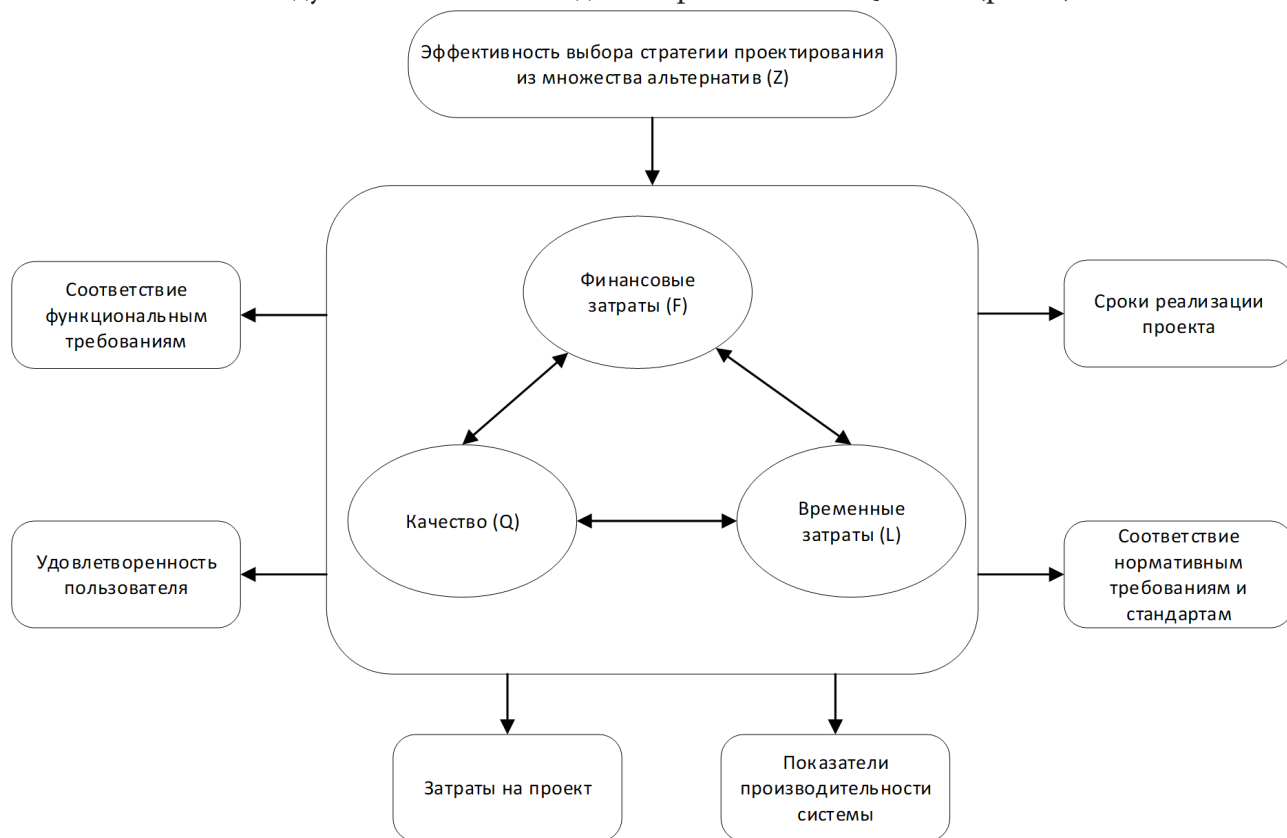


Рис. 1. FLQ-схема оценки проектных стратегий

Ключевой особенностью предложенной модели является механизм динамической корректировки весовых коэффициентов, который обеспечивает адаптивность оценки к изменяющимся условиям проектной среды [3, 5]. В отличие от традиционных подходов, использующих статические веса, разработанный механизм позволяет автоматически перестраивать систему

оценки в ответ на возникающие отклонения и изменения приоритетов. Корректировка весовых коэффициентов осуществляется на каждом временном шаге реализации проекта, что обеспечивает непрерывную актуализацию модели.

$$\alpha(t) = \alpha(t-1) + \Delta\alpha(t), \quad (3)$$

где $\alpha(t)$ — значение коэффициента на текущем шаге

$\alpha(t-1)$ — значение коэффициента на предыдущем шаге

$\Delta\alpha(t)$ — величина корректировки

Величина корректировки определяется на основе анализа отклонений фактических показателей от плановых значений:

$$\Delta\alpha(t) = k \cdot \frac{F_{\text{факт}} - F_{\text{план}}}{F_{\text{план}}}, \quad (4)$$

где k — коэффициент чувствительности, определяющий скорость реакции системы на отклонения

$F_{\text{факт}}$ — фактическое значение показателя

$F_{\text{план}}$ — плановое значение показателя

2. Результаты и обсуждение

Разработанная модель прошла апробацию при реализации проектов по созданию программно-аппаратных комплексов в ООО «Центр интеграции приложений». Исходные весовые коэффициенты были определены на основе экспертных оценок ключевых специалистов, анализа исторических данных по аналогичным проектам, приоритетов заинтересованных сторон.

На начальных этапах проекта были определены исходные весовые коэффициенты:

α (финансовые аспекты) = 0.4,

β (временные аспекты) = 0.3,

γ (качественные аспекты) = 0.3.

В процессе реализации проекта наблюдались отклонения фактических показателей затрат и сроков от плановых значений. Превышение бюджета на 15 % от плановых значений. Отставание от графика на 10 %. Снижение показателей качества на 5 %.

Превышение бюджета привело к корректировке коэффициента α согласно формулам (3) и (4):

$$\Delta\alpha = 0.05 \cdot (1.15 - 1) / 1 = 0.075;$$

$$\alpha(t) = 0.4 + 0.075 = 0.475.$$

Одновременно с этим произошла корректировка других коэффициентов для соблюдения условия $\alpha + \beta + \gamma = 1$.

После нормализации всех коэффициентов получены значения:

$$\begin{cases} \alpha = 0.475 \\ \beta = 0.275 \\ \gamma = 0.250 \end{cases}$$

В результате динамической корректировки весовых коэффициентов модель адаптировалась к изменившимся условиям, повысив приоритет минимизации затрат. Что позволило своевременно принять меры по оптимизации бюджета и избежать критического превышения стоимости проекта.

Аналогичным образом модель реагировала на изменения в сроках и качестве проекта, адаптируя приоритеты оценки. В результате применения динамической модели удалось повы-

силь эффективность проектирования на 10 % и оптимизировать затраты на 8 % по сравнению с базовым сценарием.

Заключение

Разработанный механизм динамической корректировки коэффициентов представляет собой существенный шаг вперед в развитии методов оценки эффективности стратегий проектирования. Предложенная модель демонстрирует значительные преимущества по сравнению с традиционными подходами благодаря своей способности адаптироваться к изменениям проектной среды. Математическая обоснованность модели гарантирует строгое соблюдение условий нормализации весовых коэффициентов и обеспечивает устойчивость процесса корректировки при сохранении интерпретируемости результатов оценки.

Дальнейшее развитие модели может быть направлено на интеграцию с методами машинного обучения для повышения точности прогнозирования отклонений и расширение набора учитываемых факторов эффективности.

Литература

1. Подиновский В. В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений / В. В. Подиновский. – Москва : Издательство Физматлит, 2007. – 64 с.
2. Киселева И. А. Методы оценки рисков и принятия решений в инвестиционных проектах в условиях экономической нестабильности / И. А. Киселева, М. С. Гаспарян, М. В. Карманов, В. И. Кузнецов // Journal of Management & Technology. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 57–68.
3. Набатова Д. С. Математические и инструментальные методы поддержки принятия решений: учебник и практикум для вузов / Д. С. Набатова. – Москва : Издательство Юрайт, 2023. – 292 с.
4. Середенко Н. Н. Сравнительный анализ многокритериальных методов принятия решений / Н. Н. Середенко, Ю. А. Периков, А. А. Дружаев // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2010. – № 1. – С. 83–86.
5. Борzych Н. Ю. Модель оценки эффективности многокритериального выбора стратегии проектирования проектов в организационных системах // Современные тенденции и практические решения в науке: Сборник статей Международной научнопрактической конференции, Москва, 30 июля 2024 г. – Москва: Международный центр «Новые научные исследования», 2024. – С. 12–19.
6. Пономарева З. Р. Модели и методы разработки и принятия управленческих решений // В сборнике: Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. Материалы V Всероссийской научно-практической (с международным участием) конференции, посвященной празднованию 55-летия КГЭУ. В 2-х томах. Казань, 2023. – С. 144–149.

ПОИСК ВСЕХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ О НАЗНАЧЕНИЯХ

Ю. В. Бугаев, И. Ю. Шурупова

*Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия»
им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина*

Аннотация. В работе предлагается метод поиска всех решений закрытой задачи о назначениях. Потребность в их поиске возникает, например, при решении некоторых дискретных задач посредством максимизации функции Лагранжа. Суть метода состоит в сочетании модифицированного симплекс-метода с алгоритмом последовательного просмотра всех вершин графа. Разработана версия симплекс-метода, адаптированная для ускоренного решения задачи о назначениях. Также модифицирован известный алгоритм поиска в ширину на графе. Составлена программа для системы Matlab, реализующая предлагаемый метод.

Ключевые слова: задача о назначениях, поиск всех решений, двойственность, функция Лагранжа, субдифференциал, модифицированный симплекс-метод, базисное решение, заикливание, обратная матрица, поиск в ширину на графе, структура данных типа «очередь».

Введение

Данная задача возникает в следующей ситуации. На практике помимо классической задачи о назначениях часто возникают некоторые ее изменения, связанные, например, с многокритериальностью или наличием дополнительных ограничений. Как показано в [1], эффективным методом решения подобных задач является использование механизма двойственности и поиск максимума функции Лагранжа

$$\max_{\lambda \geq 0} \min_{x \in S} L(x, \lambda) = \max_{\lambda \geq 0} q(\lambda).$$

Значение функции $q(\lambda) = \min_{x \in S} L(x, \lambda)$ определяется некоторым решением специальным образом составленной задачи о назначениях (она получается из исходной посредством преобразований). Как известно, для дискретных задач функция Лагранжа является кусочно-гладкой. В местах склейки ее градиент терпит разрыв и его направление не определяется однозначно. В данном случае разрыв обусловлен тем, что в этих точках задача о назначениях, определяющая функцию $q(\lambda)$, имеет несколько решений. В этом случае для определения направления поиска экстремума приходится использовать субдифференциал целевой функции, который определяется как конус, натянутый на векторы-градиенты функции Лагранжа, каждый из которых порождается одним частным решением задачи о назначениях. Поэтому для обоснованного определения направления поиска экстремума необходимо найти несколько, желательно все, решения задачи о назначениях при фиксированном λ .

1. Описание метода

Изложение метода поиска начнем издалека. Пусть имеем задачу ЛП в канонической форме

$$f = c^T x \rightarrow \min, \quad Ax = b, \quad x \geq 0.$$

Согласно симплекс-методу, начиная с некоторого базиса происходит целенаправленный перебор базисных точек задачи путем замены одной базисной переменной на небазисную. Каждая новая базисная переменная x_j ищется по минимальному коэффициенту c_j в целевой функции для небазисных переменных. Если $c_j < 0$, то переход к новому базису позволит

уменьшить значение целевой функции и процесс поиска решения следует продолжить. Если $c_j > 0$, то найдено единственное оптимальное решение. Если же $c_j = 0$, то смена базиса не изменит значение целевой функции, но позволит найти другие оптимальные решения. Проблема в том, что при обычной смене базиса по схеме симплекс-метода целевая функция монотонно уменьшается и возврат к старому базису невозможен. Если же значение целевой функции не меняется, то почти гарантированно применение схемы симплекс-метод приведет к заикливанию. Поэтому перебор подходящих базисных точек должен осуществляться по принципу перебора вершин циклического графа. Например, это можно делать с помощью поиска в ширину, т. е. с использованием структуры данных типа «Очередь», см. алгоритм [2]:

```

ОЧЕРЕДЬ := ∅;  $v \Rightarrow$  ОЧЕРЕДЬ; НОВЫЙ[ $v$ ] := ложь;
while ОЧЕРЕДЬ <> ∅ do
begin  $p \Leftarrow$  ОЧЕРЕДЬ; <Посетить  $p$ >;
  for  $u \in$  СПИСОК[ $p$ ] do
    if НОВЫЙ[ $u$ ] then
      begin  $u \Rightarrow$  ОЧЕРЕДЬ; НОВЫЙ[ $u$ ] := ложь;
      end;
end.

```

Здесь граф представлен посредством списков инцидентности, согласно которому каждой вершине v соответствует СПИСОК[v] вершин, инцидентных v . Элемент булевского массива НОВЫЙ[v] равен ИСТИНА, если v еще не была посещена. Операции $v \Rightarrow$ ОЧЕРЕДЬ и $p \Leftarrow$ ОЧЕРЕДЬ означают соответственно запись и извлечение элементов из массива ОЧЕРЕДЬ.

В качестве вершин графа будем рассматривать базисные точки, в которых значение целевой функции постоянно и равно $f^{\min}$. Отличие исходного варианта алгоритма от предлагаемого в том, что в исходном варианте структуры СПИСОК и ОЧЕРЕДЬ содержат объекты одного типа — вершины графа, а в предлагаемом алгоритме в ОЧЕРЕДЬ заносятся базисные точки (векторы $\mathbf{P}$ с номерами соответствующих базисных переменных) и сопутствующие параметры, позволяющие восстановить базис $\mathbf{P}$ при откате алгоритма. СПИСОК состоит из номеров переменных, являющихся кандидатами в новый базис. Вместо массива НОВЫЙ для предотвращения заикливания используется список КОРЗИНА уже просмотренных базисов

Предлагаемый алгоритм

```

ОЧЕРЕДЬ := ∅;  $V \Rightarrow$  ОЧЕРЕДЬ;  $V \Rightarrow$  КОРЗИНА;
while ОЧЕРЕДЬ <> ∅ do
begin  $P \Leftarrow$  ОЧЕРЕДЬ;
  <Перейти к базису  $P$ ; вывести  $P$ ; составить СПИСОК[ $P$ ]; >
  for  $x_J \in$  СПИСОК[ $P$ ] do
  begin <Для  $x_J$  выбрать  $x_K$ ; построить базис  $U = (x_J \Leftrightarrow x_K)$ >
    if  $U \notin$  КОРЗИНА then
      begin  $U \Rightarrow$  ОЧЕРЕДЬ;  $U \Rightarrow$  КОРЗИНА;
      end
    end
  end
end
end

```

Замечание. Выбранному x_J может соответствовать несколько x_K . Рекомендуется рассмотреть все варианты нового базиса, т.е. перебрать и проверить все x_K из этого набора.

Для иллюстрации рассмотрим пример поиска.

Имеем задачу ЛП в канонической форме:

$$f = -2x_1 - 2x_2 - 2x_3 \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 2 \\ x_1 + x_5 = 1 \\ x_2 + x_6 = 1 \\ x_j \geq 0 \end{cases}$$

Начальный базис $(x_4, x_5, x_6) = (2, 1, 1)$, $f = -2x_1 - 2x_2 - 2x_3$.

Новый базис $(x_4, x_1, x_6) = (1, 1, 1)$, $f = 2x_5 - 2x_2 - 2x_3 - 2$.

Новый базис $(x_2, x_1, x_6) = (1, 1, 0)$, $f = 2x_4 - 4$.

Целевая функция не содержит отрицательных коэффициентов, следовательно, оптимальное решение $\mathbf{A} = (1, 1, 1)$ найдено. Исходя из этого базиса начинаем обход оптимальной области. Граф, который следует при этом обойти, приведен на рис. 1.

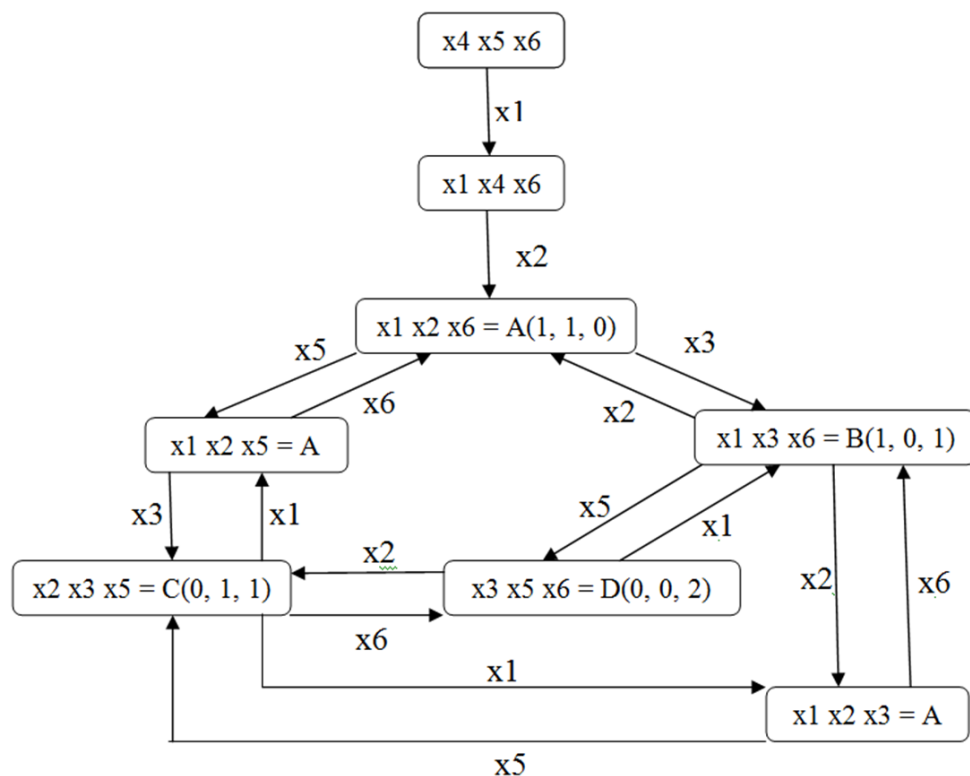


Рис. 1. Граф расположения оптимальных базисных точек

В результате такого обхода найдены 4 точки **A, B, C, D** с одинаковым значением $f^{\min} = -4$.

Теперь вернемся к главной теме — задаче о назначениях. Известно, что задача о назначениях — весьма частный вид задачи ЛП, поэтому в принципе ее можно решить обычным симплекс-методом. Сложность в том, что при формировании соответствующей задачи ЛП размерность используемых массивов существенно возрастает, поэтому симплекс-метод используется здесь только в учебных целях. Для современных компьютеров проблема затраты памяти давно не актуальна, вопрос состоит во влиянии больших объемов данных на быстродействие алгоритма (вычислительную сложность). Предлагается следующий способ ускорения процесса вычисления.

Прежде всего, отметим, что после сведения закрытой задачи о назначениях к задаче ЛП матрица **A** ограничений имеет размеры $(2n \times n^2)$, а ее ранг равен $2n - 1$. (Ниже данный факт доказывается.) Поэтому последнюю строку можно исключить.

Далее обратимся к так называемому модифицированному симплекс-методу. Матрицу системы ограничений представим в виде $\mathbf{A} = [\mathbf{B} \ \mathbf{N}]$, где $\mathbf{B}$ — матрица базиса, $\mathbf{N}$ — матрица, столбцы которой соответствуют небазисным переменным. Соответственно $\mathbf{c} = \begin{pmatrix} \mathbf{c}_B \\ \mathbf{c}_N \end{pmatrix}$, $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_B \\ \mathbf{x}_N \end{pmatrix}$.

Тогда справедливы соотношения

$$\mathbf{x}_B = -\mathbf{B}^{-1}\mathbf{N}\mathbf{x}_N + \mathbf{B}^{-1}\mathbf{b} \quad (1)$$

$$\mathbf{z} = (\mathbf{c}_N - \mathbf{N}^T(\mathbf{B}^{-1})^T \mathbf{c}_B)^T \mathbf{x}_N + ((\mathbf{B}^{-1})^T \mathbf{c}_B)^T \mathbf{b}$$

$\mathbf{z}$ — вектор коэффициентов небазисных переменных целевой функции.

Суть модифицированного симплекс-метода состоит в использовании соотношений (1) для получения базисного решения и представления целевой функции. При смене базиса за счет перестановки столбцов меняются матрицы $\mathbf{B}$ и $\mathbf{N}$. Кроме того применяется эффективное преобразование матрицы $\mathbf{B}^{-1}$ на основе текущей матрицы $\mathbf{B}^{-1}$ и новой матрицы $\mathbf{B}$. Формулы преобразования имеют следующий вид [3].

Обозначим $\bar{\mathbf{B}}$ матрица нового базиса. Пусть r — номер столбца, которым отличаются $\bar{\mathbf{B}}$ и $\mathbf{B}^{-1}$. Введем столбец $\mathbf{g} = \mathbf{B}^{-1}\bar{\mathbf{B}}^{<r>}$, где $\bar{\mathbf{B}}^{<r>}$ — r -й столбец матрицы $\bar{\mathbf{B}}$. Матрица нового базиса формируется по строкам:

$$\left(\bar{\mathbf{B}}^{-1}\right)_{<r>} = \begin{cases} \frac{1}{g_r} \left(\bar{\mathbf{B}}^{-1}\right)_{<r>} , & \text{если } i = r \\ \left(\bar{\mathbf{B}}^{-1}\right)_{<i>} - \frac{g_i}{g_r} \left(\bar{\mathbf{B}}^{-1}\right)_{<r>} , & \text{если } i \neq r \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Здесь $\left(\bar{\mathbf{B}}^{-1}\right)_{<i>}$ — i -я строка матрицы $\bar{\mathbf{B}}^{-1}$.

При большой размерности задачи о назначениях число столбцов матрицы $\mathbf{N}$ значительно больше размера квадратной матрицы $\mathbf{B}^{-1}$. Поэтому, судя по формулам (1) основное машинное время тратится на перемножение матриц $\mathbf{B}^{-1}$ и $\mathbf{N}$. Умножения матрицы на столбец или строку требуют на порядок меньшего времени. Преобразования по формулам (2) по времени также сопоставимо с умножением на столбцы. Таким образом, для ускорения работы алгоритма заменим действие перемножения матриц на умножения матрицы на столбец или строку. Обозначим: $\mathbf{b}, \mathbf{z}$ — векторы свободных членов канонической задачи ЛП и коэффициентов небазисных переменных целевой функции, получающихся при переходе к новому базису; $\bar{\mathbf{N}} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{N}$ — матрица коэффициентов, выражающих базисные переменные через небазисные; $\mathbf{T}^{<J>}, \mathbf{T}_{<K>}$ — J -й столбец и K -я строка произвольной матрицы $\mathbf{T}$, соответственно; a_{KJ} — ведущий элемент преобразования базиса.

Формулы ускоренного преобразования базиса будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{b}} &= \mathbf{B}^{-1} \cdot \mathbf{b}; \quad \bar{\mathbf{N}}^{<J>} = \mathbf{B}^{-1} \cdot \mathbf{N}^{<J>}; \quad \bar{\mathbf{N}}_{<K>} = \mathbf{B}_{<K>}^{-1} \cdot \mathbf{N}; \quad a_{KJ} = \bar{N}_{KJ}; \\ \bar{\mathbf{z}} &= \mathbf{z} - \left(\frac{z_J}{a_{KJ}} \right) \cdot \mathbf{N}_{<K>}; \quad \bar{z}_J = - \left(\frac{z_J}{a_{KJ}} \right); \quad \bar{z}_0 = \mathbf{c}_B^T \cdot \bar{\mathbf{b}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Кроме того, если использовать M -метод при поиске начального базиса, то размерность задачи ЛП существенно увеличивается. Поэтому для задачи о назначениях нами для уменьшения размерности и ускорения счета предложен универсальный начальный допустимый базис, состоящий из следующих переменных:

$$x_{ii} = 1, i = 1, \dots, n; \quad x_{nj} = 0, j = 1, \dots, n-1.$$

Их расположение в матрице решений при $n = 4$ представлено в табл. 1.

Таблица 1

Расположение переменных в начальном базисе

$x_{11} = 1$			
	$x_{22} = 1$		
		$x_{33} = 1$	
$x_{41} = 0$	$x_{42} = 0$	$x_{43} = 0$	$x_{44} = 1$

Тогда начальная матрица **B** содержит следующие элементы:

$$B_{ij} = A_{i, (j-1)(n+1)+1}; B_{i, j+n-1} = A_{i, n(n-1)+j}, i = 1, \dots, 2n-1, j = 1, \dots, n-1; B_{i, 2n-1} = A_{i, n^2}. \quad (4)$$

Соответственно, начальная матрица **N** содержит столбцы матрицы **A**, которые не вошли в **B**.

Для данного начального базиса найдены выражения элементов матрицы **B**⁻¹:

$$\begin{aligned} B_{i,i}^{-1} &= 1; B_{i+n-1,i}^{-1} = -1, B_{2n-1,i}^{-1} = 1, i = 1, \dots, n-1; \\ B_{2n-1,j}^{-1} &= -1; B_{j-1,j}^{-1} = 1, j = n+1, \dots, 2n-1; B_{2n-1,n}^{-1} = 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Остальные элементы матрицы **B**⁻¹ равны 0.

В заключение докажем, что матрица **A** ограничений задачи ЛП имеет ранг равный $2n-1$. Непосредственной проверкой можно убедиться, что при использовании формул (4), (5) для вычисления элементов начальной матрицы **B**⁻¹ выполняется равенство **B** · **B**⁻¹ = **I**. Отсюда можно сделать следующие выводы.

1. Так как ранг произведения матриц не может быть больше ранга сомножителей то матрица **B** первоначального базиса не вырождена и **B**⁻¹ ее обратная матрица.

2. Если умножить последние n строк полной матрицы ограничений закрытой задачи о назначениях на -1 и потом сложить их с первыми n строками, то получим нулевую строку. Значит, ранг матрицы не более $2n-1$. Но поскольку в ней нашелся базисный минор $\det \mathbf{B}$ порядка $2n-1$, то ее ранг в точности равен $2n-1$.

Заключение

По описанному методу была составлена соответствующая программа для системы Matlab. Тестовые расчеты показали, что при размерности задачи о назначениях $n \leq 50$ данный «дважды модифицированный» симплекс-метод по быстродействию сопоставим с методом Мака [4]. Таким образом, предлагаемое сочетание ускоренного модифицированного симплекс-метода с поиском в ширину на графе позволяет найти все решения задачи о назначениях.

Литература

1. Медведева О. А. Модели и алгоритмы решения многокритериальной задачи о назначениях с дополнительными ограничениями / О. А. Медведева. Дисс.... канд. физ.-мат. наук. – Воронеж : 2013. – 157с.
2. Липский В. Комбинаторика для программистов / В. Липский; пер. с польск. – М. : Мир, 1988. – 213 с.
3. Латипова А. Т. Применение линейного программирования в исследовании социально-экономических процессов: учебное пособие / А. Т. Латипова; под редакцией А. В. Панюкова. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 123 с.
4. Банди Б. Основы линейного программирования / Б. Банди; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1989. – 176 с.

РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА

В. Д. Вяткина, К. Г. Резников, Ю. В. Бондаренко

Воронежский государственный университет

Аннотация. Статья посвящена разработке веб-приложения для визуализации работы алгоритма муравьиных колоний (АМК) с локальной коррекцией феромонов для решения задачи коммивояжера. Графическая визуализация маршрутов муравьев, осуществленная с помощью библиотеки Two.js, обеспечивает наглядное представление динамики изменений в процессе итераций. Предлагаемый алгоритм в себя построение кратчайшего пути в графе распределения феромонов и отображение взаимодействия между муравьями в процессе поиска. Разработанный подход демонстрирует адаптивность к изменяющимся условиям задачи, что является важным аспектом для дальнейших исследований в области оптимизации и разработки эффективных алгоритмов для решения комбинаторных задач.
Ключевые слова: муравьиный алгоритм, локальная коррекция феромонов, задача коммивояжера, веб-приложение, визуализация.

Введение

В настоящее время алгоритмы, построенные на природных процессах, получили широкое признание в области вычислительной науки и оптимизации. Одним из таких алгоритмов является алгоритм муравьиных колоний (АМК), который имитирует поведение муравьев. Применением данного алгоритма к задаче коммивояжера, заключающаяся в нахождении кратчайшего маршрута, проходящего через заданный набор городов, представляет собой классическую проблему в области теории графов и оптимизации [1–4].

Сложность задачи коммивояжера возрастает с увеличением числа городов, что делает традиционные методы решения неэффективными. АМК предлагает альтернативный подход, основанный на коллективном поведении муравьев, позволяя находить приближенные решения за меньшее время. Однако для глубокого понимания работы данного алгоритма и его эффективности есть возможность визуализировать его процесс.

Существуют веб-приложения с использованием алгоритма муравьиных колоний, однако во многих из них отсутствует динамическая настройка параметров, не используются гибридные подходы с другими алгоритмами и не используются улучшенные правила обновления феромонов.

Данная статья посвящена разработке веб-приложения, которое позволяет наглядно продемонстрировать работу алгоритма муравьиных колоний в задаче построения кратчайших маршрутов. Визуализация движения колонии муравьев и динамическое построение маршрутов позволяет наглядно следить за построением маршрутов в задаче коммивояжера.

Благодаря интерактивным элементам пользователи имеют возможность экспериментировать с параметрами алгоритма, что позволяет исследовать его поведение в различных начальных условиях и оценивать эффективность стратегий.

1. Алгоритм муравьиных колоний для визуализации движения муравьиных колоний

Рассмотрим этапы решения задачи с применением алгоритма системы муравьиных колоний, представленные на рис. 1.

После определения этапов решения формализуем их через математические модели и алгоритмические формулы. На каждом шаге, начиная с инициализации феромонов и заканчивая обновлением их уровней, можно выделить ключевые параметры, такие как интенсивность феромонов, вероятность выбора пути и критерии завершения. Эти параметры формализуются в виде уравнений, которые описывают поведение муравьев при поиске оптимального решения.

Для предпоследнего этапа решения, который заключается в выборе подходящего алгоритма машинного обучения, необходимо следовать пошаговому алгоритму.

Шаг 1. Инициализация параметров алгоритма муравьиных колоний:

- n — количество городов;
- m — количество муравьев в колонии;
- α — вес феромона;
- β — вес следа феромона и значимость при выборе маршрута;
- $\tau_{ij}(t)$ — количество феромона на пути из города i в j в момент времени t .
- $p_{ij}(t)$ — коэффициент испарения феромона на пути из города i в j в момент времени t .

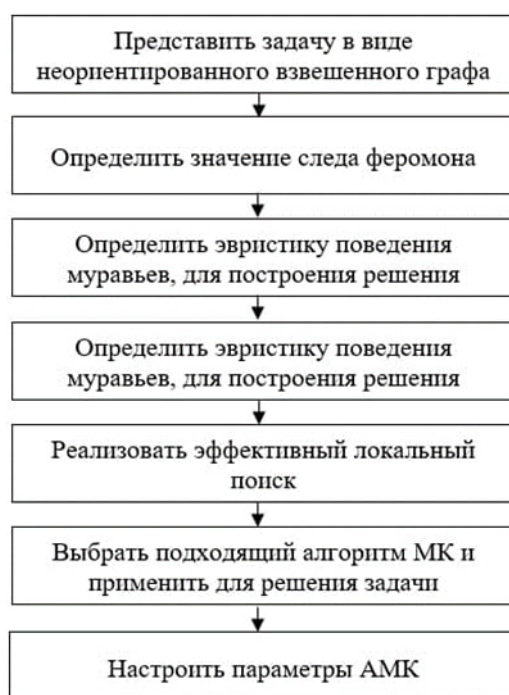


Рис. 1. Этапы решения задачи при помощи муравьиных алгоритмов

Шаг 2. Установить начальное количество феромона $\tau_{ij}(0)$ некоторой константой для каждого пути (i, j) .

Шаг 3. Распределить m муравьев по n городам случайным образом.

Шаг 4. Пока маршрут не завершится для каждого муравья, выполняется:

- выбрать город j для перехода с вероятностью $p_{ij}^k(t)$:

$$p_{ij}^k(t) = \frac{\tau_{ij}^\alpha * \eta_{ij}^\beta}{\sum_{u \in N_j^k} \tau_{iu}^\alpha(t) * \eta_{iu}^\beta(t)}$$

- отметить город j как посещенный в этот маршруте.

Шаг 5. Вычислить продолжительность пути L^k для муравья.

Шаг 6. Найти кратчайший маршрут среди всех муравьев, обновить глобальный кратчайший маршрут, если найден более короткий.

Шаг 7. Обновление количество феромона по формуле:

$$\tau_{ij}(t+n) = p * \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t, t+n)$$

где

$$\Delta\tau_{ij}(t, t+n) = \sum_{k=1}^m \tau_{ij}^k(t, t+n) \quad (1)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k(t, t+n) = \begin{cases} \frac{Q}{L^k} \\ 0 \end{cases} \quad (2)$$

где $\frac{Q}{L^k}$ есть путь из i в j .

Шаг 8. Если требуется продолжить алгоритм, то отчистить путь каждого муравья и перейти на шаг 2. В противном случае, кратчайший маршрут найден.

Для визуализации движения муравьиных колоний в задаче коммивояжера было разработано веб-приложение с использованием представленного алгоритма.

2. Практическая реализация

Веб-приложение реализовано на языке программирования JavaScript с использованием фреймворка Vue.js.

При выборе библиотеки для визуализации данных и создания интерактивных частей важно учитывать специфику задачи и его цели. Для создания графического интерфейса и визуализации движений муравьев был проведен анализ достоинств и недостатков библиотек для визуализации. (табл.1).

При реализации веб-приложения была использована библиотека Two.js. — инструмент для работы с векторной графикой и анимацией, что позволяет создавать визуальные эффекты [6, 7].

Основные аспекты использования Two.js в приложении:

– **Создание графики.** Позволяет создать линии маршрутов между городами, по которым движутся муравьи.

– **Анимация.** В веб-приложении применяется метод *request_Animation_Frame* для обновления позиции муравьев и отрисовки изменений на экране. Это позволяет создать плавную анимацию перемещения.

– **Управление элементами.** С помощью библиотеки предоставляется возможность динамически изменять положение городов.

Таблица 1

Сравнительный анализ библиотек для визуализации движения муравьев

Библиотека	Достоинства	Недостатки
d3.js	1. Позволяет создавать сложные и настраиваемые визуализации, включая интерактивные графики и диаграммы. 2. Широкие возможности по работе с данными, включая привязку данных к элементам DOM.	1. Сложность реализации; 2. При работе с большим количеством элементов производительность может снижаться.
p5.js	1. Имеет интуитивно понятный API; 2. Легкость реализации; 3. Реализация 2D визуализации.	1. Ограниченная функциональность для сложных графиков; 2. При работе с большим количеством элементов производительность может снижаться.

two.js	1. Имеет интуитивно понятный API; 2. Легкость реализации.	1. Ограниченная функциональность; 2. Отсутствие 3D поддержки.
three.js	1. Поддержка 3D визуализация; 2. Поддержка WebGL; 3. Широкий функционал для визуализации.	1. Сложность реализации.
cytoscape.js	1. Позволяет легко работать с графами и сетями. 2. Поддерживает различные форматы данных для импорта и экспорта сетей.	1. Ограниченные возможности для кастомизации визуализаций по сравнению с d3.js. 2. Может потребоваться время на изучение API для эффективного использования всех функций.

Корневая структура проекта веб-приложения организована с учетом удобства разработки и поддержки кода. Главным каталогом исходного кода является *src*. Внутри каталога *src* расположены следующие каталоги и файлы:

components — каталог компонентов Vue-приложения, реализующие основные функциональные блоки:

- Graph.js — компонент, отвечающий за визуализацию графа, на котором осуществляется поиск кратчайшего пути.

- AntColony.js — компонент, реализующий алгоритм муравьиных колоний, который управляет поведением муравьев и их взаимодействием с графом.

- Drawer.js — компонент, отвечающий за отрисовку элементов на экране и обновление визуализации в реальном времени.

App.vue — файл корневого компонента приложения, который объединяет все компоненты и управляет их состоянием.

Каждый компонент в каталоге **components** имеет четко определенные функции и отвечает за отдельные аспекты работы приложения. Это позволяет легко модифицировать и расширять функциональность проекта. Структура каталогов организована таким образом, чтобы обеспечить высокую степень переиспользуемости кода и поддерживать чистоту архитектуры.

Перейдем к практическому примеру работы приложения.

Рассмотрим пример работы веб-приложения для сетевого графика «вершина-город».

Координаты городов (x, y) задаются случайными числами в пределах от 0 до 400 с уникальным идентификатором. Таблица входных параметров приложения представлена в табл. 2.

Таблица 2

Входные параметры приложения

Количество городов	5
Количество муравьев	10
Вес феромона	1
След феромона	5
Коэффициент испарения	0,5
Количество итераций	10
Скорость	100

Скорость движения муравьев по умолчанию задана значением 100. Однако в веб-приложении реализовано управление скоростью по маршруту с помощью свойства класса и мето-

да установки значения. Это позволит динамически изменять скорость движения муравьев во время анимации.

Далее генерируются маршруты и обновляются феромоны. Результаты работы алгоритма передаются в компонент *Drawer.js* для отрисовки графика. Полученный результат представлен на рис. 2.

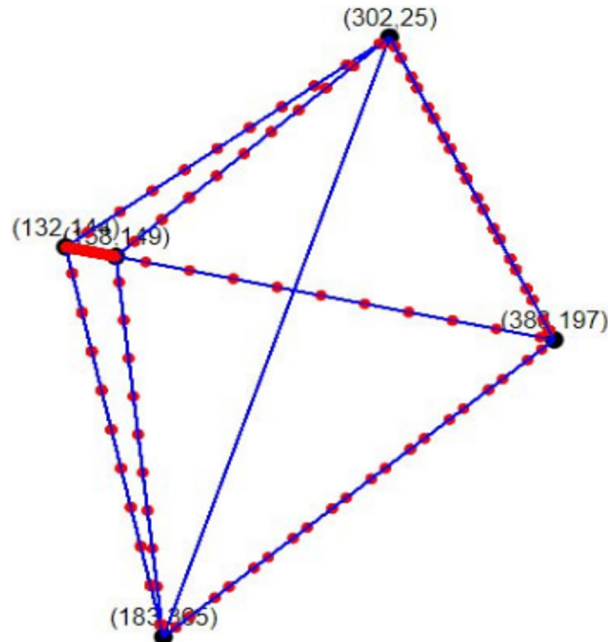


Рис. 2. Результат визуализации приложения

Приложение демонстрирует основные принципы работы алгоритма и предоставляет пользователю интерактивный интерфейс для наблюдения за процессом поиска оптимального решения.

Несмотря на эффективность представленного решения, существует множество других веб-реализаций, которые также предлагают различные подходы к визуализации муравьиного алгоритма. Проведем анализ и сравнение существующих веб-приложений, выделяя их сильные и слабые стороны.

Рассмотрены различные веб-приложения и проведен сравнительный анализ их ключевых аспектов в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительная таблица достоинств и недостатков приложений

Проект	Достоинства	Недостатки
Aco-visualizer [8]	1. Возможность настройки параметров алгоритма и регулирования скорости движения муравьев. 2. Возможность динамического перемещения вершин графа. 3. На граф выведены расстояния между городами. 4. Вывод результата кратчайшего маршрута.	1. Отсутствие возможности загрузки пользовательских данных и сохранения результатов работы в файл. 2. Приложение использует простой муравьиный алгоритм. 3. Отсутствие анимации передвижения муравьев по маршрутам.

Visualisation of Ant Colony Optimisation [9]	1. Возможность настройки параметров алгоритма и регулирования скорости движения муравьев. 2. Возможность экспортировать значения координат городов в Excel-файл. 3. Реализована анимация передвижения муравьев по городам.	1. Отсутствие возможности загрузки пользовательских данных и сохранения результатов работы в файл. 2. Приложение использует простой муравьиный алгоритм. 3. Отсутствие визуализации значений координат городов и расстояний между ними.
--	--	---

На рис. 3 представлены результаты работы приложений Aco-visualizer и Visualisation of Ant Colony Optimisation соответственно.

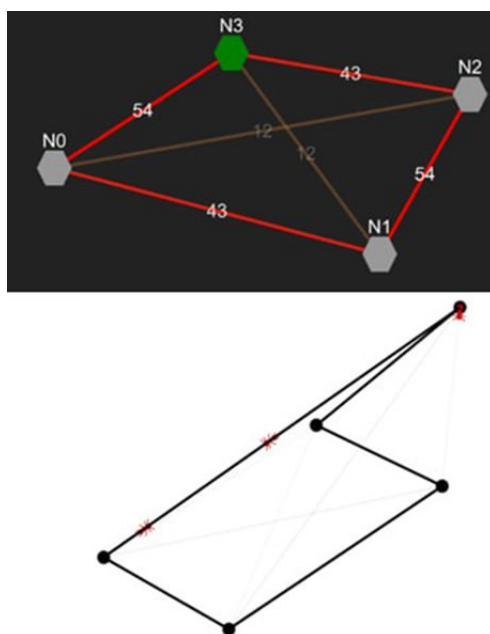


Рис. 3. Результат работы приложения Aco-visualizer и Visualisation of Ant Colony Optimisation

В веб-приложении выделен ряд преимуществ по сравнению с реализованными:

- Реализована возможность настройки параметров алгоритма и регулирования скорости движения муравьев.
- Реализована визуализация значений координат городов.
- Реализована анимация передвижения муравьев по городам.
- Вывод результата кратчайшего маршрута и его дистанция.
- Использование локальной корреляции, для ускорения работы алгоритма на больших данных.

Заключение

В результате исследования было разработано веб-приложение для визуализации работы алгоритма муравьиных колоний в задаче коммивояжера.

Рассмотрен процесс движения муравьев по вершинам графа. Описан алгоритм муравьиных колоний для вычисления кратчайшего пути в задачи коммивояжера. Проведен сравнительный анализ библиотек для визуализации движения муравьев.

Представлен пример работы алгоритма на входных данных. Проведен сравнительный анализ разработанных приложений для визуального решения задачи коммивояжера. Выделены преимущества и недостатки реализованных приложений.

Визуализация позволяет не только продемонстрировать эффективность алгоритма в поиске оптимальных маршрутов, но и облегчить восприятие его работы пользователями с разным уровнем подготовки.

Использование интерактивных элементов способствует глубокому погружению в процесс, что может быть особенно полезно в образовательных целях. Дальнейшие исследования могут сосредоточиться на улучшении алгоритма, интеграции дополнительных функций и расширении возможностей приложения, что позволит повысить его функциональность и адаптивность к различным задачам.

Литература

1. НОУ ИНТУИТ Муравьиные алгоритмы. Режим доступа: <http://www.intuit.ru/studies/courses/14227/1284/lecture/24190?page=4>. Дата обращения: 05.09.2024.
2. *Christofides N.* Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem / N. Christofides // Operations Research Forum. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – Vol. 3, № 1. – P. 20.
3. *Wang Y.* Ant colony optimization for traveling salesman problem based on parameters optimization / Y. Wang, Z. Han // Applied Soft Computing. – 2021. – Vol. 107. – P. 107439.
4. МакКоннелл Дж. Основы современных алгоритмов / Дж. МакКоннелл. – Москва : Техносфера, 2004. – 368 с.
5. *Wu G.* Ensemble strategies for population-based optimization algorithms — a survey / G. Wu, R. Mallipeddi, P. N. Suganthan // Swarm and evolutionary computation. – 2019. – Vol. 44. – P. 695–711.
6. Резников К. Г. Разработка программного обеспечения для визуализации трехмерных поверхностей в веб-браузере / К. Г. Резников, С. Н. Медведев // Вестник ВГТУ. – Том 17, №6. – Воронеж : ВГТУ, 2021. – С. 13–19.
7. Резников К. Г. Разработка программного обеспечения для визуализации процессов полимеризации / К. Г. Резников, С. Л. Подвальный // Вестник ВГТУ. – Том 19, № 2. – Воронеж: ВГТУ, 2023. – С. 7–14.
8. Aco-visualizer. Режим доступа: <https://github.com/cbussUOL/aco-visualizer?tab=readme-ov-file>. Дата обращения: 04.09.2024.
9. Visualization of Ant Colony Optimization. Режим доступа: <https://poolik.github.io/visual-aco/#/visualisation>. Дата обращения: 04.09.2024.

РАЗРАБОТКА WEB-ПРИЛОЖЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДБОРА ПЕРСОНАЛА МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

К. Д. Вяткина, К. Г. Резников, Ю. В. Бондаренко

Воронежский государственный университет

Аннотация. В данной статье представлена разработка веб-приложения для интеллектуальной системы подбора персонала, основанной на модифицированном методе анализа иерархий (МАИ). Система предназначена для оптимизации процесса поиска сотрудников с учетом требований и возможностей сторон. Разработанное веб-приложение на языке программирования Java с использованием фреймворка Spring предоставляет интерактивный интерфейс для пользователей. При помощи системы пользователи могут задавать требования к вакансии, оценивать кандидатов по различным критериям, и получать результаты ранжирования кандидатов в реальном времени.

Ключевые слова: метод анализа иерархий, многокритериальная задача о назначениях, сетевая торговая организация, модификация метода анализа иерархий, веб-приложение.

Введение

В условиях современной конкурентной среды, поиск и подбор квалифицированного персонала стали критическим фактором успеха для любой организации. Успех бизнеса напрямую зависит от наличия сотрудников, способных эффективно решать поставленные задачи и вносить значительный вклад в достижение целей компании. При этом, для достижения устойчивого развития компании должна быть обеспечена не только удовлетворенность работодателя работой сотрудников, но и удовлетворенность сотрудников теми условиями труда, которые обеспечивает работодатель.

Традиционные методы подбора персонала зачастую сталкиваются с неспособностью обеспечить объективную оценку кандидатов и оптимальное соответствие их компетенций требованиям должности. Субъективность в оценке, неполное представление о кандидате и недостаточный учет специфических требований должности могут привести к неэффективному подбору персонала, потере времени и ресурсов, а также к снижению производительности, финансовых результатов и ослаблению конкурентных позиций компании [1, 2].

Существует ряд методов и алгоритмов, которые применяются для оценки качества принятых решений. Базовые концепции методов оценивания включают: метод парного сравнения альтернатив, ранжирования, классификации и численную оценку [3–5].

Для снижения субъективности в оценках и поиске структурированного подхода к подбору персонала, в данной статье представлена разработка веб-приложения интеллектуальной системы подбора персонала, которая использует метод анализа иерархий (МАИ) для объективной оценки кандидатов.

Рассмотрим модифицированный метод многокритериального анализа, который позволяет структурировать сложную задачу подбора персонала, за счет присвоения веса важности критериям, которые являются ключевыми для определенной должности.

1. Метод сопоставления требований и возможностей сторон

Для постановки задачи рассмотрим филиал торговой компании, которая представлена в городе некоторым множеством торговых точек. Каждый филиал имеет в своей команде раз-

личных специалистов. Будем предполагать, что в каждом филиале имеется ровно одна вакантная должность.

Пусть в филиале имеется n вакантных рабочих мест и n кандидатов на эти вакантные места. Задача состоит в том, чтобы распределить сотрудников по филиалам с учетом требований компании и предпочтений кандидатов (рис. 1).

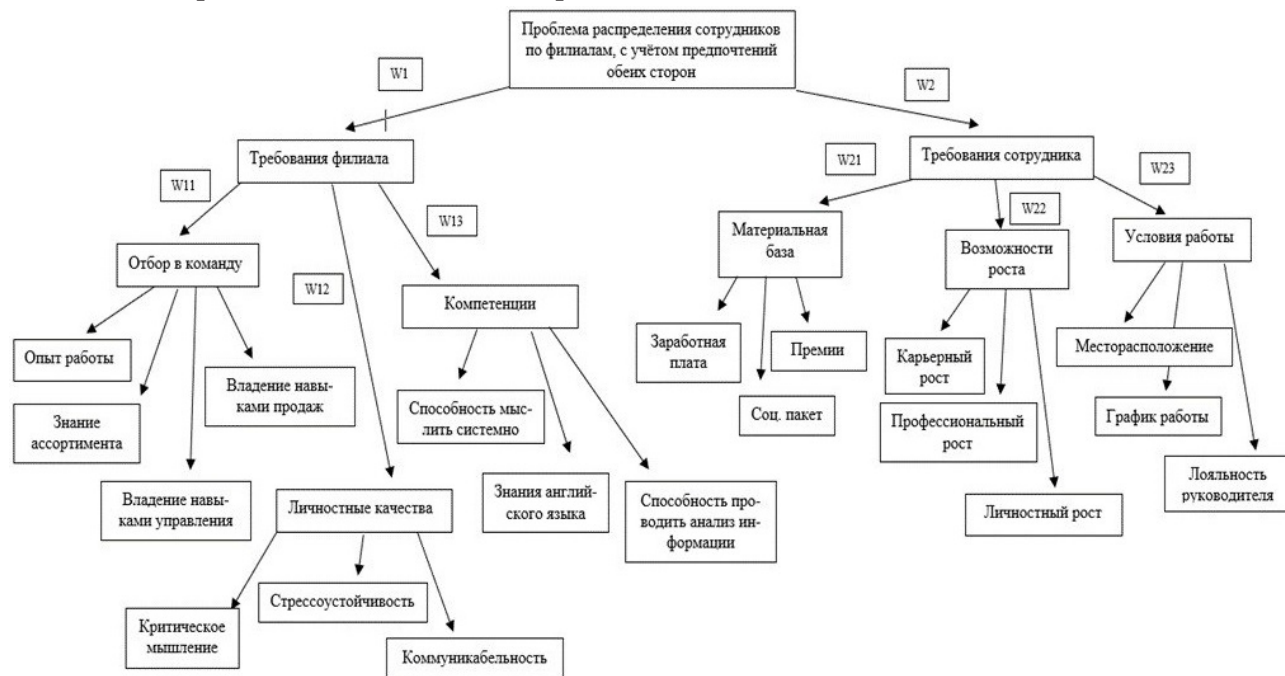


Рис. 1. Иерархия проблемы распределения сотрудников

Для формальной постановки многокритериальной задачи о назначениях необходимо определить ряд терминов, понятий и обозначений [2, 5].

Введем обозначение для первого множества и назовем его субъектами (сотрудниками):

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n\}. \quad (1)$$

Второе множество:

$$M = \{M_1, M_2, \dots, M_j, \dots, M_n\}. \quad (2)$$

— объекты (вакантные места в филиалах).

Введем два множества оценок: a — множество критериев для оценки кандидатов; b — множество критериев для выбора кандидатов филиала.

Введем обозначения для критериев отбора для кандидата:

$$H = \{H_1, H_2, \dots, H_a\}. \quad (3)$$

Критерии отбора, которые выдвигает кандидат для вакансии:

$$R = \{R_1, R_2, \dots, R_b\}. \quad (4)$$

Тогда оценки кандидата P_i по критериям H будем обозначать:

$$H(P_i) = H_1(P_i), H_2(P_i), \dots, H_a(P_i). \quad (5)$$

Оценки требований филиала M_j к кандидатам:

$$H(M_j) = H_1(M_j), H_2(M_j), \dots, H_a(M_j). \quad (6)$$

Следовательно, оценки требований кандидата P_i по критериям R будет выглядеть следующим образом:

$$R(P_i) = R_1(P_i), R_2(P_i), \dots, R_b(P_i). \quad (7)$$

А оценки возможностей филиала M_j по критериям R :

$$R(M_j) = R_1(M_j), R_2(M_j), \dots, R_b(M_j). \quad (8)$$

Критериальным соответствием будет называться разница по одному из критериев между требованиями субъекта и возможностями объекта. Требования филиала и кандидата будут считаться выполненными, если:

$$R_b(P_i) \geq R_b(M_j) \quad (9)$$

$$\text{и } H_a(M_j) \geq H_a(P_i) \quad (10)$$

Назначением будет считаться любая пара $\{P_i, M_j\}$, которая составлена с помощью двух элементов, относящихся к разным первоначальным множествам. Будет существовать множество назначений:

$$\{P_i, M_j\}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

для двух первоначальных множеств по n элементов: $P\{n\}, M\{n\}$. Пара, для которой обоюдные требования полностью выполнены по всем критериям называются *идеальным назначением*.

Первоначальная проблема многокритериального выбора представляется в виде многоуровневой иерархии, где на нулевом уровне находится описание проблемы выбора, на первом — основные критерии, по которым будут оцениваться альтернативы, на втором уровне подкритерии основных критериев (если они возможны) и т. д. На последнем уровне — возможный перечень альтернатив.

На втором этапе осуществляется определение приоритетов критериев и оценка каждой альтернативы согласно этим критериям для выбора наиболее предпочтительного варианта. Затем формируется матрица попарных сравнений для каждого критерия, сравнивающая текущий уровень с предыдущим.

Принцип сравнительных оценок. Для определения приоритетов критериев и получения оценок для альтернативных решений в методе многокритериального анализа решений (МАИ) применяется метод парных сравнений, что предполагает создание матриц для этих сравнений

$$W = \|w_{ij}\|, w_{ij} = \frac{w_i}{w_j}, \quad (12)$$

где w_i — вес i -го элемента иерархии.

Набор весовых коэффициентов $w_i, i = 1, \dots, k$, вычисляемый по матрице парных сравнений, должен удовлетворять следующим условиям:

$$w_{ij} = \frac{w_i}{w_j}, \quad i, j = 1, \dots, k; \quad \sum_{i=1}^k w_i = 1. \quad (13)$$

На финальном этапе определяются собственные векторы матриц с помощью их собственных чисел, а далее проводится синтез глобальных приоритетов альтернатив относительно глобальной цели (проблемы). С помощью коэффициентов относительной важности общих и частных критериев определяются веса, которые далее будут использованы при расчете интегрального критерия.

В результате двухступенчатая иерархическая структура критериев выбора K (рис. 2), характеризующая альтернативы, сводится к одноступенчатой, далее все частные критерии объединяются в одно множество с целью упрощения индексов.

Следующим шагом в многокритериальной задаче о назначениях является использование абсолютных и относительных оценок элементов двух множеств. Относительные оценки предполагают просмотр параметров элементов сравнительных характеристик ориентировочных претендентов на вакансию.

Для определения степени сопоставления элементы первого множества соотносятся с элементами второго и наоборот. Полученные значения позволяют предположить качество назначений.

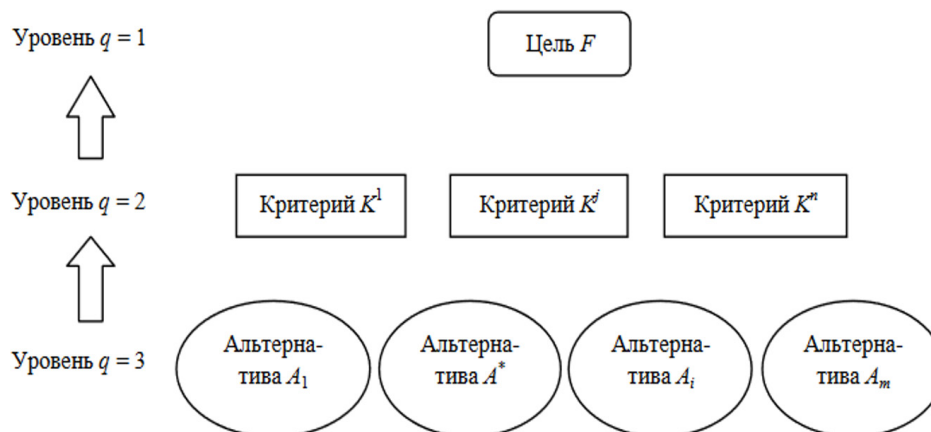


Рис. 2. Иерархическая структура проблемы выбора наилучшей альтернативы

Согласно установленным правилам, взаимосвязь между элементами субъектов и объектов может быть описана вектором соответствия:

$$T_{ij_k} (i, j = 1, 2, \dots, n), \quad (14)$$

k -е звено, которое демонстрирует уровень соответствия параметров элементов по k -му критерию. В конечном итоге, на этом этапе эквивалентным понятием «критериальное соответствие по k -му критерию» является компонент вектора соответствия, вычисляемый на основе следующего принципа:

$$T_{ij_k} = \begin{cases} 0, & \text{если } R_k(P_i) \geq R_k(M_j); \\ r_k, & \text{если } R_k(P_i) < R_k(M_j); \end{cases} \quad (15)$$

где $R_k(P_i)$ — требование элемента одного множества на шкале требований по k -му критерию; $R_k(M_j)$ — соответствующие возможности элемента второго множества на шкале возможностей того же k -го критерия.

Предлагаемый подход к решению данной задачи основывается на сведении задачи к одно-критериальной задаче о назначениях и последующим решением Венгерским методом.

2. Программная реализация веб-приложения

Веб-приложение интеллектуальной системы подбора персонала реализовано на языке программирования *Java* с использованием фреймворка *Spring*. Он позволяет обеспечить высокую производительность, гибкость и масштабируемость системы.

Веб-приложение доступно через браузер и работает по принципу «клиент-сервер»: исходный код приложения загружается с сервера на устройство пользователя, а затем интерпретируется и запускается в браузере. Благодаря использованию *Java* и *Spring*, система может работать на различных устройствах (компьютерах, смартфонах, планшетах), независимо от используемой операционной системы [6–8].

При разработке приложения учитывались ограничения веб-браузеров и вычислительной мощности устройств. Для организации структуры проекта и ускорения разработки использовался фреймворк *Spring*.

Spring предоставляет инструменты для структурирования приложения, управления зависимостями, обработки запросов и ответов, а также обеспечивает интеграцию с другими технологиями.

В результате, *Spring* в сочетании с *Java* позволяет создать мощное и гибкое веб-приложение, способное решать сложные задачи подбора персонала, с возможностью постоянного расширения и доработки.

Веб-приложение имеет следующий функционал:

- Добавление вакансий. Ввод информации о вакансиях, включая название, описание, требования и предпочтения;
- Ввод данных о кандидатах. Ввод информации о кандидатах, включая опыт работы и другие данные;
- Оценка кандидатов. Оценка кандидатов с помощью МАИ, включая ввод весов критериев и сравнительную оценку кандидатов по каждому критерию;
- Визуализация результатов. Отображение результатов оценки МАИ в виде диаграммы.

Веб-приложения имеет следующую структуру классов (рис. 3):

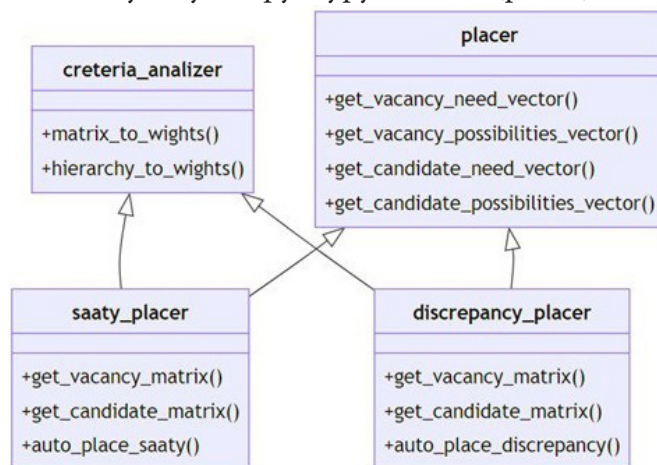


Рис. 3. Структура классов

Класс **criteria_analyzer** содержит реализацию метода анализа иерархий.

- *matrix_to_wights* — преобразует матрицу попарных сравнений в веса признаков;
- *hierarchy_to_wights* — преобразует иерархию критериев в веса, используя их матрицы попарных сравнений.

Класс **placer** содержит общие методы для различных видов решений среди них:

- *get_vacancy_need_vector* — извлечение четверок (критерий, значение, минимальное допустимое значение, максимальное значение) для потребностей вакансии;
- *get_vacancy_possibilities_vector* — извлечение двоек (критерий, значение) для возможностей вакансии;
- *get_candidate_need_vector* — извлечение четверок (критерий, значение, минимальное допустимое значение, максимальное значение) для потребностей кандидата;
- *get_candidate_possibilities_vector* — извлечение двоек (критерий, значение) для возможностей кандидата.

Класс **saaty_placer** для решения задачи о назначениях. Используя метод анализа иерархий Саати, задача о назначениях сводится к однокритериальной задаче.

- *get_vacancy_matrix* — метод для сбора матрицы «удовлетворенности» вакансий (разница потребности вакансии и возможности кандидата, умноженная на все критерии);
- *get_candidate_matrix* — метод для сбора матрицы «удовлетворенности» кандидатов (разница потребности кандидата и возможности вакансии, умноженная на все критерии);
- *auto_place_saaty* — метод для сведения многокритериальной задачи к однокритериальной, с последующим решением Венгерским методом.

Класс **discrepancy_placer** для решения задачи о назначениях, используя для сведения к однокритериальной задаче минимальные и максимальные значения критериев.

- *get_vacancy_matrix* — метод для сбора матрицы «удовлетворенности» вакансий;
- *get_candidate_matrix* — метод для сбора матрицы «удовлетворенности» кандидатов;

– *auto_place_discrepancy* — метод для сведения многокритериальной задачи к однокритериальной задаче, с последующим решением Венгерским методом.

Для хранения данных и передачи их между компонентами была разработана архитектура базы данных (рис. 4).

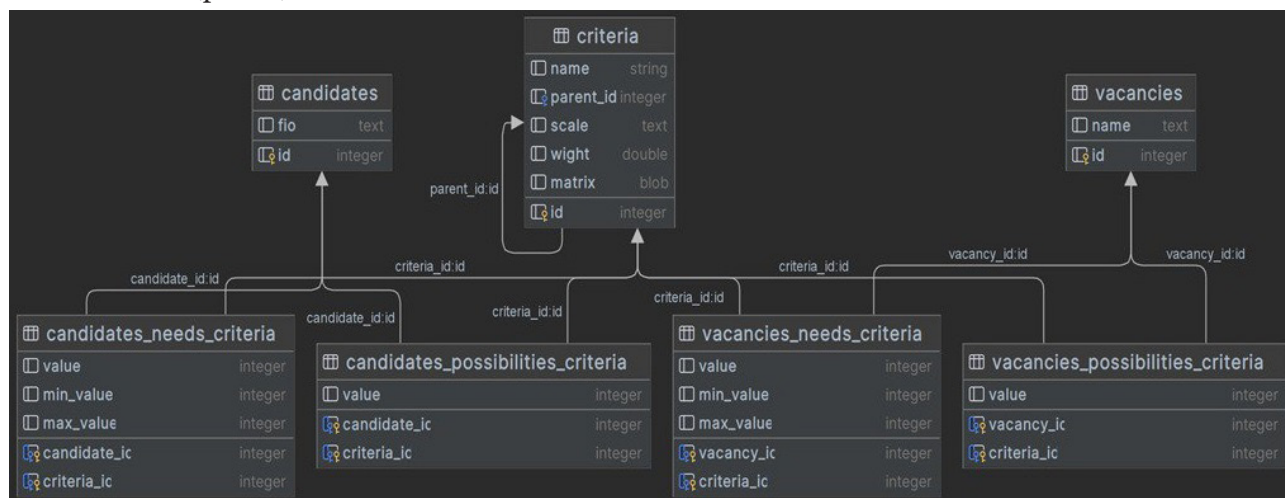


Рис. 4. Схема базы данных

3. Анализ и результаты работы веб-приложения

Рассмотрим пример работы веб-приложения для получения назначений кандидатов на должности. Требуется сформировать исходную матрицу, состоящую из оценки пар « $P_i - M_j$ ».

Для формирования матрицы соответствия кандидатов и должностей необходимо заполнить базу данных информацией о кандидатах и вакансиях. Для этого в стартовом окне программы предусмотрены две вкладки: «Кандидаты» и «Вакансии» (рис. 5).

Кандидаты			Вакансии		
Потребности			Потребности		
Возможности			Возможности		
id	Название		id	Название	
1	1	Кандратьев Вячеслав Семёнович	1	1	Начальник отдела маркетинга
2	2	Васильева Анастасия Дмитриевна	2	2	Начальник отдела продаж
3	3	Семенов Анатолий Александрович	3	3	Производственный директор
4	4	Бочаров Дмитрий Валерьевич	4	4	Администратор
5	5	Кожевникова Наталья Андреевна	5	5	Менеджер по продажам
6	6	Большакова Дарья Дмитриевна	6	6	Старший кассир
7	7	Солопова Виктория Александровна	7	7	Продавец-консультант
Добавить кандидата			Добавить вакансии		

Рис. 5. Справочники «Кандидаты» и «Вакансии»

В системе реализована иерархическая структура критериев, которая позволяет учитывать как требования филиала, так и требования сотрудника (рис. 6). На первом уровне иерархии представлены две основные группы критериев: «Требования филиала» и «Требования сотрудника».

При выборе каждой из этих групп открывается второй уровень иерархии, который содержит шесть конкретных критериев, по которым будут оцениваться кандидаты (рис. 1).

Кандратьев Вячеслав Семёнович

Возможности

Опыт работы

1. Небольшой (меньше года)
2. Средний (от 1 до 3 лет)
3. Большой (от 3 до 5 лет)

Знание ассортимента

1. Базовые (знание характеристик, артикула)
2. Средние (знание характеристик, артикула, свойств);
3. Высокие (знание характеристик, артикула, свойств, преимуществ, недостатков)

Потребности

Зарботная плата

1. Низкий (до 35 тысяч)
2. Средний (от 35 тысяч до 60 тысяч рублей)
3. Высокий (выше 60 тысяч рублей)

Соц. пакет

1. Отсутствует
2. Частичный
3. Полный

Премии

1. Ежемесячные

Рис. 6. Требования и возможности кандидата

Для оценки важности каждого критерия используется матрица парных сравнений. После заполнения матриц проводится расчет весовых коэффициентов для каждого критерия. На финальном этапе представляются результаты распределения в виде схемы (рис. 7).

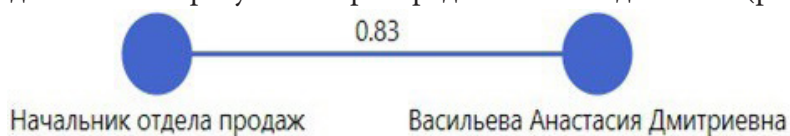


Рис. 7. Схема идеального назначения

Для оценки функциональных возможностей разработанного веб-приложения предлагается сравнение с существующим одностраничным веб-приложением «Альтернатива» [8] (рис. 8).

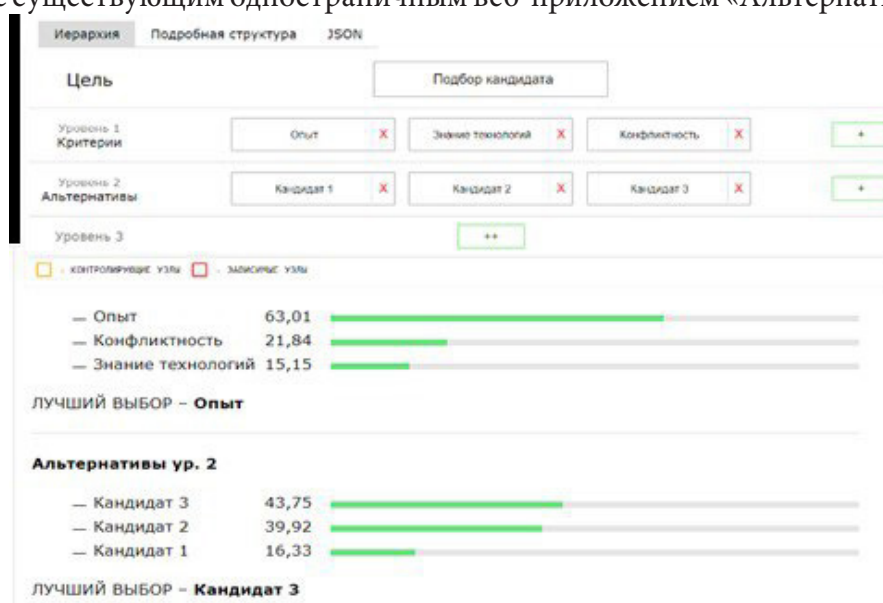


Рис. 8. Иерархическая структура и выбор наилучшего кандидата в приложении «Альтернатива»

Разработанное веб-приложение обладает значительно более развитой функциональностью по сравнению с веб-приложением «Альтернатива», обеспечивая более эффективный и гибкий подход к решению задачи подбора персонала.

Следует отметить, разработанное веб-приложение предоставляет возможность учета требований как со стороны вакансии, так и со стороны кандидата, что позволяет учитывать все важные факторы при подборе сотрудника. Веб-приложение «Альтернатива» ограничено в своей функциональности и не позволяет согласовывать предпочтения кандидата с возможностями вакансии.

Кроме того, разработанное веб-приложение использует многоуровневую иерархическую структуру критериев, что позволяет более глубоко анализировать соответствие кандидатов и вакансий. Иерархический подход обеспечивает более точную оценку и учитывает все важные факторы. Веб-приложение «Альтернатива» не предусматривает иерархическую структуру, что ограничивает возможности анализа и делает процесс подбора менее эффективным.

Также, разработанное веб-приложение имеет встроенную базу данных для хранения информации о кандидатах и вакансиях. Это позволяет систематизировать данные, создать историю подбора персонала и использовать информацию в будущем. Веб-приложение «Альтернатива» не имеет встроенной базы данных, что делает его менее функциональным и не позволяет сохранять информацию о кандидатах и вакансиях.

Таким образом, разработанное веб-приложение предлагает более развитый и гибкий инструмент для подбора персонала, который учитывает все важные аспекты процесса подбора и предоставляет пользователю более продвинутые возможности. Веб-приложение «Альтернатива» ограничено в своих функциях и не может обеспечить столь эффективный подбор персонала.

Заключение

В данной статье представлена разработка веб-приложения интеллектуальной системы подбора персонала, основанной на методе анализа иерархий (МАИ).

Разработанное веб-приложение предлагает комплексный подход к оценке кандидатов, учитывая множество критериев и их относительную важность. Система позволяет автоматизировать процесс оценки, минимизируя субъективные факторы и упрощая работу HR-специалистов.

В статье рассмотрен метод анализа иерархий, который представлен с использованием метода сопоставления требований и возможностей сторон. Этот подход позволяет структурировать процесс оценки, определять ключевые факторы успеха для конкретной должности и создавать весовую систему для объективной оценки кандидатов.

Метод сопоставления требований и возможностей сторон показал высокую эффективность при применении МАИ для подбора персонала, позволив создать объективную систему оценки кандидатов.

Результаты тестирования подтвердили практическую применимость разработанной системы. Система успешно прошла тестирование на входных данных и продемонстрировала способность оценивать кандидатов с высокой точностью.

Литература

1. Бондаренко Ю. В. Экспертно-тестовый механизм комплексной оценки кандидатов при подборе персонала / Ю. В. Бондаренко, И. В. Горошко, Е. В. Васильчикова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 116–124.

2. Бондаренко Ю. В. Модели, алгоритм и программное обеспечение формирования команды сотрудников для филиалов сетевой торговой организации / Ю. В. Бондаренко, А. А. Баженова, К. Д. Вяткина // Проектное управление в строительстве. – 2022. – № 2(27). – С. 110–117.
3. Корниенко В. П. Методы многокритериального оценивания объектов с многоуровневой структурой показателей эффективности / В. П. Корниенко. – Москва : МАКС Пресс, 2018. – 296 с.
4. Азарнова Т. В. Модели и методы принятия решений: учебное пособие для вузов / Т. В. Азарнова, Ю. В. Бондаренко, Н. Б. Баева, Е. С. Дашкова, В. В. Ухлова. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2020. – 310 с.
5. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решения, а также Хроника событий в Волшебных странах: учебник / О. И. Ларичев. – Москва : Логос, 2002. – 2-е изд. перераб. и доп. – 392 с.
6. Резников К. Г. Разработка программного обеспечения для визуализации трехмерных поверхностей в веб-браузере / К. Г. Резников, С. Н. Медведев // Вестник ВГТУ. – Том 17, № 6. – Воронеж : ВГТУ, 2021. – С. 13–19.
7. Резников К. Г. Разработка программного обеспечения для визуализации процессов полимеризации / К. Г. Резников, С. Л. Подвальный // Вестник ВГТУ. – Том 19, № 2. – Воронеж : ВГТУ, 2023. – С. 7–14.
8. Реализация приложения «Альтернатива». Режим доступа: <https://alleaxxrmca.github.io/DssAlternativeV3/>. Дата обращения: 15.10.2024.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ОДНОПЛАТНЫХ GPS-СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ С СИСТЕМОЙ ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ

В. А. Казбанов, М. С. Курицкий, А. Н. Алещенко, В. М. Анискевич

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

Аннотация. В статье предлагается эффективный и недорогой вариант создания высокоскоростной одноплатной измерительной установки для снятия показаний промышленной электросети. Особое внимание уделяется стабильности частоты осциллятора, достигаемой при помощи GPS-синхронизации и фазовой автоподстройки. Авторами также рассматривается теоретическая сторона процессов оптимизации энергетической инфраструктуры на примере технологии Smart Grid.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, ARM, STM32, GPS-синхронизированный АЦП, измерительная установка, измерение и обработка параметров электрического сигнала.

Введение

Нагрузка на современные энергосети растёт с каждым днём, что создаёт новые вызовы для мировой энергетики. К таким вызовам можно отнести и активный переход к экологически-чистым и возобновляемым источникам энергии, поскольку эффективность и надёжность этих источников остаётся главной нерешённой проблемой. Солнечные и ветряные источники по своей природе не могут выдавать стабильную и постоянную во времени мощность в сеть, тем самым провоцируя в худшем случае масштабные системные сбои и даже полные отключения целых участков сетей. Очевидным становится тот факт, что мировые промышленные электросети в текущем своём состоянии в полной мере не соответствуют подобного рода источникам энергии и нуждаются в существенной доработке, в том числе посредством внедрения в сеть информационных систем мониторинга и управления для своевременного обнаружения критических показателей и превентивного предотвращения аварийных ситуаций.

Одним из передовых направлений развития в данной области является технология так называемых «умных сетей» (Smart Grid), позволяющая оптимизировать производство, распределение и потребление электроэнергии [1]. Особое же внимание в процессе имплементации умных сетей уделяется использованию высокоточных измерителей различных параметров электрической сети в реальном времени. Такие устройства играют ключевую роль в повышении точности и надёжности измерений, критически важных для эффективного управления электроэнергией.

Авторами данной статьи предлагается недорогое, но эффективное решение частной задачи по снятию и обработке показаний реальной электрической сети на базе одноплатного GPS-синхронизированного измерителя с системой точного времени.

1. Технология Smart Grid и её возможности

Smart Grid или активно-адаптивные сети — это энергетическая инфраструктура, интегрирующая энергетические подсистемы, коммунальные сети, базы данных и управление бизнес-процессами. Внедрение такой интеллектуальной системы позволяет обеспечить рациональное потребление, оперативное изменение генерирующих мощностей, противоаварийное управление, энергосбережение, надёжное и качественное обеспечение электроэнергией, ре-

гулирование потоков и объёмов энергоресурсов [1]. Идеология Smart Grid — формирование единой энергоинформационной системы, где диспетчерские функции, автоматические системы, принятие плановых и инвестиционных решений объединяются в самоорганизующейся адаптивной системе. Измерения с частотой в несколько десятков герц позволяют отслеживать изменения в работе и формировать динамику ожиданий [2].

Одним из образующих звеньев интеллектуальной сети является цифровая подстанция, представляющая собой вторичное оборудование электроподстанций — микропроцессорные терминалы, а также цифровой обмен данных между устройствами сети. Отличительными особенностями цифровых подстанций являются: встраивание в первичное оборудование интеллектуальных микропроцессорных устройств, применение локальных вычислительных сетей для коммуникации, цифровой способ доступа к информации, её обработке и передаче, автоматизация работы подстанции и процессов управления ею, а также использование оптических измерительных трансформаторов.

1.1. Показания электросети на участках генерации

Наглядно продемонстрировать необходимость применения технологии Smart Grid можно на примере небольшой солнечной электростанции. Поскольку фотовольтаика генерирует постоянный ток, а большинство потребителей используют переменный, необходимо осуществлять его преобразование с помощью инвертора. Некоторые инверторы по умолчанию обладают функционалом непрерывного мониторинга тока и напряжения, однако, в большинстве случаев измеряются лишь среднеквадратичные значения тока и напряжения. Наибольший же интерес в анализе поведения системы представляет именно форма сигналов [3]. Более того, инвертор в системах генерации постоянного тока является одним из слабых звеньев в цепи, и полагаться на его механизм автоподстройки довольно недальновидно. Возникает необходимость во внедрении внешней системы контроля измерений (рис. 1), которая позволит объективно замерять КПД преобразования, показания в различных участках цепи — как в участках с постоянным током, так и с переменным; в низковольтной и высоковольтной сетях. Такой подход даёт возможность получать более полную картину об электростанции и о сети в целом.

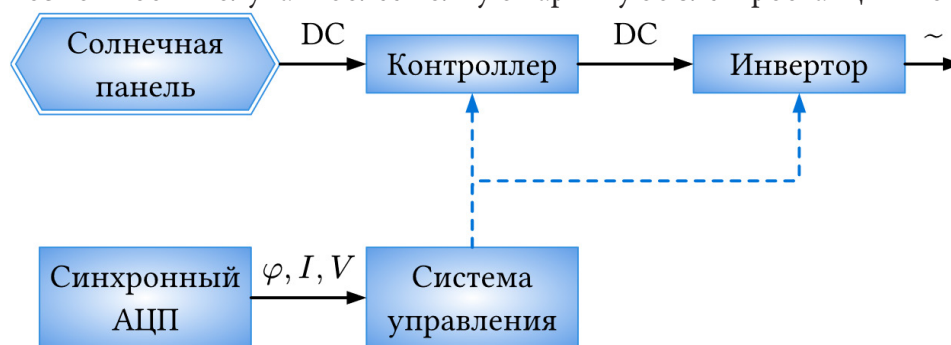


Рис. 1. Схема организации системы измерения и управления показателями солнечной панели, контроллера и инвертора. Контроллер согласует ВАХ солнечной панели и накопителя, а система управления поддерживает параметры выходного напряжения

Стоит отметить, что описываемая в данной статье измерительная установка не будет являться заменой для рассматриваемых инверторов, а наоборот будет дополнять и координировать их работу. Такого рода подход открывает возможность прогноза производства и потребления электроэнергии, управления зарядкой накопителей, процессом преобразования постоянного тока в переменный, наблюдения за состоянием системы, деградацией панелей и накопителей со временем.

1.2. Выявление событий и переходных процессов при помощи анализа токов и напряжений

Одной из важнейших целей непрерывного наблюдения за формой сигналов тока и напряжения является выявление переходных процессов. Большинство из них (довольно незначительных), наблюдаемых при измерении токов и напряжений, едва ли заметны на фоне более редких, но более явных, вызываемых индуктивной нагрузкой. Конечно же, не стоит забывать и про другие, зачастую более серьезные причины переходных процессов в сети, включая неисправности и сбои в работе оборудования. Так, резкое понижение напряжения тоже может вызывать переходной процесс [4]. Анализ отклика энергетической системы на такого рода переходы оказывается чрезвычайно полезен для многих систем управления и защиты, в том числе при анализе устойчивости, оценке надежности и построения моделей поведения системы при разных уровнях нагрузки. Мониторинг переходных процессов, вызываемых работой оборудования электростанции, позволяет заранее предупреждать о появляющихся в системе неисправностях, потенциально влекущих проблемы в будущем. Кроме того, такого рода наблюдения показывают, как система реагирует на штатные режимы работы.

1.3. Балансировка генерируемой и потребляемой мощности

Процесс управления электросетями в том числе подразумевает непрерывные усилия по балансировке генерируемых и потребляемых электрических мощностей. Несоответствие между генерацией и потреблением значительным образом влияет на частоту электросети. Эффект разбалансировки между генерацией и потреблением наглядно на примере электромеханических процессов в турбинных генераторах: при потере значительной части генерации частота немедленно падает; при потере значительной части нагрузки — наоборот, очень быстро вырастает. Поскольку электросетевая магистраль — это одна большая цепь, перебой в одной её части может повлиять на частоту в пределах всей сети. Турбине генератора требуется несколько секунд, чтобы увеличить или уменьшить механический крутящий момент для компенсации скорости ротора. Некоторым генераторам может потребоваться выровнять уровень генерации для возвращения частоты в системе к норме. С помощью анализа сетевой частоты можно также проводить оценку инерции в энергосистемах [5], изучать влияния возобновляемых источников мощности на частотную реакцию [6], оценивать производительность электросети в процессе возвращения частоты к норме на протяжении пяти минут после потери генерирующих или нагрузочных мощностей [7].

1.4. Прогнозирование и моделирование поведения сети по измеряемым данным

Ввиду нелинейности электрических процессов в сетях, изменения в одной их части могут оказывать нелинейное воздействие на остальные. Так, добавление или отключение генерирующих или же нагрузочных мощностей может привести к непредсказуемым изменениям в распределении нагрузки, напряжении и частоте в сети. Для управления и оптимизации работы такой сложной нелинейной системы требуются высокоточные измерения параметров сети. Однако даже при использовании современного измерительного оборудования, едва ли можно достичь абсолютной точности измерений, ввиду различных факторов воздействия на систему. Это значит, что при прогнозировании поведения такой системы всегда будет присутствовать элемент неопределённости. К начальным условиям в такой системе относятся такие параметры сети, как начальная фаза тока, его амплитуда, напряжение, состояние самого генерирующего оборудования, и даже погодные условия. Малейшие изменения в этих параметрах могут привести к значительным отклонениям в работе всей системы, что делает точное прогнозирование её поведения очень сложной задачей, особенно при ручном управлении. Иными

словами, даже при наличии точных данных о текущем состоянии системы, долгосрочные прогнозы её поведения могут быть ненадёжными. Это особенно актуально при попытке предсказать поведение системы в условиях возникновения аварийных ситуаций или при интеграции большого количества возобновляемых источников энергии с переменной выработкой. Тем не менее, повышение точности измерений вышеперечисленных показателей является одним из наиболее важных факторов повышения точности прогноза поведения системы.

Путём интеграции умных сетей с системами на основе машинного обучения, можно значительно упростить процедуры накопления и анализа показаний. Кроме того, качественно обученные модели могут быть использованы для построения алгоритмов управления электроснабжением или же для устранения или предотвращения аварий, нивелируя человеческий фактор, зачастую приводящий к выходу из строя дорогостоящего оборудования или же к травмам персонала.

2. Проектирование печатной платы

Для точной синхронизации измеряемых показаний на протяженных участках сети необходимо обеспечивать точные временные метки с гранулярностью в единицы микросекунд или же в десятки наносекунд. Классические способы синхронизации времени при помощи сети Ethernet являются непригодными для такого рода задач, поскольку отставание временной метки, например, в протоколе NTP может варьироваться от нескольких десятков секунд до нескольких минут. Такая точность является неприемлемой для измерений даже в низком диапазоне частот. Самым точным стандартом времени в настоящий момент являются атомные часы. Однако, это довольно дорогая и сложная в обслуживании технология. Наиболее распространённым вариантом и следующим по точности являются системы GNSS (Глобальные Навигационные Спутниковые Системы). В такой конфигурации атомными часами оснащены уже сами спутники, которые далее передают сигналы, содержащие временные метки. Получая сигналы от нескольких спутников, приемник на Земле может вычислить собственное местоположение и текущее время с высокой точностью.

В современной промышленности в таких системах реального времени (СРВ) взамен полноценных ЭВМ всё чаще (ввиду растущей доступности и производительности) применяются микроконтроллеры — в целях мониторинга, обработки данных и выполнения специфичных функций. Микроконтроллеры должны удовлетворять следующим критериям: детерминированность (система должна гарантировать выполнение задач в определённые сроки), надёжность и стабильность (СРВ часто используются в критических важных приложениях, где отказ может привести к серьёзным последствиям) поддержка многозадачности (многие СРВ требуют одновременного выполнения нескольких задач), эффективная работа с прерываниями (способность быстро и эффективно обрабатывать прерывания является ключевой, поскольку позволяет оперативно реагировать на внешние события). Для удовлетворения данных требований в системах реального времени часто используются специализированные операционные системы реального времени (RTOS, например RTIC [8]), которые оптимизированы для работы с конкретной аппаратурой и обеспечивают необходимые механизмы планирования и управления ресурсами.

На данный момент пользователю доступно множество измерительных устройств, предоставляющих мгновенные значения различных показателей системы, однако не каждое такое устройство способно проводить непрерывную цифровую обработку и последующую агрегацию полученных показаний для анализа поведения системы и обнаружения систематических особенностей в её поведении. Такая задача требует не только высокой частоты дискретизации АЦП-модуля, но и скоростных каналов для передачи данных. У истоков такой измерительной цепочки всегда находится высокоскоростной АЦП, способный оцифровывать показания с частотой в десятки мегагерц. Такие скорости дискретизации достигаются за счет высокоско-

ростных каналов связи между АЦП и микроконтроллером, либо же путём размещения АЦП на кристалле самого контроллера, с использованием общей шины и памяти. Тем не менее, вычислительные ресурсы микроконтроллера являются весьма ограниченными, а поэтому любые задачи, включающие в себя работу с нецелочисленными значениями при помощи FPU (Floating Point Unit), в том числе ЦОС (цифровая обработка сигнала), чаще всего выполняются на стороне более мощного оборудования, занимающегося агрегацией показаний.

С точки зрения наилучшего соотношения производительности к энергопотреблению, очевидным выбором становятся микроконтроллеры с архитектурой ARM. В отличие от широко распространённой x86, она является более предпочтительной в условиях ограниченных ресурсов (например, в мобильных устройствах или же во встраиваемых системах управления [9]). В качестве канала связи для передачи измерений от микроконтроллера с бортовым АЦП до системы ЦОС на ЭВМ авторами настоящей статьи использовался протокол UART в скоростном режиме 3 Мбит/с. В качестве источника GPS-сигнала был взят модуль фирмы TopGNSS с чипом GN200G. Такие чипы поддерживают выход тактирующего сигнала 1PPS, необходимого для координат алгоритма программной фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Вслед за нарастающим фронтом сигнала 1PPS, GPS-модуль передаёт сообщение GPRMC, которое, согласно протоколу NMEA, содержит дату и время, соответствующие моменту перед передачей 1PPS [10].

Таким образом, экспериментальная установка включала в себя микроконтроллер STM32F103, преобразователь USB-TTL, GPS-приёмник и аналоговые компоненты (трансформатор, резисторы). Для управления измерителем была разработана программа микроконтроллера и агрегирующее ПО для ЭВМ на языке Rust [11]. В качестве агрегатора использовался одноплатный компьютер Raspberry Pi Compute Module 4. Более подробно программно-аппаратный комплекс на основе одноплатного компьютера Raspberry Pi описан авторами в работе [12].

Одним из наиболее очевидных видов помех в подобного рода установках являются электромагнитные наводки в соединительных проводах их компонентов. В случае плохих контактов или нестабильного уровня «земли», подобного рода помехи могут значительным образом зашумлять и искажать измеряемый сигнал. Кроме того, проблемным участком может также являться и высокоскоростной канал передачи данных между контроллером и конвертером уровня. В целях борьбы с перечисленными проблемами, особенно, в контексте увеличения числа элементов системы и усложнения их связей, было принято решение совместить все цифровые компоненты на одной общей печатной плате.

Процесс проектирования и разводки печатной платы является весьма трудоёмким ввиду следующих факторов: компоненты схемы должны быть размещены компактно, длины дорожек должны быть минимальными для снижения наводимых помех, а чувствительные к наводкам участки цепи (такие, как каналы АЦП) должны располагаться как можно дальше от источников высокочастотных помех (кристаллических осцилляторов, каналов UART, USB). Финальный вариант печатной платы с пинами для 10 каналов АЦП и тактового сигнала 1PPS показан на рис. 2.

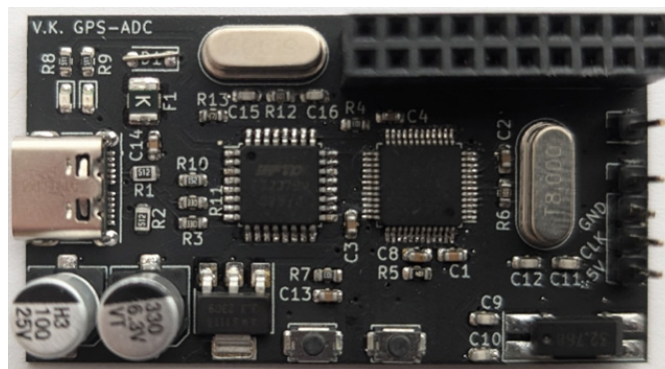


Рис. 2. Печатная плата-измеритель. Общий вид

3. Измерение показателей домашней сети

Наиболее простым и рациональным способом апробации установки с GPS-АЦП является измерение формы и амплитуды напряжения домашней сети 220В. На рис. 3 явно заметна несинусоидальная форма сигнала с искажениями в нарастающем и убывающем фронтах. В точках максимальных амплитуд также наблюдается «ворсистость» сигнала, потенциально связанная с импульсными источниками питания у некоторых потребителей.

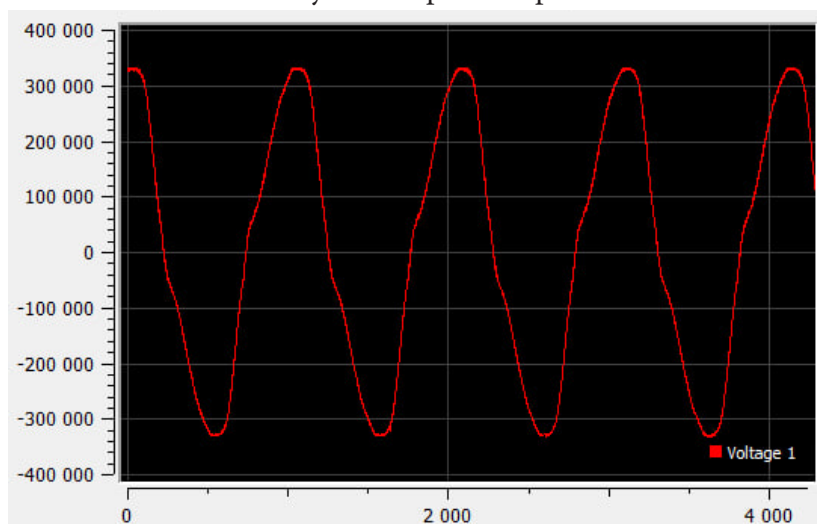


Рис. 3. Форма напряжения в домашней сети 220 В.

По горизонтали: отсчеты АЦП на максимально возможной частоте дискретизации с условием одновременной передачи сигнала по UART в 1024000 БОД. По вертикали: милливольты

Поскольку в измерительном процессе в данном эксперименте участвовал трансформатор напряжения 220-6 В, являющийся нелинейным индуктивным элементом цепи, были также проведены некоторые тривиальные исследования по измерению зависимости выходной формы сигнала в зависимости от различных форм и частот входного сигнала. Согласно теории, при полном отсутствии нагрузки на вторичной обмотке (т.е. при коэффициенте мощности трансформатора равном нулю), смещение фаз между входным и выходным напряжением составляет 90° . При увеличении же нагрузки на трансформатор, коэффициент должен асимптотически стремиться к единице, а сдвиг по фазе, соответственно, — к нулю (рис. 4). В проведённом эксперименте напряжение генератора подавалось на вторичную обмотку, и, соответственно, трансформатор работал в повышающем режиме. Напряжение генератора было 1В, частота сигнала 50 Гц. На практике также наблюдалось сильное падение входного напряжения генератора при приближении частоты сигнала к сетевой (50 Гц) и повышение до заданного в параметрах самого генератора при повышении частоты до области единиц и десятков килогерц.

Также в рамках апробации разработанной установки проводились исследования по одновременной многоканальной оцифровке нескольких сигналов из разных источников. Поскольку объединение сигналов от разных источников с общей землёй в некоторых случаях может приводить к их взаимной корреляции, в таком исследовании использовался иной подход. Вместо одного GPS-АЦП для чувствительных источников сигнала использовались несколько, подключенных к общему аппаратному агрегатору (Pi Compute Module или ПК). Проблема взаимной корреляции в таком случае устраняется за счёт независимой оцифровки сигналов отдельными АЦП, не связанными гальванически в пределах одной печатной платы.

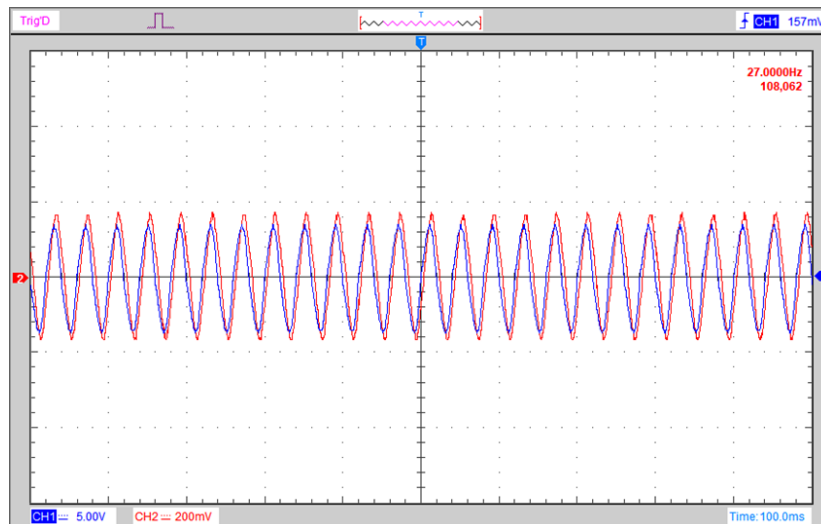


Рис. 4. Исследование зависимости выходного напряжения трансформатора от формы и частоты входного

Заключение

Подводя итог данного исследования, можно сказать, что отечественное производство действительно нуждается в комплексных программно-аппаратных решениях для оптимизации генерации и передачи электроэнергии. Авторами уже неоднократно было доказано, что разработка подобного рода установок с нуля, на основании открытых источников информации, является возможной и вполне реализуемой. Результатом настоящего исследования стало проектирование и создание собственной платы-измерителя с системой точного времени, совмещающей в себе все необходимые цифровые компоненты для снятия и передачи в агрегатор различных по своей природе физических показаний в условиях GPS-синхронизации. Что же касается практического интереса данной работы — он заключается вовсе не в деталях нормализации сигнала и не в процессе измерения показаний высоковольтных линий, а в непосредственной методике проектирования и изготовления такого рода измерительных устройств.

Литература

1. Santoso S. Power Quality Data Analytics: Tracking, Interpreting, and Predicting Performance / S. Santoso, D.D. Sabin // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. – 2012.
2. Глухов В. В. Принципы Smart Grid в энергетической инфраструктуре города / В. В. Глухов, В. В. Скворцов // *π-Economy*. – 2010. – № 6 (112). – С. 55–59.
3. Amin M. The Case for Smart Grid. Funding a new infrastructure in age of uncertainty / M. Amin // *Public Utilities Fortnightly*. – 2015. – P. 24–32.
4. Khaledian P. Event-Based Analysis of Solar Power Distribution Feeder Using Micro-PMU Measurements / P. Khaledian, A. Aligholian, and H. Mohsenian-Rad // 2021 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). – 2021.
5. Estimation of WECC System Inertia Using Observed Frequency Transients / D. P. Chassin [et al.] // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2005. – v. 20. – P. 1190–1192.
6. Sharma S. System Inertial Frequency Response Estimation and Impact of Renewable Resources / S. Sharma, S.-H. Huang, N. Sarma // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. – 2011.
7. Analysis Power System Disturbances Based on Wide-Area Frequency Measurements / J. Dong [et al.] // *Power Engineering Society General Meeting*. – 2007.

8. «A concurrency framework for building real-time systems». RTIC: официальный сайт. – URL: <https://rtic.rs/2/book/en> (дата обращения: 21.11.2024).
9. *Micev M.* Optimal tuning of the novel voltage regulation controller considering the real model of the automatic voltage regulation system // M. Micev, M. Calasan, M. Radulovic // *Heliyon*. – 2023. – V. 9. – 17 p.
10. Разработка прототипа программно-аппаратного комплекса синхронно-векторных измерений на базе GPS-синхронизированного аналого-цифрового преобразователя / В. А. Казбанов, М. С. Курицкий, А. Н. Алещенко, В. М. Анискевич // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2023. – Т. 19, № 4. – С. 44–54.
11. «Rust – A language empowering everyone to build reliable and efficient software». Rust: официальный сайт. – URL: <https://www.rust-lang.org> (дата обращения: 21.11.2024).
12. *Казбанов В. А.* Разработка высокоскоростной вычислительной установки на базе энергоэффективной архитектуры arm64 для снятия и накопления физических показаний / В. А. Казбанов, М. С. Курицкий, А. Н. Алещенко, В. М. Анискевич // *Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 4-6 декабря 2023 г. — Воронеж, 2024. — С. 1550–1557.*

УСТРОЙСТВО ДЛЯ МОНИТОРИНГА СЕТЕВОГО ТРАФИКА И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ УТЕЧЕК ДАННЫХ

В. Г. Ляликова, Г. И. Бурляев

Воронежский государственный университет

Аннотация. В статье рассматривается разработка устройства для мониторинга сетевого трафика на базе микроконтроллера ESP8266. Устройство позволяет выявлять подозрительные соединения, анализировать данные в реальном времени и фиксировать результаты для последующего анализа. Преимущество устройства заключается в его компактности, низкой стоимости и доступности для малых и средних предприятий, которые не могут позволить себе дорогостоящие решения класса DLP и SIEM.

Ключевые слова: мониторинг трафика, ESP8266, утечка данных, сетевой анализ, безопасность.

Введение

Рост объема данных и усложнение сетевой инфраструктуры привели к увеличению числа утечек информации. Для мониторинга сетевой активности крупные компании используют системы класса DLP и SIEM, однако их стоимость делает их недоступными для малых организаций. Устройство на базе ESP8266 предлагает более экономичное решение этой проблемы.

ESP8266 — это микроконтроллер с поддержкой Wi-Fi, известный своей компактностью, низкой стоимостью и возможностью работы в сетях. Эти особенности делают его подходящей платформой для создания устройств, решающих задачи базового анализа сетевого трафика.

1. Методы и материалы

Устройство включает следующие компоненты: ESP8266 для подключения к Wi-Fi и анализа трафика, светодиоды для индикации состояний, зуммер для звукового оповещения, кнопку для управления, и SD-карту для записи логов. Использовалась среда Arduino IDE и библиотеки ESP8266WiFi и SD.

Программное обеспечение включает модули для подключения к сети, мониторинга трафика, индикации событий и записи логов. Основные этапы работы: инициализация устройства, подключение к сети, мониторинг активности, фиксация подозрительных событий и оповещение оператора.

1.1. Описание компонентов

Основной микроконтроллер ESP8266 обеспечивает подключение к Wi-Fi сети и базовый анализ трафика. Светодиоды выполняют роль индикаторов событий: подключение к сети, обнаружение угроз и нормальная работа. Зуммер служит для звукового уведомления оператора о подозрительных соединениях.

Кнопка позволяет сбросить индикацию и перезапустить устройство. SD-карта используется для записи логов, что упрощает последующий анализ выявленных угроз. Все компоненты выбирались с учетом минимизации затрат.

1.2. Реализация устройства

Программное обеспечение устройства включает алгоритмы для обработки сетевого трафика и индикации угроз. Основной функционал реализован с использованием Arduino IDE.

Устройство поддерживает базовые алгоритмы выявления аномалий, таких как избыточная активность IP-адресов или доступ к нестандартным портам.

Подключение компонентов осуществляется через GPIO пины ESP8266. Например, светодиоды подключены через резисторы, а зуммер управляется через ШИМ-сигнал. Для хранения данных используется интерфейс SPI.

В заключение подчеркивается, что разработанное устройство предлагает экономичное решение для базового мониторинга сетевой активности. Это особенно важно для организаций с ограниченным бюджетом, где необходимы недорогие альтернативы сложным DLP и SIEM системам.

Перспективы доработки включают внедрение более сложных алгоритмов анализа, интеграцию с облачными системами и повышение точности выявления угроз за счет использования моделей машинного обучения.

Применение ESP8266 в устройстве для мониторинга сетевого трафика обусловлено его функциональностью и низкой стоимостью. Этот микроконтроллер широко используется в IoT-проектах благодаря встроенной поддержке Wi-Fi, что позволяет минимизировать затраты на разработку и внедрение.

Утечки данных являются серьезной угрозой для современных организаций. Они приводят к значительным финансовым и репутационным потерям, а также к юридическим последствиям. Поэтому создание доступного и эффективного решения для мониторинга трафика является актуальной задачей.

1.3. Трудности разработки

Основные трудности разработки связаны с ограничениями вычислительных ресурсов ESP8266, что ограничивает возможности глубокого анализа трафика. Кроме того, интеграция дополнительных компонентов, таких как SD-карта и зуммер, требует оптимизации кода и схемы устройства.

Для обеспечения надежности устройства использовались стандартные подходы к программированию и тестированию. В процессе разработки особое внимание уделялось обработке ошибок, например, при потере соединения с сетью или сбоем чтении данных с SD-карты.

Алгоритм работы устройства предусматривает динамическое управление индикацией и записью данных. В случае обнаружения подозрительного трафика устройство инициирует звуковое и световое уведомление, а также записывает информацию о событии для последующего анализа.

Предложенное устройство является примером применения доступных технологий для решения актуальных задач информационной безопасности. Оно может использоваться не только в организациях, но и в учебных целях, позволяя студентам изучать основы сетевого мониторинга и защиты данных. Вместе с тем устройство имеет свои ограничения, которые могут быть устранены в рамках дальнейших исследований. Например, использование более мощных микроконтроллеров позволит расширить функциональность и повысить точность анализа.

Заключение

Разработанное устройство предоставляет базовые функции мониторинга сетевой активности с минимальными затратами. Оно может быть полезным для небольших организаций, где необходимо обеспечивать защиту данных. Для повышения эффективности планируется разработка более сложных алгоритмов анализа и интеграция с облачными сервисами.

Введение рассматривает актуальность применения компактных и экономичных решений для мониторинга сетевой активности. Современные киберугрозы требуют адаптации доступ-

ных технологий для обеспечения защиты данных. Выбор ESP8266 обусловлен его универсальностью и доступностью для небольших организаций.

Литература

1. Столлингс У. Защита сетей. Основы и принципы / У. Столлингс. – М. : Вильямс, 2015. – 576 с.
2. Горяинов А. Н., Смирнов А. В. Основы защиты информации в компьютерных сетях. – СПб. : Питер, 2018. – 352 с.
3. Kurnikov V. Introduction to ESP8266 and Its Applications in IoT // Journal of Embedded Systems. – 2020. – Vol. 35, No 2. – P. 45–60.
4. Arduino Project Handbook: 25 Practical Projects to Get You Started / M. Ozer, H. Newman. – No Starch Press, 2016. – 272 p.
5. Интернет-ресурсы: Arduino IDE [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.arduino.cc> (дата обращения: 23.11.2024).
6. Интернет-ресурсы: ESP8266 SDK Documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.espressif.com> (дата обращения: 23.11.2024).
7. AlexGyver Technologies. Официальный сайт YouTube-канала AlexGyver Show, посвящённый Arduino проектам, урокам и блогу [Электронный ресурс]. – URL: <https://alexgyver.ru>

НОВЫЙ ОПЕРАТОР ПРОИЗВЕДЕНИЯ РЕШЕТЧАТЫХ ФУНКЦИЙ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЯХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

А. М. Минитаева

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Аннотация. В работе вводится новый оператор умножения решетчатых функций и предлагается формула его вычисления. Для предложенной формулы доказываются свойства коммутативности, ассоциативности и дистрибутивности нового оператора произведения решетчатых функций, свойства существования единственной единицы и единственного нуля. Предложенный оператор умножения решетчатых функций позволяет использовать формулу прямой разности произведения решетчатых функций по новому оператору, как сумму произведений по новому оператору прямой разности первой функции на вторую функцию и прямой разности второй функции на первую функцию. Внешний вид этой формулы становится схожим с формулой производной произведения непрерывных функций.

Ключевые слова: решетчатые функции, прямая разность, оператор умножения решетчатых функций, ряд Маклорена, разностные уравнения, системы управления с дискретным временем.

Введение

В системах управления с дискретным временем рассматриваются решетчатые функции времени $f(t)$, $t = nT$, $n = 0, 1, 2, \dots$ или, в сокращенной записи, $f[n]$, определенные на дискретном множестве действительных чисел с шагом T ($T \in \mathbb{R}, T > 0$), который называется периодом повторения [9].

Например, в системе разностных уравнений линейной системы управления, которая записывается известным уравнением $x[n+1] = Ax[n] + Bu[n]$ в матричной форме, речь идет о первой прямой разности решетчатой функции:

$$\Delta f[n] = f[n+1] - f[n], \quad (1)$$

которая служит аналогом первой производной $f'(t)$ непрерывной функции $f(t)$, $t \in \mathbb{R}$.

Очевидно, что функция $\Delta f[n]$ — тоже решетчатая, поэтому для нее также можно найти прямую разность, обозначив ее $\Delta^2 f[n]$. Аналогом второй производной $f''(t)$ является вторая прямая разность:

$$\Delta^2 f[n] = \Delta f[n+1] - \Delta f[n] = f[n+2] - 2f[n+1] + f[n].$$

Справедливо рекуррентное соотношение $\Delta^k f[n] = \Delta^{k-1} f[n+1] - \Delta^{k-1} f[n]$. Применяя метод математической индукции, легко получить выражение для k -й прямой разности решетчатой функции:

$$\Delta^k f[n] = \sum_{j=0}^k (-1)^j C_k^j f[n+k-j], \quad (2)$$

где $C_k^j = \frac{k!}{j!(k-j)!}$ — число сочетаний из k по j (биномиальные коэффициенты).

Аналогом неопределенного интеграла непрерывной функции $\int f(t) = F(t) + C$, $F'(t) = f(t)$, находящего совокупность всех ее первообразных $\{F(t)\}$, служит сумма:

$$\sigma[n] = \sum_{j=0}^{n-1} f[j] + C, n = 0, 1, 2, \dots,$$

где C — произвольная постоянная; $\sigma[n]$ — неполная сумма (аналог первообразной) для решетчатой функции $f[n]$.

К сожалению, первая прямая разность (1) не обладает свойствами производной непрерывной функции. Например, в общем случае:

$$\Delta(f[n]g[n]) = \Delta f[n]g[n] + \Delta g[n]f[n] + \Delta f[n]\Delta g[n], \quad (3)$$

где последний член $\Delta f[n]\Delta g[n]$ отличает прямую разность произведения решетчатых функций от производной произведения непрерывных функций [2, 4]:

$$(f(t)g(t))' = f'(t)g(t) + f(t)g'(t).$$

Замечание 1. Применение численных методов к анализу нелинейных систем управления с непрерывным временем по своей сути означает замену непрерывных функций решетчатыми, поэтому при решении численными методами систем нелинейных дифференциальных уравнений член $\Delta f[n]\Delta g[n]$ из выражения (2) дает дополнительную погрешность в вычислениях [1, 3, 5].

Цель данной работы — предложить такой новый оператор умножения решетчатых функций, который позволит избавиться от «лишнего» члена в прямой разности произведения решетчатых функций:

$$\Delta(f[n] \times^{\tau} g[n]) = \Delta f[n] \times^{\tau} g[n] + \Delta g[n] \times^{\tau} f[n], \quad (4)$$

где $\times^{\tau}$ — бинарный оператор, определенный на бесконечном множестве решетчатых функций. Назовем этот оператор τ — умножением (или тау-умножением) решетчатых функций.

Использование тау-умножения позволит применять методы решения дифференциальных уравнений для решения разностных уравнений, например, сделает возможным осуществлять тау-разложение решетчатых функций в ряд Тейлора, использовать тау-интегрирование по частям решетчатых функций, применять тау-преобразование Лапласа к решетчатым функциям [6–8].

1. Оператор тау-умножения решетчатых функций

Для достижения цели работы предложенная формула (или алгоритм) вычисления тау-произведения решетчатых функций должна соответствовать ряду условий, объединим их в формализованную задачу работы.

Постановка задачи. Тау-умножение $f[n] \times^{\tau} g[n]$ должно соответствовать следующим требованиям:

1. Прямая разность тау-произведения решетчатых функций должна иметь схожий с производной произведения непрерывных функций вид (4) $\Delta(f[n] \times^{\tau} g[n]) = \Delta f[n] \times^{\tau} g[n] + \Delta g[n] \times^{\tau} f[n]$;

2. При стремлении периода повторения к нулю тау-произведение должно стремиться к обычному произведению непрерывных функций: $\lim_{T \rightarrow 0} f[n] \times^{\tau} g[n] = \lim_{t=nT} f(t)g(t)$, где $f(t) = \lim_{t=nT} f[n]$ и $g(t) = \lim_{t=nT} g[n]$;

3. Тау-умножение должно обладать переместительным, сочетательным и распределительным относительно сложения свойствами;

4. Должен существовать единственный такой операнд тау-умножения, как «единица», тау-произведение которого с любой решетчатой функцией дает саму эту функцию;

5. Должен существовать единственный такой операнд тау-умножения, как «ноль», тау-произведение которого с любой решетчатой функцией дает сам этот «ноль».

С целью удобства записи некоторых выражений введем следующие обозначения:

$\frac{d_f}{dt}$ — это оператор для произведения непрерывных функций $f(t)g(t)$, который применяется только к функции $f(t)$, например, $\frac{d_f}{dt}(f(t)g(t)) = g(t)\frac{d}{dt}f(t) = f'(t)g(t)$, $\frac{d_f^2}{dt^2}(f(t)g(t)) = f''(t)g(t)$ и для произвольного порядка $\frac{d_f^n}{dt^n}(f(t)g(t)) = f^{(n)}(t)g(t)$;

Δ_f — это аналогичный оператор для решетчатых функций, который применяется только к функции $f[n]$, например, $\Delta_f(f(t)g(t)) = g[n]\Delta f[n]$, $\Delta_f^2(f(t)g(t)) = g[n]\Delta^2 f[n]$ и для произвольного порядка конечной разности $\Delta_f^k(f(t)g(t)) = g[n]\Delta^k f[n]$;

I — это единичный оператор для умножения решетчатой функции на скаляр и тау-умножения решетчатых функций, например, $If[n] = f[n]$;

$\exp(X) = e^X$ — это оператор комбинации экспоненты с оператором X ;

$f'[n] = \frac{\Delta f[n]}{T} = \frac{f[n+1] - f[n]}{T}$ — это отношение первой прямой разности к периоду повторения, и $f'(t) = \lim_{t \rightarrow 0} \lim_{n \rightarrow \infty} f'[n]$ по определению производной непрерывной функции для $f(t) = \lim_{t \rightarrow 0} f[n]$, а для конечной разности произвольного порядка $f^{(k)}[n] = \frac{\Delta^k f[n]}{T^k}$.

Заметим также, что

$$e^{at} = \lim_{t \rightarrow 0} \lim_{n \rightarrow \infty} e^{anT} = \lim_{T \rightarrow 0} (1 + aT)^n, \quad (5)$$

т. е. пусть непрерывной функции $f(t) = e^{at}$ соответствует решетчатая функция $f[n] = (1 + aT)^n$.

Определим соответствующую решетчатую функцию и для непрерывной функции $f(t) = t^k$, $k \in \mathbb{N}$:

$$t^k = \lim_{t \rightarrow 0} \lim_{n \rightarrow \infty} (nT)^k = \lim_{T \rightarrow 0} k! C_n^k T^k, \quad (6)$$

т. е. пусть непрерывной функции $f(t) = t^k$, $k \in \mathbb{N}$ соответствует решетчатая функция $f[n] = k! C_n^k T^k$, $k \in \mathbb{N}$.

Для нахождения формулы, удовлетворяющей перечисленным в постановке задачи требованиям, разложим произведение непрерывных функций в ряд Маклорена:

$$f(t)g(t) = \exp\left(t\left(\frac{d_f}{dt} + \frac{d_g}{dt}\right)\right)(f(t)g(t)), \quad (7)$$

где $\exp\left(t\left(\frac{d_f}{dt} + \frac{d_g}{dt}\right)\right)$ — это сокращенная форма оператора $1 + \sum_{j=1}^{\infty} \left(t\left(\frac{d_f}{dt} + \frac{d_g}{dt}\right)\right)^j / j!$.

Заменим в выражении (7) непрерывные функции $f(t), g(t)$ на решетчатые функции $f[n], g[n]$, оператор $\exp(at)$ на $(1 + aT)^n$ и операторы $\frac{d_f}{dt}, \frac{d_g}{dt}$ на $\frac{\Delta_f}{T}, \frac{\Delta_g}{T}$, при этом будем иметь в виду, что мы обозначили $\frac{\Delta}{T} y[n] = y'[n]$:

$$\tau[k] = f[n] \times g[n] = \left(T\left(\frac{\Delta_f}{T} + \frac{\Delta_g}{T}\right) + I\right)^k (f[n]g[n]) = (\Delta_f + \Delta_g + I)^k (f[n]g[n]). \quad (8)$$

Применив полученный левый оператор $(\Delta_f + \Delta_g + I)^k$, получим:

$$\begin{aligned} \tau[k] = f[n] \times g[n] = f[0]g[0] + C_k^1(g[0]\Delta f[0] + f[0]\Delta g[0]) + \\ + C_k^2(g[0]\Delta^2 f[0] + 2\Delta f[0]\Delta g[0] + f[0]\Delta^2 g[0]) + \dots \end{aligned} \quad (9)$$

Применив формулу сочетаний к биномиальным коэффициентам внутри скобок и выражение (2) для прямой разности произвольного порядка, получаем выражение:

$$\tau[k] = f[n] \times^{\tau} g[n] = \sum_{j=0}^k C_k^j \sum_{i=0}^j C_j^i \Delta^i f[0] \Delta^{j-i} g[0] = \sum_{i,j} (-1)^{k-i-j} C_k^{i,j} f[i] g[j], \quad (10)$$

где $C_k^{i,j} = \frac{k!}{i!j!(k-i-j)!}$.

Замечание 2. Для выражения (7) мы использовали разложение в ряд Тейлора в точке 0, поэтому выражения (8)–(10) справедливы для значений аргумента +0. Нетрудно распространить приведенные выкладки и на разложение в ряд Тейлора в произвольной точке $t_0 = n_0 T$, тогда выражение (7) изменится на $f(t)g(t) = \exp\left((t-t_0)\left(\frac{d_f}{dt} + \frac{d_g}{dt}\right)\right)(f(t)g(t))$, а выражения (8)–(10) соответствующим образом необходимо изменить для $n = n_0$ вместо $n = 0$.

2. Свойства оператора тау-умножения

Докажем, что предлагаемая формула тау-умножения (10) удовлетворяет всем пяти требованиям решаемой задачи.

2.1. Прямая разность тау-произведения

Теорема 1. Для двух решетчатых функций первая прямая разность их тау-произведения представляется суммой тау-произведения второй функции и первой прямой разности первой функции с тау-произведением первой функции и первой прямой разности второй функции по выражению (4):

$$\Delta(f[n] \times^{\tau} g[n]) = \Delta f[n] \times^{\tau} g[n] + \Delta g[n] \times^{\tau} f[n].$$

Доказательство. Используя выражение (9) для каждого слагаемого правой части, получим:

$$\begin{aligned} \Delta f[n] \times^{\tau} g[n] + \Delta g[n] \times^{\tau} f[n] &= \Delta f[n] g[n] + C_k^1 (\Delta^2 f[n] g[n] + \Delta f[n] \Delta g[n]) + \dots + \\ &+ f[n] \Delta g[n] + C_k^1 (f[n] \Delta^2 g[n] + \Delta f[n] \Delta g[n]) + \dots = \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} &\Delta f[n] g[n] + f[n] \Delta g[n] + C_k^1 (g[n] \Delta^2 f[n] + 2 \Delta f[n] \Delta g[n] + f[n] \Delta^2 g[n]) + \dots = \\ &= 0 \cdot f[n] g[n] + C_k^0 (\Delta f[n] g[n] + f[n] \Delta g[n]) + C_k^1 (g[n] \Delta^2 f[n] + 2 \Delta f[n] \Delta g[n] + f[n] \Delta^2 g[n]) + \dots \end{aligned}$$

Запишем полученное выражение в виде суммы, которая после преобразований соответствует выражению (10) для прямой разности тау-произведения решетчатых функций $\Delta(f[n] \times^{\tau} g[n])$:

$$\begin{aligned} &0 \cdot f[n] g[n] + C_k^0 (\Delta f[n] g[n] + f[n] \Delta g[n]) + C_k^1 (g[n] \Delta^2 f[n] + 2 \Delta f[n] \Delta g[n] + f[n] \Delta^2 g[n]) + \dots = \\ &= 0 + \sum_{j=1}^k C_k^{j-1} \sum_{i=0}^{j-1} C_{j-1}^i \Delta^i f[n] \Delta^{j-i-1} g[n] = \sum_{j=0}^k C_k^j \sum_{i=0}^j C_j^i \Delta^i (\Delta f[n] + f[n]) \Delta^{j-i} (\Delta g[n] + g[n]) - \\ &- \sum_{j=0}^k C_k^j \sum_{i=0}^j C_j^i \Delta^i f[n] \Delta^{j-i} g[n] = \sum_{j=0}^k C_k^j \sum_{i=0}^j C_j^i \Delta^i (f[n+1]) \Delta^{j-i} (g[n+1]) - \sum_{j=0}^k C_k^j \sum_{i=0}^j C_j^i \Delta^i f[n] \Delta^{j-i} g[n] = \\ &= f[n+1] \times^{\tau} g[n+1] - f[n] \times^{\tau} g[n] = \Delta(f[n] \times^{\tau} g[n]) \end{aligned} \quad (12)$$

Из (11) и (12) получаем $\Delta f[n] \times^{\tau} g[n] + \Delta g[n] \times^{\tau} f[n] = \Delta(f[n] \times^{\tau} g[n])$, значит, выражение (4) справедливо, и теорема 1 доказана, т. е. требование 1 для тау-произведения выполняется.

2.2. Предел тау-произведения при стремлении периода повторения к нулю

Теорема 2. $\lim_{T \rightarrow 0} f[n] \times^{\tau} g[n] = \big|_{t=nT} \lim_{T \rightarrow 0} f[n] \text{ и } g[n] = \big|_{t=nT} \lim_{T \rightarrow 0} g[n],$

Доказательство. Так как $f(t) = \big|_{t=nT} \lim_{T \rightarrow 0} f[n]$ и $g(t) = \big|_{t=nT} \lim_{T \rightarrow 0} g[n]$,

$$\begin{aligned} \lim_{T \rightarrow 0} f[n] \times^{\tau} g[n] &= \big|_{t=nT} \lim_{T \rightarrow 0} \left(T \left(\frac{d_f}{dt} + \frac{d_g}{dt} \right) + I \right)^k (f[n]g[n]) = \\ &= \lim_{T \rightarrow 0} I^k (f[n]g[n]) = \lim_{T \rightarrow 0} (f[n]g[n]) = f(t)g(t). \end{aligned}$$

Таким образом, при стремлении периода повторения к нулю тау-произведение стремится к обычному произведению непрерывных функций.

2.3. Коммутативность, ассоциативность и дистрибутивность

Теорема 3. Тау-умножение коммутативно: $f[n] \times^{\tau} g[n] = g[n] \times^{\tau} f[n]$.

Доказательство. В силу того, что правая часть равенства (9) содержит только стандартные скалярные произведения значений решетчатых функций, а стандартное скалярное произведение коммутативно, имеем

$$\begin{aligned} \tau[k] &= f[n] \times^{\tau} g[n] = f[0]g[0] + C_k^1(g[0]\Delta f[0] + f[0]\Delta g[0]) + \\ &\quad + C_k^2(g[0]\Delta^2 f[0] + 2\Delta f[0]\Delta g[0] + f[0]\Delta^2 g[0]) + \dots = \\ &= g[0]f[0] + C_k^1(f[0]\Delta g[0] + g[0]\Delta f[0]) + C_k^2(f[0]\Delta^2 g[0] + 2\Delta g[0]\Delta f[0] + g[0]\Delta^2 f[0]) + \dots = \\ &= g[n] \times^{\tau} f[n], \end{aligned}$$

т. е. тау-умножение обладает свойством коммутативности (подчиняется переместительному закону).

Теорема 4. Тау-умножение ассоциативно: $(g[n] \times^{\tau} f[n]) \times^{\tau} y[n] = g[n] \times^{\tau} (f[n] \times^{\tau} y[n])$

Доказательство. Согласно выражению (8)

$$(g[n] \times^{\tau} f[n]) \times^{\tau} y[n] = (\Delta_{\tau} + \Delta_y + I)^k \left(((\Delta_g + \Delta_f + I)^k (g[n]f[n])) y[n] \right),$$

где $\tau[n] = f[n] \times^{\tau} g[n]$.

Заметим, что

$$\Delta_{\tau} (\Delta_f (f[n]g[n])y[n]) = \Delta_{\tau} (g[n]y[n]\Delta f[n]) = \Delta_{\nu} (g[n]y[n]\Delta f[n]) = \Delta_{\nu} (\Delta_f (f[n]y[n])g[n]),$$

где $\nu[n] = f[n] \times^{\tau} y[n]$.

Поэтому, раскрывая скобки и последовательно применяя операторы в любой комбинации количества раз, получим равенство:

$$\begin{aligned} (\Delta_{\tau} + \Delta_y + I)^k \left(((\Delta_g + \Delta_f + I)^k (g[n]f[n])) y[n] \right) &= (\Delta_{\nu} + \Delta_g + I)^k \left(((\Delta_y + \Delta_f + I)^k (y[n]f[n])) g[n] \right) = \\ &= g[n] \times^{\tau} (f[n] \times^{\tau} y[n]). \end{aligned}$$

Таким образом, $(g[n] \times^{\tau} f[n]) \times^{\tau} y[n] = g[n] \times^{\tau} (f[n] \times^{\tau} y[n])$, т. е. тау-умножение обладает свойством ассоциативности (подчиняется сочетательному закону).

Теорема 5. Тау-умножение обладает распределительным относительно сложения свойством: $f[n] \times^{\tau} (g[n] + y[n]) = f[n] \times^{\tau} g[n] + f[n] \times^{\tau} y[n]$.

Доказательство. Подставим в (9) сумму решетчатых функций вместо второй решетчатой функции и раскроем скобки, а также используем свойство прямой разности произвольного порядка $\Delta^k(g[n] + y[n]) = \sum_{j=0}^k (-1)^j C_k^j (g[n+k-j] + y[n+k-j]) = \Delta^k g[n] + \Delta^k y[n]$ для суммы функций:

$$\begin{aligned} f[n] \times^{\tau} (g[n] + y[n]) &= f[0](g[0] + y[0]) + C_k^1((g[0] + y[0])\Delta f[0] + f[0]\Delta(g[0] + y[0])) + \\ &+ C_k^2((g[0] + y[0])\Delta^2 f[0] + 2\Delta f[0]\Delta(g[0] + y[0]) + f[0]\Delta^2(g[0] + y[0])) + \dots = \\ &= g[0]f[0] + C_k^1(f[0]\Delta g[0] + g[0]\Delta f[0]) + C_k^2(f[0]\Delta^2 g[0] + 2\Delta g[0]\Delta f[0] + g[0]\Delta^2 f[0]) + \dots + \\ &+ y[0]f[0] + C_k^1(f[0]\Delta y[0] + y[0]\Delta f[0]) + C_k^2(f[0]\Delta^2 y[0] + 2\Delta y[0]\Delta f[0] + y[0]\Delta^2 f[0]) + \dots \\ &= g[n] \times^{\tau} f[n] + y[n] \times^{\tau} f[n] = f[n] \times^{\tau} g[n] + f[n] \times^{\tau} y[n], \end{aligned}$$

Поэтому $f[n] \times^{\tau} (g[n] + y[n]) = f[n] \times^{\tau} g[n] + f[n] \times^{\tau} y[n]$, т. е. тау-умножение подчиняется дистрибутивному закону (обладает распределительным относительно сложения свойством).

Из теорем 3–5 следует, что тау-умножение коммутативно, ассоциативно и дистрибутивно.

2.4. Существование единственной единицы

Теорема 6. $f[n] \times^{\tau} g[n] = f[n]$ тогда и только тогда, когда $g[n] = 1[n]$, ($1[n] = 1, \forall n \in \mathbb{N}_0$).

Доказательство. Если $g[n] = 1[n]$, ($1[n] = 1, \forall n \in \mathbb{N}_0$), то

$$f[n] \times^{\tau} g[n] = (\Delta_f + \Delta_g + I)^k (f[n]g[n]) = (\Delta_f + \Delta_g + I)^k (f[n]1[n]) = I^k (f[n]) = f[n].$$

Если $f[n] \times^{\tau} g[n] = f[n]$, то

$$f[n] \times^{\tau} g[n] = f[n] = f[n]1[n] = I^k (f[n]1[n]) = (\Delta_f + \Delta_{const} + I)^k (f[n]1[n]) = f[n] \times^{\tau} 1[n], \text{ т. е. } g[n] = 1[n].$$

Для операции тау-умножения существует единица, причем единственная. Таким образом, требование 4 для тау-произведения о существовании единственной единицы выполняется.

2.5. Существование единственного нуля

Теорема 7. $f[n] \times^{\tau} g[n] = f[n]$ тогда и только тогда, когда $g[n] = 0[n]$, ($0[n] = 0, \forall n \in \mathbb{N}_0$).

Доказательство. Если $g[n] = 0[n]$, ($0[n] = 0, \forall n \in \mathbb{N}_0$), то

$$f[n] \times^{\tau} g[n] = (\Delta_f + \Delta_g + I)^k (f[n]0[n]) = (\Delta_f + \Delta_g + I)^k (0) = 0 = 0[n].$$

Если $f[n] \times^{\tau} g[n] = 0[n]$, то

$$f[n] \times^{\tau} g[n] = 0[n] = 0 = (\Delta_f + \Delta_g + I)^k (0) = (\Delta_f + \Delta_g + I)^k (f[n]0[n]) = f[n] \times^{\tau} 0[n], \text{ т. е. } g[n] = 0[n].$$

Для операции тау-умножения существует ноль, причем единственный. Значит, для тау-произведения подтверждено существование единственного нуля и требование 5 удовлетворено.

Заключение

Предложен новый оператор умножения решетчатых функций, который позволяет взглянуть на задачи системного анализа и теории управления с нового ракурса — дифференциаль-

ные уравнения (в том числе и нелинейные [10, 11]) становятся эквивалентными рекуррентным (без какого-либо округления), конечно, для определенного класса функций (аналитические справа от нуля). Дискретные задачи в целом с помощью описанного подхода предположительно возможно решать с привлечением методов для непрерывных функций, что будет являться темой дальнейших исследований.

Литература

1. Минитаева А. М. Многомодельный подход к прогнозированию нелинейных нестационарных процессов в задачах оптимального управления / А. М. Минитаева // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 12–14 декабря 2022 года / Воронежский государственный университет. – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2023. – С. 1564–1571. – EDN BABZFS.
2. Минитаева А. М. Математическая модель и метод принятия решений в экономических системах на основе глубокого обучения / А. М. Минитаева // Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных: Сборник статей II Всероссийской научной конференции. В 5-ти томах, Москва, 27–28 апреля 2023 года. – Москва: Издательский дом КДУ, «Добросвет», 2024. – С. 42–49.
3. Минитаева А. М. Новый оператор тензорного произведения и анализ нелинейных систем с полиномиальными функциями пространства состояний / А. М. Минитаева // Информационно-технологический вестник. – 2024. – № 3(41). – С. 3–14.
4. Минитаева А. М. Обзор подходов к несмещенной оценке коэффициентов авторегрессии / А. М. Минитаева // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2024 : Сборник трудов XIV Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2024, Москва, 17–20 июня 2024 года / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – Москва : Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2024. – С. 3779–3783. – DOI 10.25728/vspu.2024.3779.
5. Шайхутдинов А. А. Методы и аспекты прогнозного моделирования нелинейных нестационарных процессов / А. А. Шайхутдинов // Информационно-технологический вестник. 2024. Т. 40. № 2. С. 66–76.
6. Golovina A. M. Asymptotic behavior of the eigenvalues of the laplacian with two distant perturbations on the plane (the case of arbitrary multiplicity); [асимптотика собственных значений оператора лапласа с двумя разбегающимися возмущениями на плоскости (случай произвольной кратности)] // Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences. – 2023. – Т. 108, № 3. – С. 4–19. doi: 10.18698/1812-3368-2023-3-4-19
7. Покровский И. Л. Задача на собственные значения для оператора Лапласа с нелокальными граничными условиями // Дифференциальные уравнения. – 2018. – Т. 54, № 10. – С. 1363–1370. doi: 10.1134/S0012266118100075
8. Галанин М. П., Сорокин Д. Л. Решение внешних краевых задач для уравнения Лапласа // Дифференциальные уравнения. – 2020. – Т. 56, № 7. – С. 890–899. doi: 10.1134/S0012266120070083
9. Спасенов А. Ю., Досько С. И., Шептунов С. А. [и др.] Идентификация режима управления с использованием структурно-параметрического анализа временных рядов // Труды Международной конференции «Управление качеством, транспортная и информационная безопасность, информационные технологии», ИТ и ИБ 2022. – 2022. – С. 307–310. doi: 10.1109/ITQMIS56172.2022.9976514
10. Канатников А. Н. Новые критерии устойчивости положений равновесия дискретных систем // Труды 14-й Международной конференции «Устойчивость и колебания нелиней-

ных систем управления» (Пятницкая конференция), 2018 г., СТАБ 2018. – 2018. – С. 1–3. doi: 10.1109/СТАБ.2018.8408361

11. *Lapin A. V., Zubov N. E., Proletarskii A. V.* Generalization of ackermann formula for a certain class of multidimensional dynamic systems with vector input // Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences. – 2023. – Т. 109, № 4. – С. 18–38. doi: 10.18698/1812-3368-2023-4-18-38

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЧИСТКИ ВОДОЁМОВ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИМИ ОТХОДАМИ

А. И. Петренко

Воронежский государственный университет

Аннотация. В работе рассматривается задача минимизации затрат на очистные мероприятия для снижения уровня отходов и дефицита растворённого кислорода в водоёмах. Для поиска оптимального управления используется принцип максимума Понтрягина, позволяющий определить наилучшие стратегии очистки. Исследуется влияние стоимостного коэффициента на параметры модели для различных типов водных объектов. Результаты демонстрируют зависимость оптимальных значений концентрации токсических веществ, дефицита кислорода и общих затрат от вида водоёма и коэффициента стоимости, подчеркивая важность учёта этих особенностей при планировании экологических мероприятий.

Ключевые слова: оптимальное управление, принцип максимума Понтрягина, модель очистки воды, краевая задача, локально-оптимальный процесс, минимизация, целевой функционал, сопряжённые функции, условия трансверсальности, точка переключения.

Введение

Загрязнение водоёмов органическими отходами является одной из наиболее острых экологических проблем с которой сталкиваются современные экосистемы. Антропогенное воздействие на различные водные объекты приводит к ухудшению качества воды. В частности, это происходит из-за накопления органических веществ, что, в свою очередь, вызывает критический дефицит растворённого кислорода, необходимого для экосистемы, а это ставит под угрозу биологическое разнообразие и устойчивость водоёмов.

В условиях увеличивающегося негативного воздействия на экосистемы и ограниченных ресурсов важным становится эффективное управление процессом очистки воды от загрязняющих веществ. В данной работе рассматривается математическая модель, описывающая взаимодействие между водой, растворённым кислородом и органическими загрязнителями.

Целью работы является поиск оптимального решения для управления процессом очистки и анализ затрат на очистные технологии в различных водоёмах.

1. Решение задачи с помощью принципа максимума Понтрягина

1.1. Постановка задачи

Рассмотрим вопрос о минимизации суммарных затрат на проведение работ по очистке водных объектов и уменьшении концентрации отходов и дефицита кислорода в течение рассматриваемого периода времени T . Задача оптимального управления будет иметь вид

$$J(u) = \int_0^T (au(t) + x_1(t) + x_2(t))dt \rightarrow \inf \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -k_1x_1 - u \\ \dot{x}_2 = k_1x_1 - k_2x_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_1(0) = L_0 \\ x_2(0) = D_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$0 \leq u(t) \leq u_0 \quad (4)$$

где a — коэффициент, характеризующий стоимость работ в единицу времени; k_1 — коэффициент отбора кислорода (1/день); k_2 — коэффициент реаэрации (1/день); $x_1(t)$ — концентрация отходов; $x_2(t)$ — дефицит кислорода; $u(t)$ — функция управления изменением концентрации отходов, удовлетворяющая ограничению на управление (4), u_0 — максимальное количество отходов, удалённых из единицы объёма в единицу времени.

В данной работе будут рассмотрены большие реки с медленным течением ($k_2 = 0.198$), слабопроточные или стоячие водоёмы ($k_2 = 0.146$) и малые реки с быстрым течением ($k_2 = 0.802$), подверженные загрязнению токсическими веществами ($k_1 = 0.0103$).

1.2. Решение задачи

Для задачи (1)–(4) составим функцию Понтрягина

$$H(t, x(t), u(t), \lambda(t), \lambda_0) = -\lambda_0(au(t) + x_1(t) + x_2(t)) - \lambda_1(t)(k_1x_1(t) + u(t)) + \lambda_2(t)(k_1x_1(t) - k_2x_2(t)).$$

Пусть $(\tilde{x}(\cdot), \tilde{u}(\cdot))$ — локально-оптимальный процесс в задаче оптимального управления (1)–(4). Тогда выполняется условие максимума

$$H(t, \tilde{x}(t), \tilde{u}(t), \lambda(t), \lambda_0) = \max_{0 \leq u(t) \leq u_0} H(t, \tilde{x}(t), u(t), \lambda(t), \lambda_0) = [-\lambda_0\tilde{x}_1(t) - \lambda_0\tilde{x}_2(t) - \lambda_1(t)k_1\tilde{x}_1(t) + \\ + \lambda_2(t)k_1\tilde{x}_1(t) - \lambda_2(t)k_2\tilde{x}_2(t)] + \max_{0 \leq u(t) \leq u_0} [-\lambda_0au(t) - \lambda_1(t)u(t)]$$

Поскольку первое слагаемое от $u(t)$ не зависит, будем искать максимум от выражения

$$-\lambda_0au(t) - \lambda_1(t)u(t) \rightarrow \max_{0 \leq u(t) \leq u_0} \quad (5)$$

Сопряжённые функции $\lambda_i(t), i = \overline{1, 2}$ определяются по формуле $\lambda'_i(t) = -\frac{\partial H(t)}{\partial x_i}, i = \overline{1, 2}$ и удовлетворяют следующей системе дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \lambda'_1(t) = \lambda_0 + k_1\lambda_1(t) - k_1\lambda_2(t) \\ \lambda'_2(t) = \lambda_0 + k_2\lambda_2(t) \end{cases}$$

Так как в задаче оптимального управления правый конец свободен, то условия трансверсальности принимают вид $\lambda_i(T) = 0, i = \overline{1, 2}$.

Таким образом, краевая задача принципа максимума представима в виде

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -k_1x_1 - \tilde{u} & \begin{cases} x_1(0) = L_0 \\ x_2(0) = D_0 \end{cases} \\ \dot{x}_2 = k_1x_1 - k_2x_2 & \\ \begin{cases} \lambda'_1 = \lambda_0 + k_1\lambda_1 - k_1\lambda_2 \\ \lambda'_2 = \lambda_0 + k_2\lambda_2 \end{cases} & \begin{cases} \lambda_1(T) = 0 \\ \lambda_2(T) = 0 \end{cases} \end{cases}$$

где $\tilde{u}(t)$ с учётом (5) задаётся соотношением

$$\tilde{u}(t) = \begin{cases} u_0, & \text{если } -\lambda_0a - \lambda_1(t) > 0 \\ 0, & \text{если } -\lambda_0a - \lambda_1(t) < 0 \\ [0, u_0], & \text{если } -\lambda_0a - \lambda_1(t) = 0 \end{cases}$$

здесь

$$\lambda_1(t) = \frac{-k_2^2 e^{k_1(t-T)} + k_1^2 e^{k_2(t-T)} - k_1^2 + k_2^2}{k_1k_2(k_1 - k_2)}.$$

Согласно исследованиям, для нерегулярного случая решений нет. Поэтому будут рассмотрены регулярные решения. Возьмём $\lambda_0 = 1$.

2. Исследование подходов к заданию управления

Изучим различные варианты задания управления.

1) Рассмотрим случай, когда $\tilde{u}(t) = u_0$, $t \in [0, T]$, он возможен только тогда, когда на всём отрезке $[0, T]$ выполняется неравенство $-a > \lambda_1(t)$. Согласно результатам проведённых исследований, данное неравенство не выполняется на всём временном интервале.

2) Пусть $\tilde{u}(t) = 0$, $t \in [0, T]$. Управление принимает данное значение, если справедливо неравенство $-a < \lambda_1(t)$. Данное неравенство выполняется на всём отрезке только при больших значениях стоимостного коэффициента, например, в случае $a = 28$. Это позволяет сделать вывод о том, что при высокой стоимости очистных работ смысла в их проведении нет.

3) На основе данных, полученных в п. 1) и 2), задача имеет точку переключения. Возможен только случай, когда

$$\tilde{u}(t) = \begin{cases} u_0, [0, \tau] \\ 0, [\tau, T] \end{cases}$$

Для того, чтобы определить точку переключения τ , необходимо решить уравнение

$$\lambda_1(\tau) = -a \quad (6)$$

Для коэффициента, характеризующего стоимость работ в единицу времени были рассмотрены значения $a = 0.01$; $a = 1$; $a = 6$. После численного решения уравнения (6) были получены результаты, которые приведены в табл.1.

Таблица 1

Значения τ при различных значениях a и k_2

a	0.01	1	6
$\tau, (k_2 = 0.198)$	29.99	28.9997	23.9436
$\tau, (k_2 = 0.146)$	29.99	28.9998	23.9557
$\tau, (k_2 = 0.802)$	29.99	28.9989	23.8718

Для построения графиков изменения концентрации отходов и дефицита кислорода необходимо, чтобы до момента τ рассматривалась система с управлением, описываемая системой (2), а после — система без управления вида

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -k_1 x_1 \\ \dot{x}_2 = k_1 x_1 - k_2 x_2 \end{cases}$$

В данной системе влияние управляющего воздействия отсутствует, и это уравнение описывает естественное поведение системы. Следует отметить, что построенные траектории должны быть непрерывны в момент времени τ .

3. Оценка результатов при различных значениях параметров k_2 и a

Для слабопроточных и стоячих водоёмов были построены графики изменения концентрации отходов и дефицита кислорода при различных значениях стоимостного коэффициента (рис. 1–3). Это позволило выявить, что чем выше данный коэффициент, тем меньше временной интервал на котором осуществляется управление.

Для всех трёх видов водных объектов, рассматриваемых в данной работе, были найдены конечные значения концентрации отходов и дефицита кислорода, а так же посчитан целевой функционал $J(u) = \int_0^{\tau} (au(t) + x_1(t) + x_2(t))dt + \int_{\tau}^T (x_1(t) + x_2(t))dt$. Результаты представлены в табл. 2–4.

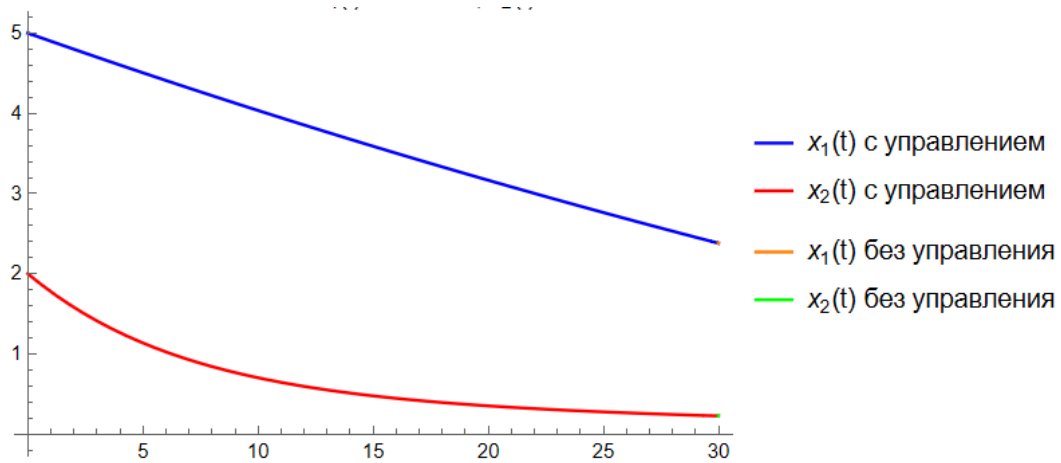


Рис. 1. Графики $x_1(t)$ и $x_2(t)$ при $a = 0.01$; $u_0 = 0.05$

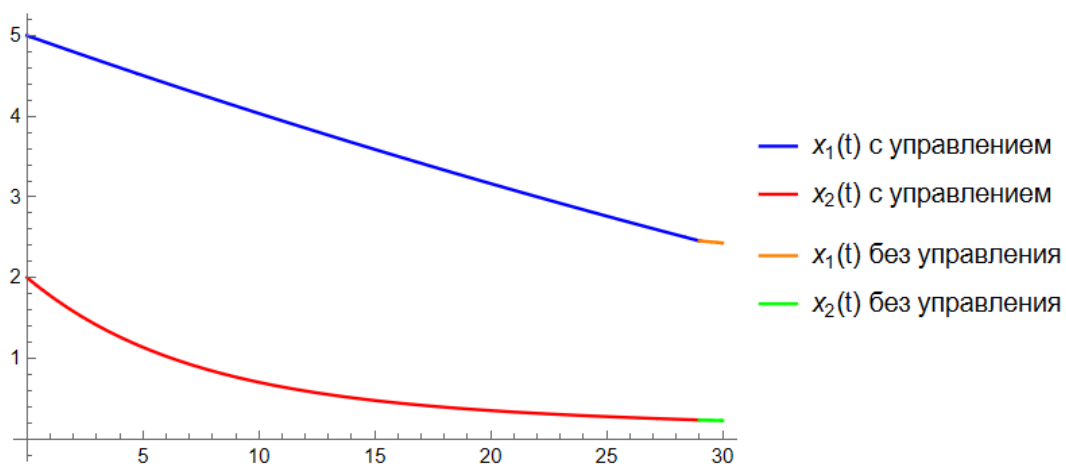


Рис. 2. Графики $x_1(t)$ и $x_2(t)$ при $a = 1$; $u_0 = 0.05$

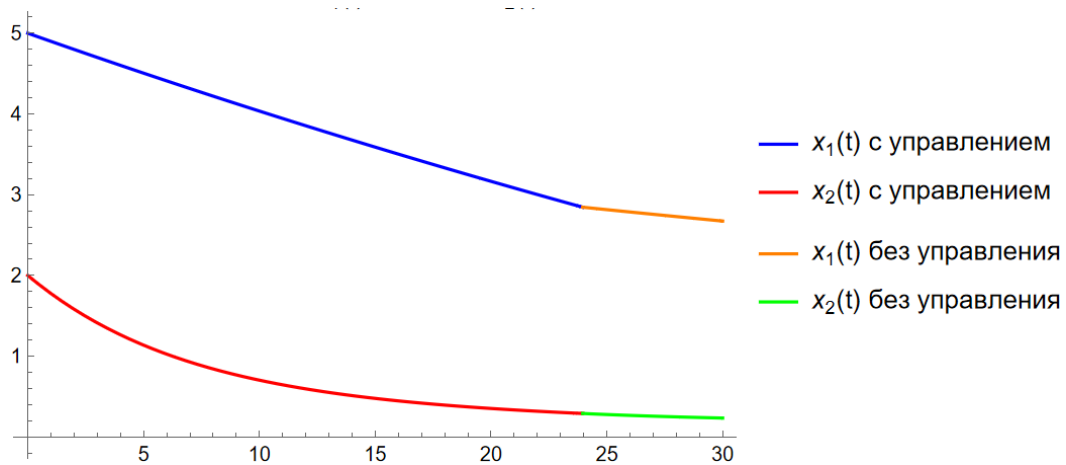


Рис. 3. Графики $x_1(t)$ и $x_2(t)$ при $a = 6$; $u_0 = 0.05$

Таблица 2

Значения $x_1(t)$, $x_2(t)$ и $J(u)$ при различных значениях a для больших рек с медленным течением

Коэффициент a	Концентрация отходов	Дефицит кислорода	Функционал
0.01	2.38102	0.148993	123.705
1	2.43028	0.149234	125.165
6	2.67409	0.155423	131.785

Таблица 3

Значения $x_1(t)$, $x_2(t)$ и $J(u)$ при различных значениях a для слабопроточных или стоячих водоёмов

Коэффициент a	Концентрация отходов	Дефицит кислорода	Функционал
0.01	2.38102	0.226654	128.516
1	2.43027	0.226898	129.976
6	2.67352	0.233654	136.598

Увеличение стоимостного коэффициента приводит к росту общих затрат на очистные работы, что, в свою очередь, не снижает концентрацию отходов и не устраняет дефицит кислорода, а наоборот, приводит к ухудшению этих показателей.

Таблица 4

Значения $x_1(t)$, $x_2(t)$ и $J(u)$ при различных значениях a для малых рек с быстрым течением

Коэффициент a	Концентрация отходов	Дефицит кислорода	Функционал
0.01	2.38102	0.0317816	112.552
1	2.43032	0.0319818	114.012
6	2.67746	0.0348396	120.626

В малых реках наблюдается наименьшее значение функционала по сравнению со слабопроточными водоёмами и большими реками при одинаковых коэффициентах. Дефицит кислорода в малых реках также значительно ниже, нежели в двух других видах водоёмов. При этом концентрация отходов примерно одинакова для различных водных объектов.

Заключение

Проведённые в данной работе исследования позволили выявить, что высокая стоимость очистных работ не всегда оправдана. Стоит отметить, что чем выше стоимостный коэффициент, тем меньше времени требуется для управления процессом. Однако, его увеличение не приводит к улучшениям в состоянии экосистем, а способствует росту затрат и ухудшению качества воды.

Кроме того, анализ показал, что малые реки отличаются лучшими показателями дефицита и требуют меньших ресурсов на проведение очистных мероприятий, нежели слабопроточные водоёмы, затраты на очистку которых самые высокие в сравнении с остальными рассматриваемыми типами водных объектов.

Таким образом, для достижения оптимального результата в области очистки водоёмов необходимо учитывать как экономические, так и экологические факторы, а также выбирать и применять технологии для очищения вод с учётом особенностей конкретного типа водоёма.

Литература

1. Андреева Е. А. Вариационное исчисление и методы оптимизации: учеб. пособие / Е. А. Андреева, В. М. Цирулёва. – Тверь : Твер. гос. ун-т, 2001. – 576 с.
2. Исследование операций. В 2 т. Т. 2. Модели и применения / Р. Браун, Р. Мэзон, Э. Фламгольд [и др.]; отв. ред. Дж. Моудера. – Москва : Мир, 1981. – 677 с.
3. Местецкий Л. М. Математические модели в экологии: учеб. пособие / Л. М. Местецкий. – Тверь : Твер. гос. ун-т, 1997. – 40 с.
4. Пэнгл Р. Методы системного анализа окружающей среды / Р. Пэнгл. – Москва : Мир, 1979. – 214 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО И ЭМЕРДЖЕНТНОГО ИНТЕЛЛЕКТА

М. А. Принев

Воронежский государственный университет

Аннотация. В статье дается понятие децентрализованного и эмерджентного интеллекта в сложных многоагентных системах (МАС), приводится обоснование оптимальности использования технологий МАС для реализации интеллектуальных децентрализованных систем, раскрывается сущность самоорганизованных систем и значения самоорганизации в возникновении эмерджентности системы, рассматривается сетевая концепция многоагентных систем и свойства, присущие недетерминированной интеллектуальной системе умных сервисов, описывается гипотеза возникновения эмерджентного интеллекта в сложных самоорганизующихся системах.

Ключевые слова: децентрализованный интеллект, эмерджентность, самоорганизация, эмерджентный интеллект, многоагентные технологии, сетевая концепция, автономный агент, интеграционные решения, адаптивность, распределенность, киберфизическая система.

Введение

В настоящее время информационные технологии занимают ведущее положение во всех сферах деятельности и немаловажное место среди них занимает искусственный интеллект (ИИ). Понятие ИИ подразумевает «комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение, поиск решений без заранее заданного алгоритма и достижение инсайта) и получать при выполнении конкретных практически значимых задач обработки данных результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека» [1]. Динамичное развитие ИИ происходит в значительной степени за счет развития технологий больших данных и глубокого обучения на основе нейронных сетей, в которых достигнуты большие успехи в обработке естественных языков, оптимизации сложных вычислений, методах восприятия и представления знаний и в других областях. Таким образом, в современных условиях наибольшее развитие получает так называемый централизованный ИИ.

Одной из важнейших задач, решения которой ждут от ИИ, является автоматизация процессов принятия решений в условиях существенных неопределенностей и дефицита информации в режиме реального времени. Это становится особенно актуальным для Интернета вещей, киберфизических и роботизированных систем, для приложений глобальной логистики, децентрализованной экономики и других областей, которые формально описываются сетевыми структурами с большим числом узлов и сложными динамическими связями разной семантики, то есть многоагентными системами (МАС) [2]. Свойства систем, позволяющие рассматривать МАС как децентрализованный ИИ, а также признаки и критерии проявления эмерджентного интеллекта в недетерминированных системах являются актуальными вопросами для научных исследований.

1. Многоагентные технологии для реализации децентрализованного интеллекта

Технология и архитектура МАС и автономного агента (АА) [3] являются оптимальными для разработки приложений с использованием децентрализованного интеллекта. Это обе-

спечивается структурированием МАС по принципу сетецентрического управления («равный с равным»), что означает уход от строгой иерархии и центрирования системы, повышением требований к интеграции между агентами и сервисами, а также базовыми свойствами самих АА, актуальными для использования в децентрализованных системах. Такими свойствами являются:

- автономность АА;
- про-активное поведение АА;
- интерактивность АА.

Автономность агента позволяет не только решать поставленные задачи без внешнего контроля и вмешательства, но и контролировать действия и внутреннее состояние агента самим АА. Про-активное поведение агента дает ему возможность при управлении своим поведением принимать во внимание не только информацию, полученную им из внешнего мира, но и предысторию своих действий и состояний внешней среды (генерировать сообщения и посылать их другим агентам даже при отсутствии входных событий). Интерактивность АА определяет способность агентов оказывать то или иное влияние друг на друга. Эти свойства позволяют обеспечить детерминированность системы. Таким образом, МАС, сформированная из АА способна генерировать решение сложных задач.

В системе децентрализованного ИИ, основанного на парадигме МАС, в каждом автономном узле (кластере) сети существует АА, который управляет внутренним поведением и состоянием программных или аппаратных компонент кластера, взаимодействуя при этом с агентами других узлов МАС посредством обмена сообщениями в асинхронном режиме, то есть является представителем своего кластера во внешней, по отношению к узлу, среде. При этом АА получает динамически обновляемую информацию из внешней среды, формирует пул информации в собственном кластере, обрабатывает информацию от ограниченного числа соседних агентов или пересылает информацию другому АА. При этом существенно сокращаются ресурсные и временные затраты на обработку информации, подобно тому, как это происходит в архитектуре распределенных и периферийных вычислений [2, 4].

В сетецентрической концепции МАС важное значение приобретают интеграционные решения, которые должны обеспечить децентрализованную систему функциональными возможностями для реализации основных этапов работы с сообщениями в режиме асинхронности, а именно, надежную работу при отправке, обработке и получении сообщений, а также функционирование логистических каналов для доставки сообщений. Благодаря асинхронному принципу работы, обеспечивается высокий уровень надежности, так как при транспортировке информация хранится в промежуточном независимом хранилище, бесшовность работы независимых элементов системы, которые гарантированно получают необходимые сообщения в нужное время, не вступая в непосредственный контакт друг с другом, что служит также и гомогенизации приложений, так как обеспечивает кроссплатформенность и языковую интеграцию [5, 6].

Таким образом, для реализации децентрализованного ИИ необходима технология МАС, представляющая из себя недетерминированную интеллектуальную систему умных сервисов. Подобная система должна обладать следующими свойствами [7]:

- открытость — это возможность вводить новые сервисы в работающую систему, а также осуществлять вывод сервисов из эксплуатации без остановки и перезапуска, при этом возможности динамического установления связи и появления взаимодействия между сервисами должны осуществляться в соответствии со специальными протоколами;
- распределенность — это свойство обеспечивает непрерывную, параллельную и асинхронную работу всех сервисов, при этом все сервисы могут вызываться другими сервисами как напрямую, так и проактивно, то есть быть инициированы событиями, сгенерированными

ми системой в соответствии с внутренним ее состоянием, а также критериями и ограничениями, зависящими от предпочтений в принятии решений;

- адаптивность — это способность системы изменять структуру или функции под действием внешних факторов для повышения своей эффективности, в частности, способность адаптивно реагировать на события, отвечая на изменение внешних условий, частично изменять внутренние критерии;

- самоорганизация — способность сервисов системы самостоятельно устанавливать локальные связи и в ходе работы пересматривать их при изменении ситуации.

Самоорганизация является основополагающим свойством МАС, позволяющим реализовать децентрализованный ИИ при помощи многоагентных технологий. Самоорганизация в МАС представляет собой совокупность внутренних процессов локальных взаимодействий компонент системы и множество отношений между компонентами системы, которые определяют структуру их взаимодействия в динамике функционирования. Таким образом, самоорганизация системы можно интерпретировать как процесс, ведущий к возникновению, поддержанию и изменению организации системы без явного внешнего управления, причем изменения возникают только за счет внутренних взаимодействий, а сам процесс является динамическим. Самоорганизация обладает следующими свойствами [2, 8]:

- автономность — отсутствие управления со стороны внешней среды, глобальный порядок, который возникает в системе за счет внутренних локальных взаимодействий ее компонент;

- эмерджентность — появление у системы свойств, не присущих её элементам в отдельности или несводимость свойств системы к сумме свойств её компонент;

- диссипация — рассеяние энергии в неустойчивых состояниях при отсутствии внешних возмущений; что приводит к переходам в стабильные состояния с эмерджентными свойствами;

- нелинейная динамика — неустойчивость и чувствительность к начальным состояниям и к малым изменениям параметров, когда при их малых флуктуациях в некоторых критических точках пространства состояний поведение системы может меняться значительно, и это свойство не может быть выведено из свойств отдельных компонент;

- множественность устойчивых состояний (аттракторов, точек притяжения);

- избыточность компонент системы и их взаимодействий, что влечет нечувствительность к их выходу из строя (отказоустойчивости);

- адаптивность — способность изменять свое поведение и переходить в новое устойчивое состояние с изменением структуры системы;

- сложность, обусловленная большим числом компонент и эмерджентностью ее глобальных свойств и поведения;

- простота правил взаимодействия компонент, влекущих за собой сложное поведение системы, не вытекающее из правил взаимодействия;

- наличие иерархии — самоорганизующаяся система описывается не менее, чем на двух уровнях: на уровне локальных взаимодействий компонент и на глобальном уровне, где проявляются эмерджентные свойства.

В настоящее время преобладают централизованные технологии с использованием ИИ, однако, появляется все больше запросов на использование децентрализованного ИИ, например, технологии периферических вычислений, мобильная робототехника, группы беспилотных аппаратов, вычисления на устройствах «интернета вещей» [9]. Децентрализованный искусственный интеллект опирается на технологию МАС, что подразумевает сетцентрический подход, при котором множество распределенных узлов сети активно взаимодействуют с друг другом для решения общих задач. Топология сети при этом является динамической, что влечет за собой задачу построить коммуникацию сети с динамической маршрутизацией сообщений. Еще одной задачей является обеспечение устойчивости и адаптивности децентрализованных алгоритмов управления. Использование в МАС различных сенсорных данных ставит пробле-

му слияния гетерогенных данных, получаемых системой от сети сенсоров. Для решения этих задач могут быть применены методы агрегирования (усреднения) информации об объектах в системе в целом или какой-то ее части, формирования кластерных структур (коалиций) в процессе функционирования больших сложных сетевых систем (групп роботов, роботизированных устройств, агентов) с локальными взаимодействиями [2, 10]. Эффективным решением могут стать децентрализованные алгоритмы, включающие протоколы переговоров, построенных на базе метода компенсаций. В основу этого метода положены индивидуальные функции удовлетворенности и бонусы/штрафы программных агентов. Эти функции регулируют эластичность агентов по отношению к взаимным уступкам при разрешении выявленных конфликтов в процессе переговоров [2, 11].

2. Эмерджентный интеллект

Эмерджентность является особым свойством самоорганизующейся МАС, это динамическое появление глобального порядка, структуры, свойства как интегрального результата локальных взаимодействий элементов системы. В качестве примера эксперимента по выявлению эмерджентных свойств МАС можно привести Модель MANTA, ориентированную на создание программной среды для реализации «социальных вычислений» [12].

Система MANTA состоит из агентов трех типов: агенты (сотрудники: матка, рабочие муравьи, мужские особи), зависимые агенты (личинки на разных стадиях развития, коконы), «физические» агенты (свет, влажность, мусор, погибшие муравьи). Агенты могут создавать стимулы в окружающей среде, которые обладают свойством вызывать реакцию определенных групп других агентов, при этом могут существовать агенты, не реагирующие на конкретный стимул. Имитационные эксперименты проводились с использованием модели, воспроизводящей лабораторные условия, в которых изучался естественный социогенез, при этом форма лабораторного гнезда была такой же, как на рис. 1.

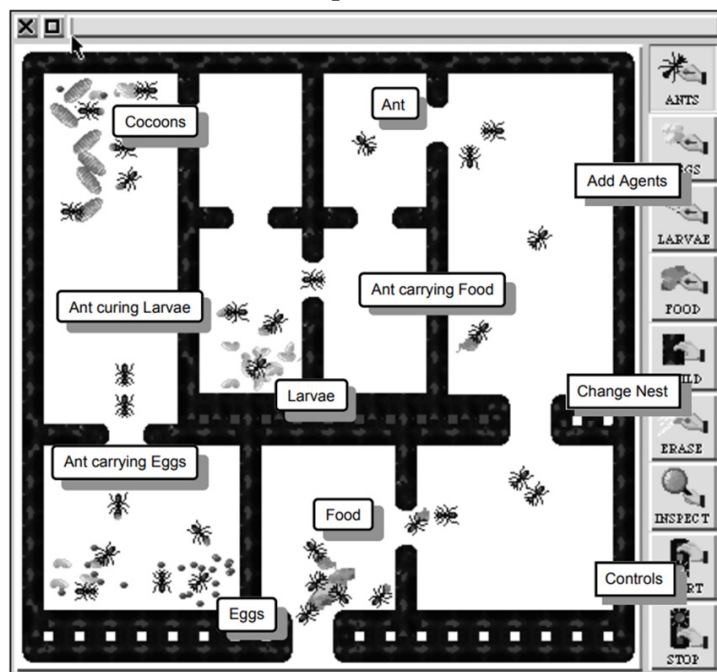


Рис. 1. Имитационное гнездо [12]

Цель эксперимента — определить, какую стратегию развития используют королева и первые рабочие, которые преуспели в создании колонии. Под эмерджентной стратегией исследо-

ватели понимали глобальное долгосрочное поведение, которое с точки зрения наблюдателя выглядит как стратегия, но которое не было закодировано в поведении агентов. На рис. 2. представлен график одного из удачных экспериментов, на котором выявлена связь между линиями развития яиц и личинок, не запрограммированная разработчиками.

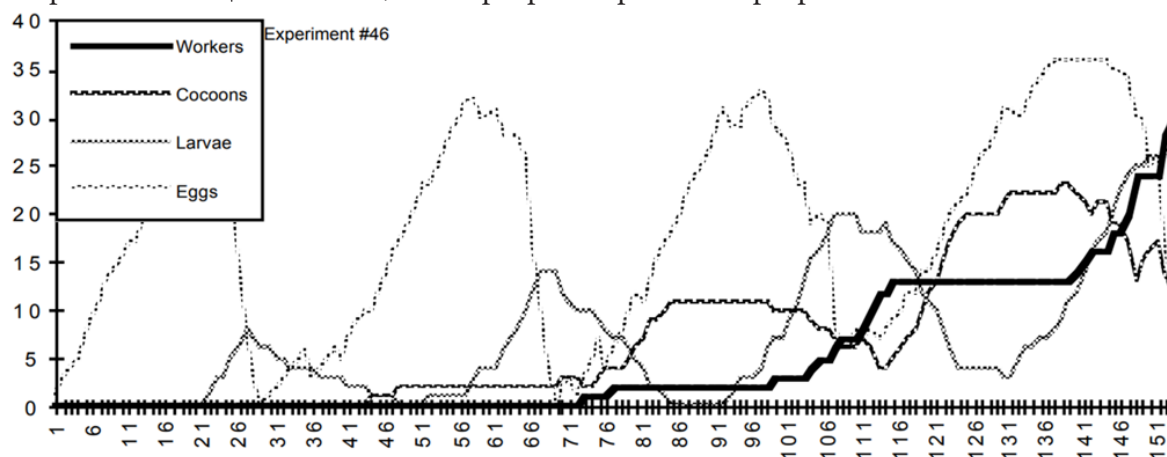


Рис. 2. Пример демографической эволюции колонии [12]

Для подтверждения возникновения эмерджентной стратегии поведения агентов была проведена серия экспериментов, которая подтвердила устойчивость возникшей связи и опровергла ее случайное единичное проявление.

Именно самоорганизация и эмерджентность порождают эволюционное развитие, зависимость от предыстории событий, появление новых качеств системы, которые не были заложены в алгоритмы ее компонентов. Таким образом эмерджентный интеллект можно определить, как спонтанную недетерминированную цепочку согласованных изменений состояний агентами, находящими решение новой проблемы или повышающими ценность уже имеющегося решения, возникающую реактивно (под действием внешних событий) или проактивно (из внутренних причин или мотивов). Понятие эмерджентного интеллекта и характеристика принципов его построения впервые были опубликованы в [13], где анализировалась работа МАС логистической компании и были выявлены волновые нелинейные эффекты, нехарактерные для детерминированного программирования. Эти эффекты выражались в периодических колебаниях, резонансных явлениях и катастрофах в расписании и логистических маршрутах компании, которые оказались проявлением самоорганизации и эмерджентности агентов системы и не были заложены в алгоритмы их деятельности. Изучение таких эффектов, даже деструктивных позволит моделировать в самоорганизующихся системах творческие акты с непрерывным переходом от порядка к хаосу, и наоборот.

Гипотеза существования нового класса децентрализованных систем ИИ, систем эмерджентного интеллекта является перспективным направлением в научных исследованиях. Основными задачами, требующими проработки для реализации эмерджентного интеллекта при помощи технологии МАС являются такие, как: алгоритмы и технологии самоорганизации, методологии создания систем ЭИ, модели, методы и алгоритмы коллективного принятия решений в ЭИ, компоненты инструментария для создания систем ЭИ, сетевая платформа и экосистема умных сервисов [2].

Заключение

Сетевая парадигма позволяет использовать технологии МАС для реализации децентрализованного интеллекта. Разработка недетерминированной интеллектуальной системы умных сервисов должна обеспечить решение следующего комплекса задач:

- построение коммуникации сети с динамической маршрутизацией сообщений;
- обеспечение устойчивости и адаптивности децентрализованных алгоритмов управления;
- оптимизация слияния гетерогенных данных, получаемых системой.

Многоагентные системы, обладающие самоорганизацией, являются сложными динамическими системами, в которых возникает явление эмерджентности. В рамках научных исследований идея ЭИ является перспективным направлением, в котором решаются такие актуальные задачи, как:

- условия и предпосылки возникновения явления эмерджентности в недетерминированных системах;
- алгоритмы и технологии самоорганизации;
- методологии создания систем ЭИ;
- модели, методы и алгоритмы коллективного принятия решений в ЭИ;
- компоненты инструментария для создания систем ЭИ.

Исследование условий возникновения эмерджентности в сложных самоорганизующихся МАС позволит подтвердить гипотезу существования нового класса децентрализованных систем ИИ и реализовать эмерджентный интеллект, как управляемое эволюционное развитие сложных интеллектуальных киберфизических и роботизированных систем.

Литература

1. ГОСТ Р 59277-2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта (утвержден и введен в действие приказом Росстандарта от 23.12.2020 № 1372-ст). Москва : Стандартинформ, 2021.
2. Городецкий В. И. Децентрализация, самоорганизация и эмерджентный интеллект – цифровой взрыв умных технологий / В. И. Городецкий, О. Н. Граничин, П. О. Скобелев // Материалы общих заседаний 15-й Мультиконференции по проблемам управления : Материалы конференции, Санкт-Петербург, 04–06 октября 2022 года. – Санкт-Петербург: «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2022. – С. 40–54. – EDN WRECHZ.
3. Леденева Т. М. Многоагентные системы: модели агентов и постановки задач, обеспечивающие их характерные свойства (часть 1) / Т. М. Леденева, М. А. Принев // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2024. – № 3. – С. 50–73. – DOI 10.17308/sait/1995-5499/2024/3/50-73. – EDN GHJMUH.
4. Zhang Y. Mobile Edge Computing. Simula SpringerBriefs on Computing. – 2022. – Vol. 6. – 113 p.
5. Принев М. А. Проблемы выбора и исследования эффективности способа интеграции распределенных систем / М. А. Принев // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 12–14 декабря 2022 года / Воронежский государственный университет. – Воронеж : Научно-исследовательские публикации, 2023. – С. 889–893. – EDN UXKLWG.
6. Принев М. А. Цифровая экосистема как перспективное решение для повышения надежности работы мультиагентных систем управления / М. А. Принев // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 04–06 декабря 2023 года. – Воронеж: Общество с ограниченной ответственностью «Вэлборн», Издательство «Научно-исследовательские публикации», 2024. – С. 1589–1595. – EDN TKHGLH.
7. Городецкий В. И. Концептуальная модель цифровой платформы для кибер-физического управления современным предприятием. Часть 1. Цифровая платформа и цифровая экосисте-

ма / В. И. Городецкий, В. Б. Ларюхин, П. О. Скобелев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 6. – С. 323–332. – DOI 10.17587/mau.20.323-332. – EDN FNFLIN.

8. *Городецкий В. И.* Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации / В. И. Городецкий // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2012. – № 2. – С. 92–120. – EDN OWWXXZ.

9. *Cao L.* Decentralized AI: Edge Intelligence and Smart Blockchain, Metaverse, Web3, and DeSci. IEEE Intelligent Systems, June 2022, P. 6 – 19

10. *Granichin O., Uzhva D., Volkovich Z.* Cluster Flows and Multiagent Technology. Mathematics 2021, 9, 22. – URL: <https://doi.org/10.3390/math9010022> (дата обращения 25.10.2024).

11. *Rzevski G., Skobelev P.* Managing Complexity, 1st ed.; WIT Press : London, UK; Boston, MA, USA, 2014. – 216 p.

12. *Drogoul Alexis, Corbara Bruno, Lal Steffen.* MANTA: New Experimental Results on the Emergence of (Artificial) Ant Societies. Artificial Societies: The Computer Simulation of Social Life. – 2001. – URL: https://www.researchgate.net/publication/2465419_MANTA_New_Experimental_Results_on_the_Emergence_of_Artificial_Ant_Societies (дата обращения 25.10.2024).

13. *Rzevski George, Skobelev Petr.* 01 – 16 IJEIT 2007 Vol-12 Emergent-Intelligence-in-Large-Scale-Multi-Agent-Systems // International Journal of Information and Communication Technologies in Education. – 2007. – 1. 64. – URL: https://www.researchgate.net/publication/360456803_01_-_16_IJEIT_2007_Vol-12_Emergent-Intelligence-in-Large-Scale-Multi-Agent-Systems (дата обращения 25.10.2024).

ИЗМЕНЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ, БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРИ ВНЕДРЕНИИ ПРАКТИК ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

Ю. С. Прохоров

Центральная дирекция здравоохранения – филиал ОАО «РЖД»

Аннотация. Рассматриваются процессы изменения организационной структуры, бизнес-процессов, организационной культуры машиностроительных предприятий при реализации проектов цифровой трансформации. Предложены практические подходы, которые могут быть использованы управленческими органами предприятий для выполнения организационных изменений. Рассмотрены инструменты контроля реализации проектов цифровой трансформации, позволяющие своевременно корректировать дорожные карты проектов, достигая стратегических целей предприятия.

Ключевые слова: цифровая трансформация, машиностроительное предприятие, проект цифровой трансформации, портфель проектов цифровой трансформации, показатели эффективности, бизнес-процессы, организационная структура, организационная культура.

Введение

На сегодняшний день внедрение практик цифровой трансформации машиностроительных предприятий подразумевает глубокое изменение организационных структур и ключевых бизнес-процессов предприятия при поддержке трансформируемой организационной культуры.

Основной эффект от цифровой трансформации зачастую зависит не столько от внедрения новых цифровых технологий, таких как искусственный интеллект, использование больших данных, интернета вещей и других, а от глубокого преобразования процессов, организационных структур и организационной культуры предприятия. В качестве таких эффектов можно рассматривать появление новых продуктов с цифровыми свойствами, кардинальное сокращение сроков вывода продукции на рынок, что в конечном итоге ведет к достижению стратегических целей предприятия.

В статье предложены практические шаги по подготовке, согласованию и утверждению концепции цифровой трансформации предприятия, которые могут быть использованы управляющими органами компании. Также предложен алгоритм формирования портфеля проектов цифровой трансформации и необходимые организационные изменения для поддержки его выполнения.

В данной статье рассматриваются все ключевые этапы цифровой трансформации предприятия, начиная с разработки концепции, управления проектами ее реализацией и заканчивая самым изменением бизнес-процессов и оценкой достигнутых результатов выполненных проектов.

1. Подготовка, согласование и утверждение концепции цифровой трансформации

Процесс цифровой трансформации начинается с подготовки концепции, которая станет основой для дальнейших действий.

Цели и способы реализации цифровой трансформации зависят от глобального позиционирования предприятия, его стратегических целей и направлений изменения бизнес-процессов. Для подтверждения выбранных подходов и ключевых точек приложения усилий по цифровой

трансформации, перед разработкой и утверждением самого документа «Концепция цифровой трансформации» необходимо рассмотреть и утвердить эти подходы внутри предприятия.

Концепция цифровой трансформации определяет [1]:

1. Ее цели и задачи в целом;
2. Ключевые объекты цифровой трансформации, необходимые изменения, задачи и измеримые результаты;
3. Целевую архитектуру деятельности предприятия на основе внедренных средств и технологий, основные компоненты (цифровые платформы) и ключевые вехи создания цифровой архитектуры;
4. Систему управления реализацией стратегии, включая методические подходы, технологии и организационное обеспечение;

5. Первоочередные стратегические мероприятия и инициативы (проекты).

Этап подготовки данного документа включает в себя следующие действия, которые могут быть взяты за основу управляющими органами предприятия:

1. Анализ текущего состояния предприятия:
 - Определение уровня цифровой зрелости;
 - Выявление сильных и слабых сторон текущей бизнес-модели;
 - Анализ внешней среды, включая конкурентный ландшафт и ключевые технологические тренды в отрасли, в которой работает предприятие.
2. Формулировка целей с сфере цифровой трансформации:
 - Постановка стратегических целей цифровой трансформации;
 - Определение ключевых показателей эффективности (KPI), которые позволят оценить успех внедрения.
3. Разработка концепции:
 - Формирование основного видения цифрового будущего предприятия;
 - Выбор приоритетных направлений для внедрения цифровых технологий.
4. Согласование и утверждение документа:
 - Обсуждение концепции с ключевыми заинтересованными сторонами;
 - Внесение правок с учетом их предложений;
 - Утверждение концепции на уровне руководства предприятия.

На этом этапе важно вовлечь сотрудников всех уровней, поскольку цифровая трансформация влияет на всю организацию. Прозрачность процессов и четкое объяснение целей помогают снизить возможное сопротивление организационным изменениям.

Рассмотрим возможный способ формулировки целей и задач цифровой трансформации, он состоит из проведения двух стратегических сессий. На рис. 1 приведены ключевые вопросы, которые должны быть рассмотрены на этих сессиях и ожидаемые их результаты.

Если на предприятии нет зрелой стратегической функции, способной возглавить организацию и проведение стратегической сессии, то тогда целесообразно нанять внешнего методолога для выполнения этих работ.

1 сессия

Вопросы на стратегическую сессию

- Чем мы не занимаемся, от чего отказываемся
- Какие новыми цифровыми продуктами мы будем заниматься, как мы принципиально поменяем наши процессы внутри компании с помощью ИТ инструментов

Результат стратегической сессии

- Концепция цифровой трансформации с набором инициатив цифровой трансформации

2 сессия

Вопросы на стратегическую сессию

- Валидация инвест бюджета на цифровую трансформацию
- Как эта стратегия выдерживает стресс тесты по определенным метрикам

Результат стратегической сессии

- Понятный и простой документ для персонала (как мы придем из точки А в точку Б), это не рекламный буклет. Ляжет в основу формализованной стратегии цифровой трансформации

Рис. 1. Ключевые вопросы и ожидаемые результаты проведения стратегических сессий

После проведения этих двух стратегических сессий, и всех указанных выше шагов на предприятии появляется подтвержденная высшим руководством концепция цифровой трансформации, которая должна быть реализована в дальнейшем с помощью выполнения ряда подтвержденных проектов цифровой трансформации, алгоритм формирования будет рассмотрен в следующем разделе.

2. Формирование портфеля проектов цифровой трансформации и управление им

После утверждения концепции на предприятии начинается формирование портфеля проектов для ее реализации. Этот этап включает в себя следующие шаги:

1. Идентификация проектов:

- Определение инициатив, соответствующих целям цифровой трансформации;
- Учет факторов: их срочность, стратегическая важность, потенциальный эффект от их внедрения.

2. Расстановка приоритетов проектов (приоритезация):

- Оценка проектов по критериям: ROI, риски, требуемые ресурсы, временные затраты;
- Создание дорожной карты реализации каждого проекта с учетом их взаимосвязей и влияния друг на друга.

3. Управление портфелем проектов:

- Назначение ответственных лиц за каждый проект в соответствии с ролями, принятыми в нормативной документации предприятия;
- Выбор использования методов проектного управления (например, Agile, Waterfall) для координации действий и выполнения проектов.

4. Мониторинг и контроль проектов и портфеля в целом:

- Постоянная оценка выполнения задач;
- Обновление приоритетов и корректировка дорожной карты на основе текущих результатов.

В общем случае алгоритм выбора стратегических инициатив (проектов) для реализации представлен на рис.2.

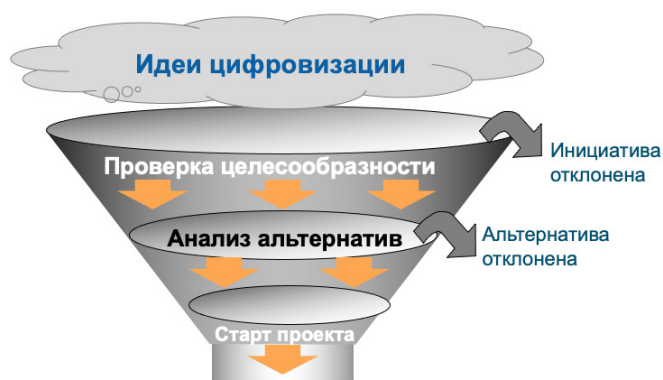


Рис. 2. Алгоритм выбора стратегических инициатив (проектов) для реализации

Эффективное управление портфелем проектов позволяет сосредоточиться на стратегически значимых инициативах, минимизировать риски и максимально использовать доступные ресурсы предприятия.

Таким образом после этого этапа, на предприятии сформирован портфель проектов цифровой трансформации, назначены ответственные за их реализацию, и внедрены постоянные инструменты отслеживания прогресса. Но этого зачастую не достаточно для их успешной реализации, и в компании требуется проведение организационных изменений для поддержки выполнения портфеля проектов, которые будут рассмотрены в следующем разделе.

3. Типовые изменения бизнес-процессов, оргструктуры, организационной культуры

Цифровая трансформация предполагает масштабные организационные изменения внутри предприятия, направленные на поддержку успешного выполнения портфеля проектов. Эти организационные изменения проводятся в трех ключевых областях:

1. Бизнес-процессы:

- Оптимизация процессов за счёт автоматизации и внедрения цифровых технологий;
- Внедрение новых процессов, свойств продукта, ориентированных на потребителя, и создание омниканальных взаимодействий с ним на этапах обслуживания продукции.

2. Организационная структура:

- Переход к более гибким моделям управления, децентрализация принятия решений;
- Создание новых ролей, таких как Chief Digital Officer, аналитик данных;
- Создание новых органов управления для реализации цифровой трансформации. Пример возможной реализации этих органов управления представлен на рис. 3. и должен быть зафиксирован в Корпоративной системе управления проектами [2].



Рис. 3. Органы управления проектами

3. Организационная культура:

- Развитие цифровой грамотности сотрудников;
- Внедрение культуры инноваций, экспериментов и готовности к изменениям;
- Снижение иерархичности, повышение уровня открытости и вовлечённости сотрудников в новые процессы.

Возможные точки приложения управленческих усилий могут быть сконцентрированы на ключевых компонентах пропагандируемых ценностей необходимых для успешного внедрения проектов, которые указаны на рис. 4 [3].

Изменения в этих областях позволяют предприятию адаптироваться к новым условиям рынка, быстрее реагировать на изменения и создавать ценность для потребителей продукции.

4. Оценка результативности и эффективности цифровой трансформации

Оценка результативности цифровой трансформации — ключевой этап, который позволяет измерить успех внедряемых и внедренных изменений. Рассмотрим различные подходы к его оценке:

1. Ключевые показатели эффективности (KPI):

- Финансовые: рост выручки, сокращение затрат, увеличение рентабельности;



Рис. 4. Компоненты ценности организационной культуры

– Операционные: скорость выполнения процессов, уровень автоматизации, снижение количества ошибок.

На рис. 5 представлена схема показателей. Предложенная система показателей направлена на сквозную каскадную систему установки показателей как самой ЦТ так и показателей отдельных функциональных подразделений и их участия во вкладе в результаты отдельных проектов цифровой трансформации [3].

Ключевые показатели эффективности

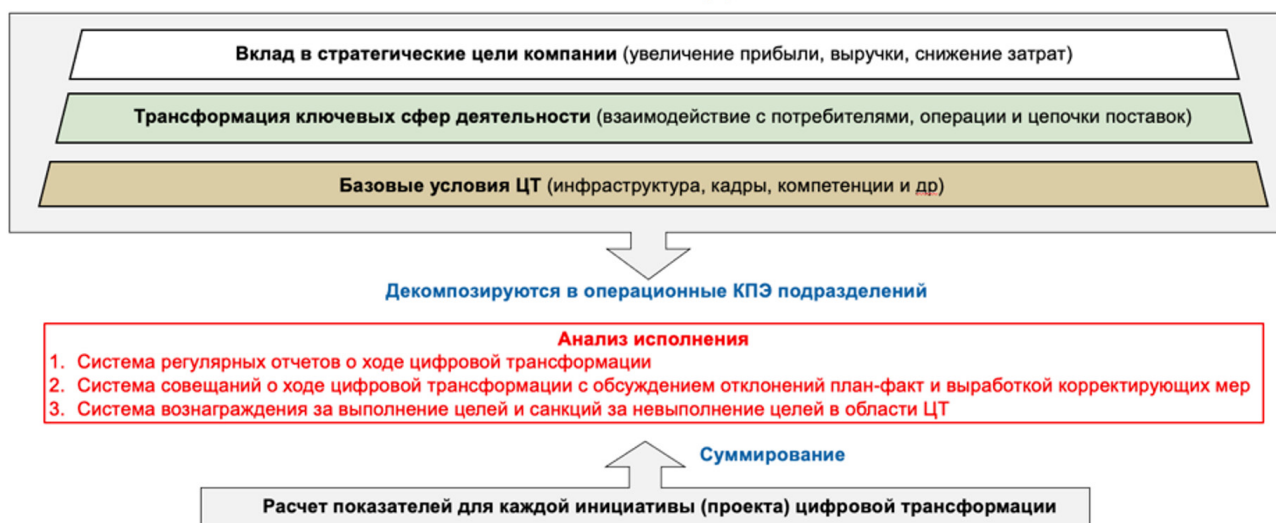


Рис. 5. Ключевые показатели эффективности

2. Качественные показатели:

- Уровень удовлетворенности потребителя продукции;
- Уровень вовлечённости сотрудников;
- Снижение сопротивления изменениям.

3. Инструменты оценки:

- Регулярные отчёты и аналитика данных;
- Проведение опросов среди клиентов и сотрудников;
- Использование систем мониторинга, таких как BI-платформы.

4. Корректировка стратегии:

- На основе полученных данных анализируются сильные и слабые стороны внедренных решений;
- Вносятся изменения в стратегию цифровой трансформации.

Эффективная оценка позволяет определить успех цифровой трансформации и скорректировать дальнейшие действия, обеспечивая долгосрочные преимущества для предприятия.

Заключение

Таким образом, можно констатировать, что цифровая трансформация — это комплексный процесс, который требует не только внедрения новых технологий, но и изменений в подходах к управлению, внутренних бизнес-процессах и корпоративной культуре предприятия. Успех таких изменений определяется наличием четкой бизнес стратегии, сформированной, согласованной и утвержденной концепцией цифровой трансформации, эффективным управлением проектами ее реализации и готовностью самого предприятия адаптироваться к рыночным вызовам.

Предприятия, которые инвестируют в проекты цифровой трансформации, получают значительные конкурентные преимущества: увеличивают свою операционную эффективность, улучшают клиентский опыт и развивают инновационный потенциал своих продуктов. Однако, чтобы достичь этих целей, важно постоянно анализировать промежуточные результаты всех выполняемых проектов, вовремя корректировать подходы и вовлекать в эти изменения сотрудников на всех уровнях управления.

Цифровая трансформация — это не разовое событие, а постоянный процесс, который должен стать частью долгосрочной стратегии предприятия. Только в этом случае можно добиться устойчивого роста и успешной адаптации к динамично меняющимся условиям цифрового мира.

Таким образом, предложенные подходы позволяют управляющим органам машиностроительных предприятий применяя их, достигать стратегических целей и быстро адаптироваться к рыночным вызовам.

Литература

1. Прохоров Ю. С. Цифровая трансформация группы ОСК. Оценка подходов к ее реализации / Ю. С. Прохоров, А. А. Егорова // Морской вестник. – 2020. – №1. – С.15–16.
2. Сооляттэ А. Ю. Управление проектами в компании: методология, технологии, практика : учебник / А. Ю. Сооляттэ; МФПУ «Синергия» – Москва : Изд-во МФПУ «Синергия» 2012. – 815 с.
3. Прохоров Ю. С. Об организационных подходах к подготовке, обоснованию и подтверждению результатов проектов цифровой трансформации машиностроительных предприятий дискретного типа производства / Ю.С. Прохоров // Электронный научный журнал «ИТ-Стандарт». – 2024. – № 2. – С. 14–23.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ В КОНТЕКСТЕ ГЕНЕРАЦИИ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ОБЪЕКТАМИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ВХОДНОГО НАБОРА ДАННЫХ

М. А. Пучкова

МИРЭА – Российский технологический университет

Аннотация. В статье рассматривается возможность применения алгоритмов и методов решения задач оптимизации в контексте генерации связей между объектами с учетом особенностей входного набора данных. Выявлены ключевые особенности применения алгоритмов и методов решения задач оптимизации, в том числе методов линейного программирования. Рассмотрены различные типы связей между объектами, отражающих их зависимости, ограничения и взаимоотношения в процессе поиска оптимального решения. В работе предложен подход для решения задачи оптимального распределения дисциплин (задач) между преподавателями (исполнителями), учитывающий особенности входного набора данных.

Ключевые слова: методы оптимизации, алгоритмы оптимизации, генерация связей, связи между объектами, рекомендательные связи, семантическая связь, линейное программирование, динамическое программирование.

Введение

Алгоритмы и методы решения задач оптимизации представляют собой основу для эффективного и рационального управления ресурсами, процессами и принятием решений в различных сферах. Такие методы предназначены для поиска наилучшего (оптимального) решения в условиях ограниченных ресурсов и множественных критериев, что делает их неотъемлемым инструментом в математическом моделировании, экономике, инженерии и управлении. Применение таких методов и алгоритмов направлено на повышение эффективности деятельности, рациональное распределения ресурсов, принятие обоснованных решений, а также решение сложных практических задач, которые могут включать элементы неопределенности и изменяющиеся условия, таких как маршрутизация, проектное планирование, распределение и управление запасами и т. д.

1. Ключевые особенности применения алгоритмов и методов решения задач оптимизации

Существующие модели и методы, используемые для поддержки принятия управленческих решений в различных условиях, крайне разнообразны. Каждый из методов оптимально решает свои типы задач, что определяет область их применения в планировании, управлении и оптимизации различных процессов. Так, например, линейное программирование (далее — ЛП) является методом оптимизации, направленным на максимизацию или минимизацию линейной целевой функции, при соблюдении набора линейных ограничений. ЛП стало развиваться в первую очередь в связи с решением задач экономики, с поиском способов оптимального распределения и использования ресурсов [1].

Динамическое программирование (далее — ДП) является методом оптимизации, решающим сложные задачи, разбивая их на подзадачи и решая каждую один раз для многократного использования результата. ДП является принципом последовательного анализа протекающего во времени процесса [2]. ДП эффективно работает с задачами, где есть рекурсивная структура и перекрывающиеся подзадачи, например, задачи нахождения кратчайшего пути,

управления запасами и распределения ресурсов. Его ключевая идея заключается в сохранении результатов для оптимизации вычислений, что позволяет сократить время, затрачиваемое на процесс принятия решения.

Сетевые методы планирования и управления (CPM, PERT) необходимы для организации и контроля сложных проектов, позволяя оптимизировать сроки и ресурсы путем анализа зависимости задач и критических путей. CPM (Critical Path Method) определяет критический путь (последовательность задач, влияющих на общую длительность проекта) и помогает минимизировать сроки завершения. PERT (Program Evaluation and Review Technique) оценивает вероятное время выполнения проектов с неопределенностью во времени задач [3,4].

Результаты сравнения случаев применения линейного программирования, динамического программирования и сетевых методов планирования и управления приведены в табл. 1. Рассмотрены возможные варианты применения, типы задач, особенности и ограничения, а также приведены примеры использования для каждого метода.

Таблица 1

Применение некоторых методов и алгоритмов оптимизации

Метод	Случаи применения	Тип задачи	Особенности и ограничения	Примеры использования
Линейное программирование	Оптимизация в условиях ограниченности ресурсов	Задачи с линейными ограничениями	Ограничено линейностью функций, необходимо наличие ограничений	Оптимизация распределения ресурсов (транспортные задачи, задачи планирования производства, логистика)
Динамическое программирование	Оптимизация сложных задач с подзадачами, зависящими от предыдущих состояний	Задачи с рекурсивной структурой	Подходит для задач с перекрывающимися подзадачами, требующих оптимизации на каждом этапе	Задачи управления запасами, маршрутизация, вычисление кратчайших путей, оптимизация рекурсивных процессов
Сетевые методы планирования и управления	Планирование и контроль последовательности выполнения операций	Проектные задачи с временными ограничениями	Необходимы данные о взаимосвязях между задачами, зависимости и продолжительность задач	Управление проектами (методы CPM, PERT), планирование и контроль сроков выполнения проектных задач

В зависимости от типа задачи и области применения используются разнообразные методы линейного программирования. Например, симплекс-метод, называемый также методом последовательного улучшения плана, является итеративным алгоритмом для решения задач линейного программирования, который находит оптимальное решение целевой функции на множестве допустимых значений [5]. Он включает в себя начальное базисное решение, итеративный процесс и проверку оптимальности, т. е. метод останавливается в случае отсутствия возможности улучшения значения целевой функции, то есть найдено оптимальное решение. Данный метод эффективен для задач с большим числом переменных и ограничений, часто применим в экономике, логистике и планировании.

Задача о назначениях — это задача комбинаторной оптимизации, в которой требуется оптимально распределить n заданий (или объектов) между n исполнителями (или ресурсами) таким образом, чтобы минимизировать (или максимизировать) общие затраты или время выполнения. К особенностям задачи о назначениях относится простота ограничений, когда каждое задание назначается одному исполнителю, и каждый исполнитель выполняет одно задание.

Таблица 2

Особенности применения методов линейного программирования

Метод	Случаи применения	Тип задачи	Особенности и ограничения	Примеры использования
Симплекс-метод	Итеративный метод для решения общих задач линейного программирования	Оптимизация линейной функции	Универсален для различных задач ЛП; требует больших вычислений для объемных задач	Производство, логистика, планирование ресурсов
Транспортная задача	Специализированный метод для оптимизации затрат на перевозку между пунктами поставки и потребления	Оптимизация распределения ресурсов	Подходит для задач с фиксированными источниками и пунктами назначения	Логистика, цепи поставок, распределение товаров
Задача о назначениях	Метод распределения заданий (или ресурсов) по агентам с минимальными затратами или максимальной эффективностью	Задача оптимального распределения	Применим для задач, где количество агентов совпадает с количеством задач	Управление персоналом, планирование производственных задач, задачи распределения ролей

Рассмотренные методы решают задачи оптимизации, но имеют разные структуры и ограничения, что делает каждый метод подходящим для специфических задач в управлении и распределении ресурсов.

2. Генерация связей между объектами, как основной элемент алгоритма поддержки принятия решений

Для успешного решения различных задач оптимизации необходимым условием является наличие связей между объектами. В задачах оптимизации устанавливаются различные типы таких связей, отражающие их зависимости, ограничения и взаимоотношения в процессе поиска оптимального решения. Основные типы связей представлены на рис. 1.

При решении задачи о назначениях формируются прямые/однозначные связи, которые связывают один объект с другим, устанавливая отношение «один к одному». Однако, такие связи являются жестко формализованными, не адаптирующимися под динамично меняющиеся условия. Кроме того, используемые в данной задаче показатели являются числовыми (измеримыми). При этом в некоторых организационных структурах существуют задачи, решение которых не представляется возможным в условиях жесткой формализации. В таких случаях исследуемые показатели не статичны и подвержены изменениям, исходя из входного набора данных, что влечет за собой изменение матриц соответствий и дальнейшей регенерации связей.

Так, например, в работе [6] для решения задачи оптимального распределения учебной нагрузки предложен подход, основанный на выявлении связей между преподавателем и дисци-



Рис. 1. Типы связей между объектами в задачах оптимизации

плиной, а также генерирующий разноуровневые рекомендации возможных связей. Решение данной задачи не предусматривает прямой численной формализации и имеет свои особенности, такие как динамическая структура, разнородность входных данных, а также изменяющийся набор входных данных при установлении связей, необходимость применения экспертной оценки и другие. Основой для формирования рекомендательных связей между преподавателем и дисциплиной выступают ключевые слова (рис. 2.).

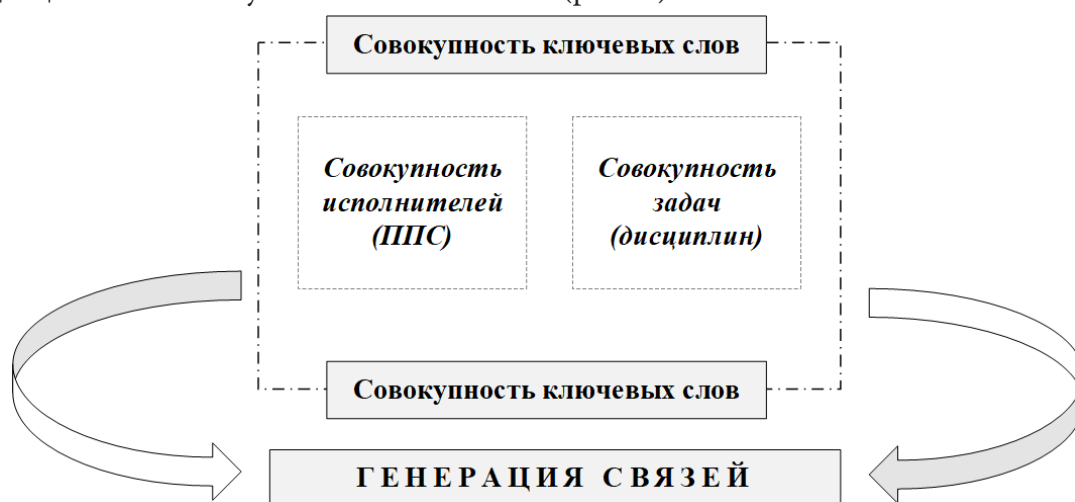


Рис. 2. Подход к формированию связей на основе ключевых слов

Стоит отметить, что особенность входного набора данных, способного охарактеризовать область «задача» (в случае распределения нагрузки исходными данными определены рабочие программы дисциплин), влечет за собой необходимость генерации семантической связи, переводимой в числовую с применением технологий искусственного интеллекта. Решение задачи обработки таких входных данных для последующего формирования совокупности ключевых слов и генерации связей актуально не только при распределении педагогической нагрузки, но и в отношении поиска исполнителя для выполнения задачи, характеризующейся технически заданием, или подбора и оценки кандидата с учетом требований должностной инструкции. Таким образом, предложенный подход, основанный на генерации разноуровневых рекомендаций возможных связей и учитывающий особенности входного набора данных, применим в различных сферах, в том числе при реализации кадровой политики и осуществлении проектной деятельности.

Заключение

Существующие методы решения задач оптимизации имеют разные структуры и ограничения, что делает каждый метод подходящим для специфических задач в управлении и распределении ресурсов. Для успешного решения различных задач оптимизации необходимым условием является наличие связей между объектами. При этом в некоторых организационных структурах существуют задачи, решение которых не представляется возможным в условиях жёсткой формализации, характерной для существующих моделей и методов, используемых для поддержки принятия управленческих решений. В связи с чем предложен подход, основанный на генерации разноуровневых рекомендаций возможных связей и учитывающий особенности входного набора данных, применение которого актуально в сфере образования, управления персоналом и проектной деятельности.

Литература

1. Кудашов В. Н. Основы линейного программирования / В. Н. Кудашов, Е. Г. Селина. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2020. – 42 с.
2. Коган Д. И. Динамическое программирование и дискретная многокритериальная оптимизация: Учеб. пособие. / Д. И. Коган. – Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2004. – 258 с.
3. Бородачёв С. М. Теория принятия решений: учебное пособие / С. М. Бородачёв. – Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2014. – 124 с.
4. Смоленцева Т. Е. Графовая модель данных в задаче выбора направления дальнейшего обучения / Т. Е. Смоленцева, А. В. Калач, Р. С. Толмасов // Вестник Воронежского института ФСИИ России. – 2022. – № 3. – С. 116–120.
5. Математическое программирование: теория и методы: учебное пособие / Н. В. Гредасова, А. Н. Сесекин, А. Ф. Шориков, М. А. Плескунов; Мин-во науки и высш. образования РФ. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020 – 200 с.
6. Концепция формирования инструментария генерации связей «преподаватель–дисциплина» в структуре организаций высшего образования / М. А. Пучкова, Т. Е. Смоленцева, Е. В. Калач // Вестник Воронежского института ФСИИ России. – 2024. – № 3. – С. 93–99.

КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ И ДОСТАВКИ ЛИЧНЫХ ВЕЩЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФРАСТРУКТУРЫ МАРКЕТПЛЕЙСОВ

Е. В. Смоленцев

МИРЭА – Российский технологический университет

Аннотация. Статья посвящена разработке и анализу концепции интегрированной системы хранения и доставки личных вещей с использованием инфраструктуры маркетплейсов. Рассмотрены исторические предпосылки, текущее состояние рынка, а также преимущества и вызовы реализации подобного подхода. Особое внимание уделено синергии логистических технологий и удобства для потребителей. Экономические аспекты в рамках работы не рассматриваются. Материалы статьи будут полезны специалистам в области логистики и разработчикам сервисов хранения.

Ключевые слова: системы хранения, службы доставки, логистика, self-storage, индивидуальное складское хранение, sharing-economy, экономика совместного потребления, маркетплейсы, интеграция, хранение личных вещей, доставка личных вещей, системный анализ.

Введение

Проблема хранения личных вещей остается одной из актуальных для современного общества, особенно в условиях урбанизации и стремительного роста плотности населения в крупных городах. Традиционные решения, такие как аренда складов или использование гаражных помещений, зачастую оказываются неэффективными из-за высоких затрат, неудобства расположения и отсутствия гибкости. В последние десятилетия наблюдается бурное развитие электронной коммерции и сопутствующих ей логистических сервисов, что открывает новые возможности для создания инновационных решений в области хранения личных вещей.

Одним из таких решений является интеграция услуг хранения с инфраструктурой маркетплейсов, что позволяет объединить преимущества развитых сетей пунктов выдачи заказов с современными технологиями управления запасами и доставки. Данная концепция представляет собой синергию двух важных элементов современной экономики: удобства для конечного потребителя и эффективности логистических операций.

Цель настоящей статьи заключается в разработке и анализе концепции интегрированной системы хранения и доставки личных вещей с использованием инфраструктуры маркетплейсов. В рамках исследования будут рассмотрены исторические предпосылки возникновения подобных сервисов, современное состояние рынка, а также преимущества и вызовы, связанные с реализацией данной концепции. Полученные результаты могут способствовать созданию новых эффективных и востребованных сервисов, способных значительно улучшить качество жизни городских жителей и повысить конкурентоспособность компаний, предоставляющих услуги хранения и логистики.

Предпосылки к изменению рынка услуг хранения

Эволюция услуг хранения личных вещей тесно связана с развитием общества и изменением образа жизни людей. В последние десятилетия возросшая урбанизация привела к тому, что горожане столкнулись с острой нехваткой личного пространства для хранения вещей. Этот тренд стал катализатором появления новых решений, направленных на удовлетворение потребностей в хранении личных вещей.

До появления современных технологий и цифровых платформ основным способом хранения были традиционные методы, такие как аренда складов, гаражей или квартир. Эти решения имели ряд недостатков, включая высокую стоимость, неудобства, связанные с доступом к местам хранения, и низкую гибкость в использовании.

Появление sharing economy (экономики совместного потребления) также сыграло важную роль в развитии услуг хранения. Люди стали активнее делиться ресурсами, что открыло путь для создания совместных проектов, таких как каршеринг, краткосрочная аренда жилья и, конечно, услуги хранения.

Одной из таких услуг стало индивидуальное складское хранение, также известное как self-storage. Оно представляет собой аренду небольших помещений, таких как боксы, комнаты или ячейки, предназначенные для хранения личных вещей граждан, например, мебели и одежды, а также имущества предпринимателей, включая документацию, технику и товары. Этот формат услуг существует в России более десяти лет, но особенно заметный рост интереса к нему произошёл за последние несколько лет, когда количество компаний, предоставляющих подобные услуги, увеличилось вдвое. [1]

Хотя рынок услуг хранения еще молод, его потенциал огромен. Спрос на услуги хранения личных вещей продолжает расти вместе с урбанизацией и переходом к цифровому образу жизни. Исторически мы видим движение от изолированных и дорогих решений к более доступным и удобным сервисам, которые используют существующие ресурсы и технологии.

Переход к цифровым технологиям и сотрудничеству с крупными игроками на рынке электронной коммерции открывает новые возможности для создания комплексных решений, которые смогут удовлетворить запросы современных пользователей.

Современное состояние рынка

В последние годы наблюдается рост популярности индивидуальных складских помещений высокого качества, особенно отапливаемых. Наиболее востребованным форматом является мини-склад площадью 4 квадратных метра. [1] По данным консалтинговой компании NF Group, объем складского рынка в Московском регионе составляет 24 млн кв. м. Общая площадь рынка складов индивидуального хранения в Москве превышает 233 000 кв. м, что на 11 % больше, чем годом ранее, говорится в отчете Ассоциации компаний индивидуального хранения (АКИХ). Наибольшим спросом склады формата self-storage пользуются у физических лиц — 88 %, на юридических лиц приходится 12 % [2].

Повышенный интерес к индивидуальным хранилищам со стороны населения обусловлен массовым сносом гаражных конструкций, которые ранее активно использовались для размещения ненужных вещей. Дополнительный импульс росту спроса придает отказ многих строительных компаний от возведения балконов и кладовых в новых домах ради снижения стоимости жилья. [1]

На рис. 1 показана динамика структуры строительства различных типов квартир за период с 2000 по 2024 годы. Данные свидетельствуют о том, что доля малогабаритного жилья в общем объеме строящегося фонда значительно увеличилась — к 2024 году почти 85 % всего вводимого жилья составляли однокомнатные и двухкомнатные квартиры. Важно подчеркнуть, что в 2000 году их удельный вес составлял лишь половину от общего объема предложений.

Учитывая отсутствие перспектив значительного улучшения уровня жизни в ближайшее время, можно прогнозировать сохранение текущих тенденций в жилищном строительстве. Это означает, что доминирование компактных жилых помещений в структуре строительной отрасли будет стимулировать увеличение спроса на индивидуальные хранилища. При этом низкий уровень жизни населения также служит препятствием для развития сектора индивидуальных складов. [4] Из-за скромных доходов люди часто не могут позволить себе допол-

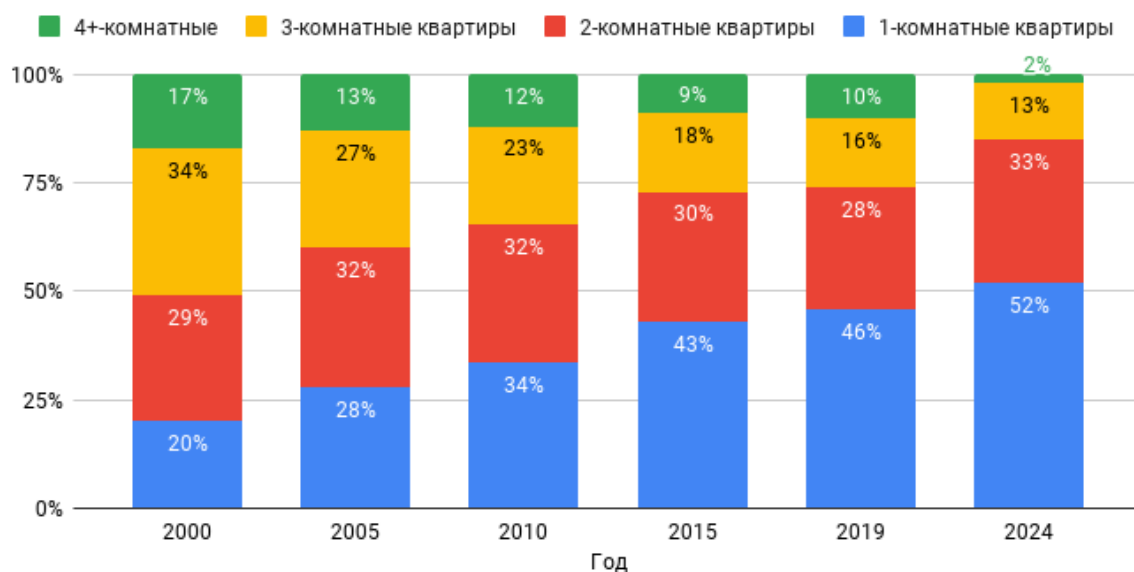


Рис. 1. Квартирография жилищного строительства по данным АО «ДОМ.РФ» [3]
(составлено автором)

нительные траты на аренду складских помещений. В случае необходимости они стараются найти более экономичные способы хранения, такие как использование гаражей или аренда пространства совместно с другими людьми.

Одной из интересных тенденций последнего времени стала концепция совместного использования пространства (shared economy). [5] Такие проекты демонстрируют высокий потенциал, однако пока не получили широкого распространения из-за отсутствия необходимой инфраструктуры и стандартов качества. Еще одной важной тенденцией является интеграция услуг хранения с инфраструктурой маркетплейсов. Некоторые компании начинают предлагать услуги доставки личных вещей через свои пункты выдачи заказов. Это позволяет пользователям экономить время и деньги, объединяя процессы покупки в одном месте. Тем не менее, такие инициативы находятся на начальной стадии развития и требуют дополнительных исследований и доработок.

При этом рост рынка электронной коммерции оказывает значительное влияние на логистическую отрасль, особенно в сегменте курьерских служб и сетей пунктов выдачи заказов (ПВЗ). Однако, несмотря на общий рост рынка электронной торговли, доля рынка, приходящаяся на независимые логистические компании (рис. 2), снижается. [6] Это объясняется тем, что многие крупные маркетплейсы предпочитают использовать собственные службы доставки и строят свои монобрендовые сети ПВЗ.

Таким образом, современный рынок услуг хранения характеризуется высоким уровнем конкуренции и разнообразием предложений, но при этом существует значительная неудовлетворенная потребность в качественных и доступных услугах для частных лиц.

Преимущества и вызовы интеграции с маркетплейсами

Интеграция услуг хранения личных вещей с инфраструктурой маркетплейсов представляет собой многообещающую концепцию, обладающую рядом существенных преимуществ.

Несмотря на очевидные преимущества, интеграция с маркетплейсами сопряжена с рядом вызовов, которые необходимо учитывать при разработке и внедрении такой системы.

Таким образом, интеграция услуг хранения с инфраструктурой маркетплейсов обладает значительным потенциалом, но требует внимательного подхода к преодолению возникающих трудностей.

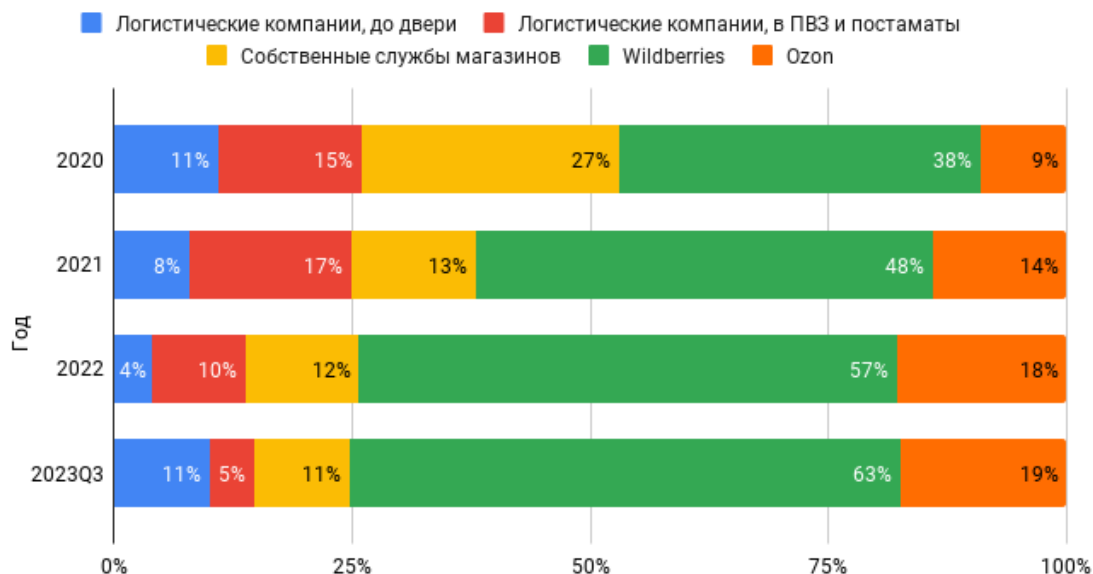


Рис. 2. Каналы доставки на рынке логистики для eCommerce, 2020-2023Q3 по данным ООО «Дейта Инсайт» [6] (составлено автором)

Таблица 1

Преимущества интеграции с маркетплейсами

Преимущество	Комментарий
Удобство для пользователей	Использование пунктов выдачи заказов маркетплейсов в качестве мест хранения позволяет пользователям совмещать процессы получения покупок и сдачи/получения личных вещей в одном месте. Это сокращает временные и транспортные затраты, делая услугу более доступной и привлекательной.
Расширение ассортимента услуг	Маркетплейсы могут предложить своим клиентам дополнительный сервис, увеличивая лояльность и удерживая аудиторию. Это также открывает новые возможности для кросс-продаж и увеличения среднего чека.
Оптимизация логистических процессов	Объединение потоков товаров и личных вещей позволяет эффективнее использовать имеющиеся ресурсы, снижая затраты на доставку и обработку. Автоматизация процессов хранения и доставки способствует повышению скорости и точности выполнения заказов.
Доступ к большой сети пунктов выдачи	Многие маркетплейсы имеют обширную сеть пунктов выдачи заказов (ПВЗ), что обеспечивает широкое покрытие территории и облегчает доступ к услуге для максимального количества пользователей.

Таблица 2

Вызовы интеграции с маркетплейсами

Вызов	Комментарий
Технические сложности	Интеграция двух независимых систем (маркетплейса и сервиса хранения) требует тщательной проработки и тестирования. Необходимо обеспечить совместимость программного обеспечения, безопасность передачи данных и бесперебойную работу всех элементов системы.
Регуляторные барьеры	Вопросы безопасности хранения личных вещей и защиты данных пользователей должны соответствовать действующим нормам законодательства. Это потребует разработки соответствующих политик и процедур, а также прохождения необходимых сертификаций и лицензирования.
Управление рисками	Хранение личных вещей связано с повышенным риском потерь, повреждений и краж. Необходимо предусмотреть механизмы страхования, контроля доступа и мониторинга, чтобы минимизировать вероятность возникновения инцидентов.

Экономическая эффективность	Разработка и внедрение такой системы требуют значительных начальных инвестиций. Важно правильно рассчитать экономику проекта, чтобы убедиться в его прибыльности и привлекательности для инвесторов.
Пользовательский опыт	Успех интеграции во многом зависит от восприятия и доверия пользователей. Необходимо тщательно продумать пользовательский интерфейс и процесс взаимодействия с системой, чтобы сделать его максимально простым и интуитивно понятным.

Перспективы развития и масштабирования

Развитие и расширение интегрированной системы хранения и доставки личных вещей через инфраструктуру маркетплейсов открывает широкие возможности для дальнейшего совершенствования и адаптации к изменениям на рынке. Рассмотрим основные направления возможного развития и перспективы масштабирования:

Географическое расширение. Одним из главных направлений развития является увеличение охвата территорий. Расширение сети пунктов выдачи заказов маркетплейса и складских помещений позволит предоставлять услуги хранения в большем количестве регионов, делая их доступными для большего числа пользователей.

Развитие дополнительных сервисов. Помимо базового сервиса хранения, можно предложить дополнительные услуги, такие как страхование вещей, упаковка и доставка крупногабаритных грузов. Это позволит быть конкурентоспособными на рынке и привлечь новых клиентов, предлагая комплексное решение для всех нужд в области хранения и логистики.

Взаимодействие с другими игроками рынка. Партнерства с транспортными компаниями, страховыми организациями и поставщиками упаковочных материалов могут значительно усилить позиции на рынке. Совместные усилия позволят оптимизировать процессы, уменьшить затраты и предложить более конкурентоспособные условия для пользователей.

Перспективы для развития и расширения интегрированной системы весьма позитивные. Грамотное использование новых технологий, расширение географии присутствия и предложение дополнительных сервисов создадут прочную базу для устойчивого роста и успеха на рынке.

Заключение

В результате проведенного исследования были выявлены ключевые аспекты и перспективы концепции интеграции услуг хранения личных вещей с инфраструктурой маркетплейсов. Разработка и внедрение такой системы открывает множество возможностей для повышения удобства и доступности услуг хранения, что отвечает текущим потребностям городского населения.

Таким образом, интеграция услуг хранения с инфраструктурой маркетплейсов представляет собой перспективное направление, способное изменить привычные модели использования и хранения личных вещей. Дальнейшее развитие и адаптация к местным условиям могут сделать такую систему лидером на рынке, обеспечивая высокое качество и доступность услуг для миллионов пользователей.

Литература

1. Рынок складской недвижимости: итоги 2021 года и влияние санкций 2022 года // Группа «ДЕЛОВОЙ ПРОФИЛЬ» : [сайт]. – 2022. – URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/rynok-skladskoy-nedvizhimosti-itogi-2021-goda-i-vliyanie-sanktsiy-2022-goda/> (дата обращения: 02.11.2024).

2. Склады индивидуального хранения в Москве заполнены на 85% // АО «НФ Групп» : [сайт]. – 2023. – URL: [2.https://kf.expert/news/sklady-individualnogo-khrameniya-v-moskve-zapolneny-na-85](https://kf.expert/news/sklady-individualnogo-khrameniya-v-moskve-zapolneny-na-85) (дата обращения: 04.11.2024).
3. Квартирография жилищного строительства// Единая информационная система жилищного строительства : [сайт]. – 2024. – URL: <https://наш.дом.рф/аналитика/квартирография> (дата обращения: 28.10.2024).
4. *Барашев М. Н., Дворникова М. И.* Self-Storage склады как инновационный продукт архитектурно-строительного комплекса России // Экономика строительства и природопользования. – 2021. – № 1 (78). – С. 5–11.
5. *Чернухина Г. Н.* Трансформация и тенденции потребления в современной шеринговой модели бизнеса // Современная конкуренция. – 2020. – № 3 (79).
6. Маркетинговое исследование Логистика интернет-торговли России в 2023. Мнения и ожидания // ООО «Дейта Инсайт» : [сайт]. – 2023. – URL: https://datainsight.ru/DI_ecom_logistics_opinions_expectations_2023 (дата обращения: 13.11.2024).

ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ ЛЮБОЙ ПРИРОДЫ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО РАСШИРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА МИНКОВСКОГО

А. А. Шайхутдинов

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Аннотация. В статье рассматривается расширение пространства Минковского с использованием комплексного исчисления и экстраполяцией метрического тензора на измерения более широкой сигнатуры. Исследуется введение новых измерений скорости и массы, ортогональных времени и пространству, и гипотеза их замкнутости. Формулируется подход к созданию единой теории происхождения измерений, частиц и Вселенной, обсуждаются математические доказательства, связанные с топологией и механикой, и их физическая интерпретация. Показано, что построенная математическая модель хорошо подходит для обобщения систем любой природы.

Ключевые слова: системный анализ, пространство Минковского, метрический тензор, комплексное исчисление, гипотеза Пуанкаре, колмогоровское количество информации, теория всего.

Введение

В специальной теории относительности [3] принята геометрическая интерпретация пространственно-временного континуума в виде четырехмерного псевдоевклидова пространства с сигнатурой $(1, 3)$ — более высокой по одному из направлений, чем у метрического тензора трехмерного евклидова пространства $(0, 3)$ — называемого пространством Минковского [11]. Инвариант в виде интервала в нем выражается через метрику континуума квадратом пространственно-временного расстояния [1, 19]:

$$ds^2 = g_{ij} dx^i dx^j. \quad (1)$$

где g_{ij} — элементы матрицы метрического тензора, которая в инерциальной системе отсчета имеет вид:

$$\hat{g} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$x^1, x^2, \dots, x^n$ — локальные координаты (измерения).

В матрице (2) первый столбец (и первая строка) соответствует одному временному измерению, остальные — трем пространственным. Чтобы в ней отличить временное измерение от пространственных локальную координату времени в (1) обычно записывают, как x^0 , имея в виду, что $x^1 = x$, $x^2 = y$, $x^3 = z$ соответствуют трем пространственным измерениям, а $x^0 = t$ — одному временному.

Для матрицы (2) формула (1) записывается в виде:

$$s^2 = c^2(t_1 - t_0)^2 - (x_1 - x_0)^2 - (y_1 - y_0)^2 - (z_1 - z_0)^2, \quad (3)$$

где $c = \text{const}$ — это константа скорости света, t — время, x , y , z — декартовы координаты евклидова пространства.

Так как x, y, z — это координаты пространства R^3 , в котором их вектор $\vec{r} = (x, y, z)$ имеет длину $|\vec{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, используют также компактную запись матрицы метрического тензора:

$$\hat{g} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

которая имеет сигнатуру $(1, 1)$ и квадратичную форму сигнатуры $(1, -1)$.

Допустима компактная запись инварианта (3) в виде:

$$ds^2 = d(c^2 t^2) - dr^2, \quad (5)$$

где можно нормализовать время, поделив его на константу c , или произведя замену $\tau = ct$. Тогда выражение (5) записывается формулой:

$$ds^2 = d\tau^2 - dr^2. \quad (6)$$

Отметим также, что в (2) и (4) допустима замена 1 на -1 (и -1 на 1), квадратичные формы сигнатуры $(1, -1)$ и $(-1, 1)$ с точностью до знака равнозначны для пространства и времени.

Геометрически пространство координаты τ (и t) является ортогональным дополнением к пространству векторной координаты r [6]. Ортогональное дополнение подпространства R^3 векторного четырехмерного псевдоевклидова пространства-времени, включающего также одномерное подпространство времени T , — это и есть подпространство времени: $R^3 = T^\perp$. В данной статье мы доказали гипотезу возможности экстраполировать такую ортогональность измерений с целью попытки объяснения их происхождения, расширив метрический тензор в инерциальной системе отсчета и пространство Минковского с помощью комплексного исчисления. Выстраиваемая математическая модель будет опираться на моментальные значения скорости v и других физических величин, поэтому дальнейший учет в ней ускорения тоже будет допустим, т. к. по определению тензора для метрического тензора всегда задан закон преобразования координат [24].

1. Векторное произведение единичных ортогональных векторов

В трехмерном евклидовом пространстве векторное произведение двух векторов представляет собой вектор, ортогональный каждому из перемножаемых векторов (рис. 1).

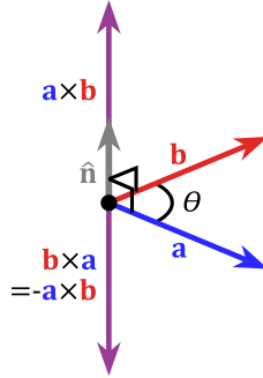


Рис. 1. Векторное произведение векторов

Если $|a| = |b| = |c| = 1$ и $\vec{a} \perp \vec{b} \perp \vec{c} \perp \vec{a}$, то:

$$\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b} \Leftrightarrow \vec{a} = \vec{b} \times \vec{c} \Leftrightarrow \vec{b} = \vec{c} \times \vec{a}, \quad (7)$$

где все три вектора имеют единичную длину и ортогональны друг другу. Каждый вектор при этом может иметь свою единицу измерения в физическом смысле.

Например, для световой волны (фотона), распространяющейся (прямолинейно двигающейся) в евклидовом пространстве, векторы скорости распространения фронта волны (скорости света), электрической и магнитной индукции ортогональны друг другу [12] (рис. 2).

При этом векторы скорости света, электрической и магнитной индукции принадлежат евклидову пространству [12]: $\{\vec{E}, \vec{B}, \vec{c}\} \subset R^3$.

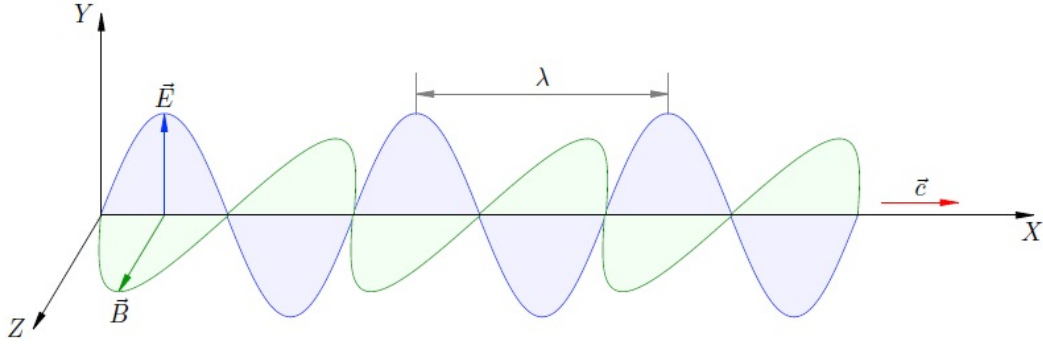


Рис. 2. Электромагнитная волна

Если нормализовать все три этих вектора до единичной длины $(\vec{e}, \vec{b}, \vec{c})$, то векторное произведение каждых двух из них соответствует физической интерпретации (электромагнитной теории). Аналогично выражению (7) можно записать:

$$\vec{c} = \vec{e} \times \vec{b} \Leftrightarrow \vec{e} = \vec{b} \times \vec{c} \Leftrightarrow \vec{b} = \vec{c} \times \vec{e}. \quad (8)$$

Далее, как показали выше, мы будем работать со скалярными физическими величинами, как с векторными (как с координатными векторами), имея в виду их нормализацию до единичной длины координатного вектора и принадлежность континууму с более широкой сигнатурой и метрическим тензором более широкого ранга, потому что их векторизация невозможна в евклидовом пространстве R^3 с сигнатурой $(0, 3)$ и псевдоевклидовом пространстве-времени с сигнатурой $(1, 3)$.

2. Комплексное исчисление для расширенного пространства Минковского

Заметим, что в (2) и (4) квадрат отрицательного элемента равен положительному $(-1)^2 = 1$, а в комплексном исчислении $i^2 = -1$ для комплексной плоскости и $j^2 = -i$ для комплексного трехмерного пространства.

Так как степени мнимой единицы i повторяются в цикле с периодом 4, а степени j — в цикле с периодом 8, мы можем комплексно расширить матрицу метрического тензора (4) в виде:

$$\hat{g} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & (-1)^2 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

до размерности 4×4 для расширенного пространства Минковского, применив метод математической индукции:

$$\hat{g} = \begin{pmatrix} i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & i^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & i^4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

или в виде квадратичной формы сигнатуры $(i, -1, -i, 1)$, и до размерности 8×8 для расширенного пространства Минковского в виде квадратичной формы сигнатуры:

$$(j, -i, -ij, -1, -j, i, ij, 1). \quad (11)$$

В расширенном пространстве по матрице метрического тензора (10) при этом измерения, которые соответствуют соседним столбцам (например, с элементами i и -1), соотносятся друг с другом, как соотносятся в физике пространство и время — измерения, соответствующие соседним столбцам (с элементами -1 и 1) в матрице метрического тензора (9).

Матрица метрического тензора (9) при этом диагональна и по вертикальным/горизонтальным индексам замкнута сама на себя, т. к. степени -1 повторяются в цикле с периодом 2. Ле-

вый крайний столбец считается соседним правому крайнему. Первая строка считается соседней с последней строкой. Применяя аналогичную логику к матрице метрического тензора (10) и квадратичной форме сигнатуры (11), можно утверждать и об их замкнутости на себя.

3. Гиперплоскость одновременности и мировая линия

Мировая линия — это путь (в топологическом смысле) частицы в четырехмерном пространственно-временном континууме. На рис. 3 три разные мировые линии изображают путешествие с тремя разными постоянными скоростями в пространстве-времени с одномерным пространством x .

Угол наклона каждой линии на рисунке 3 соответствует скорости v объекта в скалярном выражении. Путь (*равномерное движение*) по мировой линии на рис. 3 измеряется с помощью скалярного значения скорости $v = dx / dt$ или $v = dr / dt$ в наших обозначениях. Каждому значению времени t соответствует свое значение пространственной координаты x (или r) При этом скорость v ограничена сверху максимальным значением — скоростью света c .

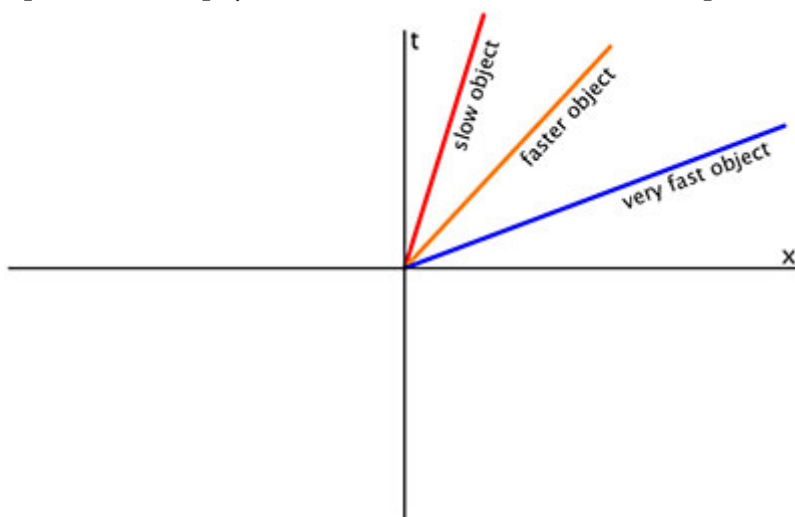


Рис. 3. Мировые линии в пространстве-времени с одномерным пространством x

На рис. 4 показаны мировая линия (слева), мировой лист (в центре) и мировой объём (справа) для частиц, струн/суперструн и бран соответственно.

Гиперплоскостью одновременности для четырехмерного пространства времени называют евклидово подпространство R^3 пространственно-временного континуума в определенный момент времени t .

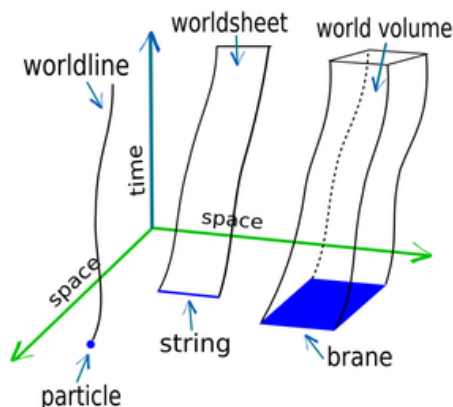


Рис. 4. Мировая линия, мировой лист и мировой объём в пространстве-времени с двумерным пространством $space^2$

Путь по мировой линии измеряется с помощью интервала по формулам (1), (3), (5) и (6), которые используют значения элементов матриц метрического тензора (2), (4) и (9).

Теперь мы можем измерять путь четырехмерного пространства времени в расширенном пространстве Минковского с матрицей метрического тензора (10). На рис. 5 показано новое ортогональное и пространству, и времени измерение h .

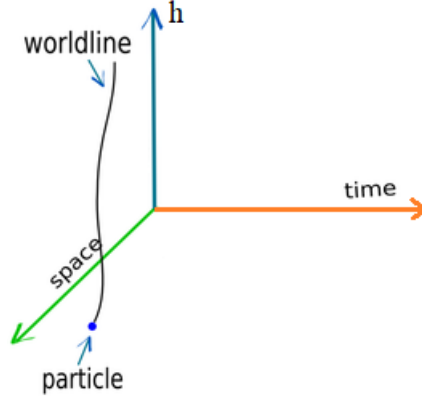


Рис. 5. Мировая линия в континууме с более широкой сигнатурой

Далее мы покажем, что h — это измерение скорости, и в действительности скорость — это не вектор в евклидовом пространстве R^3 , коллинеарный вектору пути для равномерного прямолинейного движения (как мы привыкли считать в ньютоновской механике и специальной теории относительности [3, 26]), а координатный вектор-измерение, которой лежит в этом континууме с более широкой сигнатурой $(1,3,1)$, чем у четырехмерного пространственно-временного континуума $(1,3)$.

Определение 1. Назовем *гиперкубом односкоростности* «плоскость» space-time на рис. 5, подразумевая $space = R^3$. Каждому значению h соответствует свое значение-состояние пространства-времени.

4. Механика, динамика, гравитация и топология в расширенном пространстве Минковского

Метрический тензор одномерного пространства без времени — это симметричное тензорное поле ранга $(0,1)$ на гладком многообразии, его матрица $\hat{g} = (1)$ является подматрицей — вырезанным элементом на пересечении второго столбца и второй строки матрицы метрического тензора (9).

Метрический тензор двухмерного пространства-времени — это симметричное тензорное поле ранга $(1,1)$ на гладком многообразии, его матрица является подматрицей — вырезанными элементами на пересечении второго и четвертого столбцов и второй и четвертой строк матрицы метрического тензора (10).

Пусть в (10) второму и четвертому столбцам со значениями -1 и 1 соответствуют измерения пространства и времени:

$$\hat{g} = \begin{pmatrix} & \vec{r} & \vec{t} \\ i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

а одному из столбцов с пропущенными заголовками соответствует измерение $\vec{h}$. Сигнатура матрицы метрического тензора (12) имеет вид $(1,1,1,1)$ или $(1,3,1,1)$, если расширить r в 3 пространственных измерения.

Определение 2. *Равносечным течением времени* назовем аналогичное рис. 3 изменение времени по оси h в координатах h и t , как изменение координаты x (или r) — называется равномерным движением ($dt/dh = \text{const}$) по (вдоль) оси t на рис. 3 в координатах t и x ($dx/dt = dr/dt = v = \text{const}$).

Теорема 1. *Путь частицы по мировой линии пространства-времени в континууме с более широкой сигнатурой лежит вдоль оси координатного вектора скорости $\vec{v}$, ортогонального координатным векторам времени $\vec{t}$ и пространства $\vec{r}$, а мера равносечного течения времени определяется скалярным значением пространственной координаты частицы в пространстве.*

Доказательство. Так как для равномерного прямолинейного движения в скалярном выражении $r = vt$, запишем векторное произведение, как мы показали это геометрически допустимым в выражении (8):

$$\vec{r} = \vec{v} \times \vec{t}, \quad (13)$$

где $\vec{r}$ — координатный вектор пространства, $\vec{v}$ — координатный вектор скорости, $\vec{t}$ — координатный вектор времени.

На рис. 5 для координатных векторов единичной длины с точностью до знака минус (которую можно устранить, развернув на рис. 5 ось h в обратном направлении):

$$\overrightarrow{\text{space}} = \vec{h} \times \overrightarrow{\text{time}}. \quad (14)$$

где $\overrightarrow{\text{space}}$ — координатный вектор пространства, $\vec{h}$ — координатный вектор добавленного нами измерения h , $\overrightarrow{\text{time}}$ — координатный вектор времени.

Так как $\overrightarrow{\text{space}} = \vec{r}$ и $\overrightarrow{\text{time}} = \vec{t}$, из (13) и (14) получаем $\vec{h} = \vec{v}$.

Выражение (14), как мы показали в (8), равносильно выражению $\overrightarrow{\text{time}} = \overrightarrow{\text{space}} \times \vec{h} = \text{space} \times \vec{v}$ или в скалярном выражении $t = rv$ (что не имеет физического смысла в классическом пространстве-времени Минковского — пространстве с более узкой сигнатурой, чем мы рассматриваем), то есть $r = dt/dv$ — пространственная координата r частицы в пространстве — определяет меру *равносечного течения* времени вдоль оси $\vec{v} = \vec{h}$ точно так же, как и сама скорость $v = dr/dt$ определяет меру *равномерного движения*. ■

Аналогично теореме 1 можно показать, что и время определяет меру изменения скорости по пространственной координате $t = dv/dr$ (рис. 6).

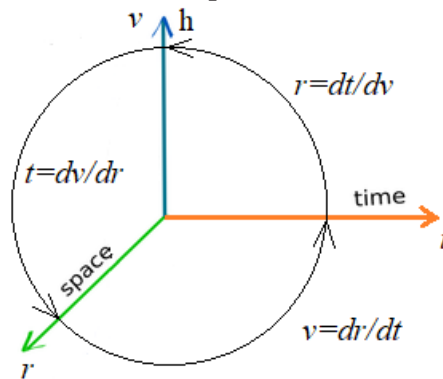


Рис. 6. Соотношения между измерениями пространства, скорости, времени

Так как матрица метрического тензора (10), как мы говорили выше, по вертикальным/горизонтальным индексам замкнута сама на себя, то не важно, какому из столбцов с пропущенными заголовками поставить в соответствие измерение скорости v (в любом случае этот столбец окажется между столбцами для пространства r и времени t). Пусть это будет третий

столбец, а первый столбец соответствует некоему базовому измерению, координатный вектор которого обозначим $\vec{1}$ (единица со знаком вектора):

$$\hat{g} = \begin{pmatrix} \vec{1} & \vec{r} & \vec{v} & \vec{t} \\ i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Любое одномерное пространство (одно измерение) является связным, односвязным, компактным многообразием без края.

Гипотеза Пуанкаре, сформулированная в 1904 г., в 2002–2003 гг. была доказана Григорием Перельманом [13–15] и в 2006 г. подтверждена математическим сообществом: «Всякое связное, односвязное, компактное трехмерное многообразие без края гомеоморфно сфере S^3 ».

Следствиями доказательства гипотезы Пуанкаре являются замкнутость евклидова пространства R^3 на себя и возможность утверждать замкнутость любого одномерного пространства (одного измерения) на себя. Таким образом, окружность на рис. 6 может иллюстрировать четвертое измерение $\vec{1}$, и так же можно замкнуть в окружности измерения r , v , t . Эти окружности имеют конечный размер (длину окружности и/или диаметр) в пространстве еще более широкого ранга, чем мы рассматриваем.

Чем, например, геометрически объясняется наличие ограничения сверху физической величины скорости максимальным значением в виде скорости света c . Также физиками и астрономами с помощью данных, полученных спутником «Планк», определена масса Вселенной [17] — ограничение сверху физической величины массы m максимальным значением, часть которого составляет т. н. *темная материя*, не участвующая в электромагнитном взаимодействии и поэтому недоступная прямому наблюдению (понятие исторически связано с проблемой скрытой массы [21]). Доказательством Перельмана гипотезы Пуанкаре математически подтверждается ограничение сверху физической величины пространственного расстояния r максимальным значением — экспериментально это можно подтвердить, например, «кругосветным путешествием» (аналогичным эксперименту Фернана Магеллана для поверхности Земли [16]) по Вселенной, направив космический зонд в космос таким образом, чтобы он двигался по прямой даже в искривленном гравитацией пространстве-времени, несмотря на гравитационные помехи, и через некоторое время пронаблюдав его возвращение к Земле со стороны, обратной первоначальному направлению.

Запишем физические формулы механики, динамики и гравитационного потенциала [12] в виде векторных произведений, как мы показали возможным в выражении (8), под каждой физической величиной подразумевая отдельное измерение:

$$\vec{v} = \vec{a} \times \vec{t}, \quad (16)$$

где $\vec{v}$ — координатный вектор измерения скорости, $\vec{a}$ — координатный вектор измерения ускорения, $\vec{t}$ — координатный вектор измерения времени.

$$\vec{r} = \vec{v} \times \vec{t}, \quad (17)$$

где $\vec{r}$ — координатный вектор измерения расстояния (пространства), $\vec{v}$ — координатный вектор измерения скорости, $\vec{t}$ — координатный вектор измерения времени.

$$\vec{F} = -\vec{\Pi} \times \vec{r}, \quad (18)$$

где $\vec{F}$ — координатный вектор измерения силы гравитации, $\vec{\Pi}$ — координатный вектор измерения гравитационного потенциала, $\vec{r}$ — координатный вектор измерения расстояния (пространства).

$$\vec{F} = \vec{m} \times \vec{a}, \quad (19)$$

где $\vec{F}$ — координатный вектор измерения силы, $\vec{m}$ — координатный вектор измерения массы, $\vec{a}$ — координатный вектор измерения ускорения.

$$\vec{p} = \vec{m} \times \vec{v}, \quad (20)$$

где $\vec{p}$ — координатный вектор измерения импульса, $\vec{m}$ — координатный вектор измерения массы, $\vec{v}$ — координатный вектор измерения скорости.

$$\vec{I} = \vec{\Pi} \times \vec{r}, \quad (21)$$

где $\vec{I}$ — координатный вектор измерения безразмерной в классическом пространстве Минковского и классической гравитационной теории величины, $\vec{\Pi}$ — координатный вектор гравитационного потенциала, $\vec{r}$ — координатный вектор измерения расстояния (пространства).

В формулах (16)–(21) каждые три физических величины представляют собой отдельные взаимоортогональные измерения, которые можно рассматривать в пространствах R^3 (каждую формулу в своем).

Теорема 2. В матрице метрического тензора (15) $\vec{I} = \vec{m}$.

Доказательство. Из (16) и (17):

$$\vec{r} = \vec{a} \times \vec{t} \times \vec{t} = \vec{a} \times \vec{t}^2. \quad (22)$$

Из (18) и (22):

$$\vec{F} = -\vec{\Pi} \times \vec{r} = -\vec{\Pi} \times \vec{a} \times \vec{t}^2. \quad (23)$$

Из (19) и (23):

$$\vec{m} \times \vec{a} = -\vec{\Pi} \times \vec{a} \times \vec{t}^2. \quad (24)$$

или

$$\vec{m} = -\vec{\Pi} \times \vec{t}^2. \quad (25)$$

Из (18) и (21):

$$\vec{F} = -\vec{I}. \quad (26)$$

Выражение (26) уже позволяет утверждать, что в матрице метрического тензора (15) измерение $\vec{I}$ может означать силу F , т. к. можно произвести замену $-\vec{I}$ на $\vec{I}$, направив эту ось в противоположном текущему направлению.

Произведение силы гравитации F , действующей на массу m , расположенную на расстоянии r от центра поля гравитационного потенциала Π , равно произведению массы на гравитационный потенциал Π в этой точке (на расстоянии r): $rF = m\Pi$.

$$\vec{r} \times \vec{F} = \vec{m} \times \vec{\Pi}. \quad (27)$$

Отсюда и из (19):

$$\vec{r} \times \vec{a} = \vec{\Pi}. \quad (28)$$

Выражение (18), как мы показали возможным в (8), можно переписать в виде:

$$\vec{\Pi} = -\vec{F} \times \vec{r}. \quad (29)$$

Отсюда и из (19):

$$\vec{\Pi} = -\vec{m} \times \vec{a} \times \vec{r}. \quad (30)$$

Отсюда и из (28):

$$\begin{aligned} \vec{r} \times \vec{a} &= -\vec{m} \times \vec{a} \times \vec{r}, \\ -(\vec{a} \times \vec{r}) &= -\vec{m} \times \vec{a} \times \vec{r}. \end{aligned} \quad (31)$$

Из (31) получаем:

$$\vec{I} = \vec{m}. \quad (32)$$

Таким образом, по теореме 2 матрица метрического тензора (15) соответствует континууму масса-пространство-скорость-время:

$$\hat{g} = \begin{pmatrix} \vec{m} & \vec{r} & \vec{v} & \vec{t} \\ i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (33)$$

Матрица метрического тензора (33) позволяет сформулировать и использовать в ней расширенную специальную теорию относительности, основанную на комплексном исчислении.

Метрический тензор массы-скорости — это симметричное тензорное поле ранга $(1,1)$ на гладком многообразии, его матрица является подматрицей — вырезанными элементами на пересечении первого и третьего столбцов и первой и третьей строк матрицы метрического тензора (33). Континуум масса-скорость можно сравнить с двухмерным пространством-временем, он также имеет матрицу метрического тензора (9).

Любые два измерения, соответствующие соседним столбцам матрицы метрического тензора (33), относятся друг к другу так же, как время и пространство в специальной теории относительности.

Согласно Перельману [13–15], как мы писали выше, любое измерение является замкнутым и гомеоморфно окружности в пространстве более высокого/широкого ранга.

Матрица метрического тензора (33) может объяснять происхождение измерений так же, как из измерений пространства и времени мы исторически произвели (сформулировали определение соответствующей новой/производной физической величины) измерение скорости, на практике измеряя ее скалярной величиной.

5. Происхождение измерений

Экстраполируя теоремы 1 и 2 в прямом и обратном направлениях по различным физическим величинам в виде измерений, можно заполнить пропущенные заголовки столбцов в матрице метрического тензора 8×8 (и более высоких размерностей по степеням двойки), основанной на комплексном исчислении, и сформулировать так называемую *Теорию всего*, объясняющую все виды физических взаимодействий, происхождение частиц и Вселенной. Матрица размером 8×8 метрического тензора с сигнатурой $(1,1,1,1,1,1,1,1)$, построенная по квадратичной форме сигнатуры (11):

$$\hat{g} = \begin{pmatrix} & \vec{v} & & \vec{r} & & \vec{m} & & \vec{t} \\ j & & & & & & & \\ & -i & & & & & & \\ & & -ij & & & & & \\ & & & -1 & & & & \\ & & & & -j & & & \\ & & & & & i & & \\ & & & & & & ij & \\ & & & & & & & 1 \end{pmatrix}. \quad (34)$$

Учитывая колмогоровский рекурсивно-фрактальный подход к измерению количества информации [22], можно говорить об информационном измерении. Информационное (логическое) измерение $\{True, False\}$ или $\{1, 0\}$ тоже топологически является связным, односвязным, компактным многообразием без края. Применяя метод математической дедукции, можно записать матрицу метрического тензора с сигнатурой $(1, 1)$ для Большого взрыва:

$$\hat{g} = \begin{pmatrix} \emptyset & \overline{bool} \\ -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (35)$$

где $\emptyset = 0^0$ — состояние (измерение) Вселенной до Большого взрыва (пустота), $\overline{bool} = 0^1$ — информационное (логическое) измерение.

Энтропия тоже имеет максимальное значение [2]. Принцип максимальной энтропии — это понятие теории вероятности, представляющее собой утверждение, что распределение вероятностей, которое наилучшим образом отражает текущее состояние данных — это распределение с наибольшей информационной энтропией [7]. Таким образом, энтропия — это тоже одно из базовых измерений.

Максимальная энтропия означает, что каждый элемент системы находится в максимальной степени неопределенности, равной 1, а система — в степени, равной числу её элементов (например, количество частиц для Вселенной, которое ограничено).

Построенная математическая модель подходит для систем любой природы. Например, Карл Маркс в своем труде [8] рассматривал взаимосвязь четырех измерений: масса (товар), капитал (деньги), труд (человеческие ресурсы) и время. Эти измерения могут быть заголовками столбцов матрицы метрического тензора (10):

$$\hat{g} = \begin{pmatrix} \vec{m} & \vec{\$} & \overline{HR} & \vec{t} \\ i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (36)$$

где $\vec{\$}$ — это измерение капитала (денежное), $\overline{HR}$ — человеческих ресурсов, измеряемых для экономических систем [25] в виде произведения HRt , т. е. произведения количества людей на затраченное ими на труд время с помощью измерения времени в человеко-часах (или трудоднях для одного человека).

Заключение

Мы предложили расширение классической модели пространства Минковского, включив в нее измерения с более широкой сигнатурой, которые описывают ортогональные координатные векторы скорости и массы. Доказано, что путь частицы в таком континууме связан с новыми измерениями, которые можно трактовать как координаты скорости и массы. Мы также показали, что аналогичная замкнутость измерений, подтвержденная для трёхмерных многообразий в гипотезе Пуанкаре, может быть применена к более сложным физическим моделям. Экстраполируя наши результаты, мы предложили возможный подход к созданию теории, объясняющей происхождение частиц и Вселенной в рамках единой математической модели. Критика теорий струн [27], суперструн [5] и бран [18] с позиции предложенной обобщенной математической модели измерений основана на различиях в подходах к описанию многомерного пространства, к понятию измерений и на интерпретации природы этих измерений (включая комплексные координаты), а также на несоответствии принципу бритвы Оккама (вводятся дополнительные сущности). Тем не менее, для окончательного подтверждения предложенной гипотезы (*Теории всего*) необходимы дополнительные исследования и экспериментальная проверка на большом адронном коллайдере [4].

Построенная математическая модель подходит для системного анализа [9, 23–25], потому что хорошо обобщает системы любой природы: геометрические, физические, экономические [8, 10, 25] и другие.

Литература

1. *Birrell N. D., Davies P.C.W.* Quantum Fields in Curved Space. Cambridge University Press, 1982. – 354 p.
2. *Clausius R.* Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen [On the Mov-ing Force of Heat and the Laws which can be Deduced from it for the Theo-ry of Heat itself] // *Annalen der Physik.* – 1850. – Vol. 155, No 3. – P. 368–397.
3. *Einstein A.* Fundamental Ideas and Methods of the Theory of Relativity 1920.
4. *Evans L., Bryant P.* LHC Machine // *Journal of Instrumentation.* – 2008. – Vol. 3. S08001.
5. *Gross D., Witten E.* Possible third-order phase transition in the large- N lattice gauge theory // *Phys. Rev. D.* – 1980. – Vol. 21. 446.
6. *Hawking S.* A Brief History of Time. Bantam Books, 1988. – 256 p.
7. *Jaynes E. T.* Information Theory and Statistical Mechanics // *Physical Review.* – 1957. – Vol. 106, No 4. – P. 620–630.
8. *Marx K.* Das Kapital. Kritik der politischen Ökonomie [Capital: A Critique of Political Economy] 1867, 1885, 1894.
9. *Minitaeva A.* Analysis of the Multi-Criteria Decision-Making Problem Under Conditions of Heterogeneous Interval Uncertainty // *Proceedings – 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA 2022).* 2022. DOI: 10.1109/SUMMA57301.2022.9974092
10. *Minitaeva A. M.* Multimodel Approach to Forecasting Nonlinear Nonstationary Processes in Optimal Control Problems // *Proceedings of the 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2024).* 2024.
11. *Minkowski H.* Raum und Zeit [Space and Time] // *Physikalische Zeitschrift.* – 1908–1909. – Vol. 10. – P. 75–88.
12. *Penrose R.* The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Uni-verse. Alfred A. Knopf, 2004. – 1136 p.
13. *Perelman G.* The entropy formula for the Ricci flow and its geometric applications (англ.) // *ArXiv.org* 2002. ISSN 2331-8422 arXiv:math/0211159
14. *Perelman G.* Ricci flow with surgery on three-manifolds (англ.) // *ArXiv.org* 2003. ISSN 2331-8422 arXiv:math/0303109
15. *Perelman G.* Finite extinction time for the solutions to the Ricci flow on certain three-manifolds (англ.) // *ArXiv.org* 2003. ISSN 2331-8422 arXiv:math/0307245
16. *Pigafetta A.* Relazione del primo viaggio intorno al mondo [Report of the First Voyage Around the World]. 1524. Ed. Ramusio G. B., Navigazioni e viaggi, Venice, 1550.
17. Planck Collaboration. Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters // *Astronomy & Astrophysics.* – 2020. – Vol. 641. A6.
18. *Polchinski J.* Dirichlet-Branes and Ramond-Ramond Charges // *Physical Review Letters.* – 1995. – Vol. 75. – P. 4724–4727.
19. *Rovelli C., Smolin L.* Loop Space Representation of Quantum General Relativity // *Nuclear Physics B.* – 1990. – Vol. 331. – P. 80–152.
20. *Song X., Salvati F., Gaikwad C., Halpern N. Y., Arvidsson-Shukur D. R. M., Murch K.* Agnostic Phase Estimation // *Phys. Rev. Lett.* – 2024. – Vol. 132. 260801.
21. *Zwicky F.* Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln [The Redshift of Extragalactic Nebulae] // *Helvetica Physica Acta.* – 1933. – Vol. 6. – P. 110–127.

22. Колмогоров А. Н. Три подхода к определению понятия «количество информации» // Пробл. передачи информ. – 1965. – Т. 1, № 1. – С. 3–11.
23. Минитаева А. М., Шайтура С. В. Системный анализ и разработка методики моделирования нелинейных нестационарных процессов в системе поддержки принятия решений // Информационно-технологический вестник. – 2023. – № 3(37). – С. 54–64. EDN ACWQAM.
24. Минитаева А. М. Новый оператор тензорного произведения и анализ нелинейных систем с полиномиальными функциями пространства состояний // Информационно-технологический вестник. – 2024. – № 3(41). – С. 3–14. EDN AAECDU.
25. Минитаева А. М. Математическая модель и метод принятия решений в экономических системах на основе глубокого обучения // Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных : Сборник статей II Всероссийской научной конференции. В 5-ти томах, Москва, 27–28 апреля 2023 года. Москва: Издательский дом КДУ, «Добросвет», 2024. – С. 42–49. EDN YTVUVK.
26. Пенроуз Р. Путеводитель по теории относительности. – Москва : Мир, 2002. – 589 с.
27. Полчински Дж. Теория струн. Том 1. – Москва : ИКИ РАН, 2002. – 432 с.

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ КАДРОВОГО ПОТЕНЦИАЛА СОТРУДНИКА ИТ-КОМПАНИИ

А. И. Шашкин, М. Ю. Леденев

Воронежский государственный университет

Аннотация. В статье предложен подход для выбора претендентов на должность в ИТ-компании с учетом квалификационных требований, который базируется на формировании обобщенной (комплексной) оценки, при этом частные оценки претендентов являются лингвистическими. Рассматриваются свойства лингвистического оператора порядкового взвешенного агрегирования, важные для процедуры выбора. Приведен иллюстративный пример, демонстрирующий эффективность подхода.

Ключевые слова: управление персоналом, задача выбора, агрегирование информации, лингвистическая информация.

Введение

В настоящее время в связи с уходом ряда международных ИТ-компаний происходит пере-профилирование отечественных компаний и появление новых. В условиях высокой конкуренции потребность в высококвалифицированных сотрудниках значительно выросла. Кроме того, на рынке ИТ-услуг возникают новые вызовы, что предполагает появление особых квалификационных требований к кадрам. Следует заметить, что успешность современных ИТ-компаний во многом определяется кадровым потенциалом. Тщательный подбор, обдуманное назначение и поощрение повышения квалификации заинтересованных сотрудников являются залогом создания эффективного работоспособного высокопрофессионального коллектива [1]. На этапе подбора персонала необходимо определить квалификационные требования к работникам по занимаемым должностям и осуществить поиск кандидатов с соответствующим уровнем необходимых характеристик. Для грамотного управления кадровым потенциалом компании целесообразно использовать автоматизированные системы управления персоналом, которые функционируют на стыке информационных технологий и HR-процессов [2]. Специализированные программные средства, обладающие необходимым функционалом, позволяют составлять собственные базы резюме и вакансий компании, упорядочивают работу с ними, помогают в проведении тестов и интервьюировании при приеме на работу и позволяют оперативно принимать решения на основании обработанной информации.

Формальная постановка задачи заключается в следующем: пусть вакантная должность предусматривает некоторый перечень квалификационных требований, и на эту должность претендуют m кандидатов, квалификация которых определяется оценками в некоторой шкале степени соответствия критериям, сформированным на основе требований. Необходимо поранжировать кандидатов с учетом их соответствия вакантной должности.

По функциональной направленности системы, автоматизирующие управление человеческими ресурсами, можно разделить на [2]:

- системы, в которых генерируются знания об управлении компанией в форме базы знаний;
- программы стимулирования сотрудников, осуществляющие подбор и адаптацию персонала, планирование карьеры;
- программы формирования квалификационных требований;
- программы для формирования аналитических отчетов по кадрам в составе многофункциональных систем;

- системы группового анализа персонала и выявления тенденций развития организации в целом;
- комплексные системы, отражающие движение кадров внутри фирмы, формирующие оптимальное штатное расписание.

Среди существующих программных приложений, в функционал которых входит подбор кадров, отметим следующие [3]:

- *Рекрутер*, которая позволяет автоматизировать процессы поиска и отбора персонала, вести учет кандидатов, вакансий, рассчитывать затраты на подбор персонала, автоматизировать проведение конкурсного отбора;
- *E-Staff Рекрутер*, предназначенная для рекрутинговых агентств и служб подбора персонала в организациях и включающая следующие функции: работа с кандидатами, интервью, прием на работу или отклонение, прохождение испытательного срока, планирование событий и заданий;
- *SAP Human Resources*, в состав которой входят следующие модули: PD (планирование и профессиональный рост персонала) и PA (администрирование персонала и расчет зарплаты) — модульная структура данной системы дает возможность ее поэтапного внедрения;
- *Oracle Human Resources Analyzer* позволяет автоматизировать табельный учет компании, рекрутинг кадров, анализ деловых качеств работников компании, прогнозирование своевременного повышения квалификации сотрудников, составление плана продвижения по службе работников.

Внедрение подобных систем дает компании возможность достичь следующих результатов: сокращение времени для принятия решений; качественное улучшение принимаемых решений; сокращение расходов на руководство кадрами; наиболее результативное использование профессиональных качеств конкретного сотрудника.

В настоящее время увеличился спрос на специализированные данные о персонале, помогающие планировать спрос на квалифицированные кадры, осуществлять продуманный рекрутинг, назначать и сохранять в штате талантливых и высококвалифицированных сотрудников. Эта тенденция обуславливает актуальность приложений, связанных с разработкой моделей оценки персонала.

Цель статьи заключается в формировании оценочной модели для претендентов на вакантные должности с учетом квалификационных требований.

1. Теоретическая база исследования

Рассмотрим формальную постановку задачи [4], которая относится к известной в теории принятия решений задаче выбора: пусть X — заданное множество объектов оценивания; $A_i(x) = a_i$ — частная оценка объекта x , в качестве которой может выступать оценка по i -му критерию (показателю), или оценка, полученная от i -го эксперта; $(a_1, \dots, a_n)$ — векторная оценка объекта $x \in X$, тогда его обобщенная оценка может быть получена путем агрегирования компонент векторной оценки в соответствии с определенным принципом

$$\alpha(x) = \text{Agg}(a_1, a_2, \dots, a_n),$$

где $\text{Agg}(\cdot)$ — оператор агрегирования, формализующий некоторую стратегию агрегирования. Скалярная оценка $\alpha(x)$ называется обобщенной (групповой, комплексной, интегральной). В основе ее формирования лежит понятие оператора агрегирования. В настоящее время существует значительное количество классов операций и функций агрегирования, среди которых наиболее распространены операции осреднения. Для учета значимости аргументов используют весовые коэффициенты. Однако вектор весов может быть получен на основе формализации принципа «нечеткого большинства» с помощью лингвистических кванторов [5]. Данный под-

ход порождает класс операторов агрегирования OWA (Ordered Weighted Averaging Aggregation Operator) [6]. Их отличительной особенностью является наличие ряда числовых характеристик, которые позволяют целенаправленно сформировать процедуру оценивания. Среди таких характеристик отметим следующие: *orness* — близость к дизъюнктивной стратегии агрегирования, *andness* — близость к конъюнктивной стратегии агрегирования; *tradeoff* — уровень компенсационных свойств; *entropy* — равномерность учета всех критериев (показателей).

Перечисленные числовые характеристики позволяют оценить источники информации. Например, опыт показывает, что эксперт, склонный к риску, при оценивании в большей степени учитывает лучшие свойства объекта оценивания — такая позиция называется оптимистической. Эксперт-пессимист имеет тенденцию в своих суждениях опираться на худшие свойства объекта. Склонность к риску можно охарактеризовать величиной $orness(W)$: чем ближе эта величина к 1, тем в большей степени позиция эксперта оптимистична. Еще одна особенность OWA-агрегирования заключается в том, что данный оператор может быть обобщен на случай лингвистической информации [5, 7]. Предположим, что оценки объекта формируются в лингвистической шкале S и $a_i \in S$ ($i = \overline{1, n}$), а веса $w_i \in [0, 1]$ ($i = \overline{1, n}$) являются количественными.

Лингвистический порядковый оператор осреднения (LOWA-оператор), ассоциированный с вектором весов W , где $w_i \in [0, 1]$ и $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, определяется правилом [6]

$$\Phi_W(A) = C^n \left\{ (w_k, b_k), k = \overline{1, n} \right\} = w_1 \otimes b_1 \oplus (1 - w_1) \otimes C^{n-1} \left\{ (\lambda_k, b_k), k = \overline{2, n} \right\},$$

где $B = (b_1, \dots, b_n)$ — вектор, полученный из вектора оценок $A = (a_1, \dots, a_n)$ упорядочением по невозрастанию лингвистических термов; $\lambda_k = \frac{w_k}{\sum_{m=2}^n w_m}$ ($k = \overline{2, n}$) — нормированный вектор ве-

сов, полученный после удаления максимального веса w_1 , $\sum_{m=2}^n \lambda_m = 1$; C^n, C^{n-1} — выпуклые комбинации $n(n-1)$ термов соответственно.

При $n = 2$ выпуклая комбинация лингвистических термов $b_1 = S_j$ и $b_2 = S_i$ ($j \geq i$) определяется правилом

$$C^2 \left\{ (w_1, b_1), (w_2, b_2) \right\} = w_1 \otimes b_1 \oplus w_2 \otimes b_2 = S_k,$$

где $k = \min \{T, i + \text{round}(w_1 \cdot (j - i))\}$, round соответствует операции округления.

Заметим, что для нахождения весов могут использоваться те же методы, что и для операторов, ориентированных на количественную информацию.

Обратный LOWA-оператор (I-LOWA) — это порядковый оператор, для которого B — это вектор лингвистических оценок A , упорядоченный по неубыванию. При $n = 2$

$$C^2 \left\{ (w_1, b_1), (w_2, b_2) \right\} = w_1 \otimes S_j \oplus w_2 \otimes S_i = S_k,$$

где $S_i, S_j \in S$, $j \leq i$, $k = \min \{T, i - \text{round}(w_1(i - j))\}$.

Оператор I-LOWA будем обозначать его через $\Phi_W^{-1}(A)$.

2. Свойства лингвистического оператора осреднения

Рассмотрим некоторые свойства LOWA-оператора, которые он наследует от OWA-оператора, заметив при этом, что I-LOWA-оператор обладает тем же набором свойств.

1. $\Phi_W(A)$ является оператором осреднения.

Заметим, что если k — результирующий индекс в выпуклой комбинации двух лингвистических оценок a_i и a_j , причем $i \leq j$, то $i \leq k \leq j$. Это означает, что

$$a_i \leq \Phi_W(a_i, a_j) \leq a_j.$$

В случае n аргументов

$$\min \{a_1, \dots, a_n\} \leq \Phi_w(A) \leq \max \{a_1, \dots, a_n\},$$

что характеризует LOWA-оператор как оператор осреднения, поскольку данное неравенство является определяющим свойством этого класса операторов.

2. LOWA — коммутативный оператор, т. е.

$$\Phi_w(A) = \Phi_w(\pi(A)),$$

где $\pi(A)$ — произвольная перестановка элементов множества A . Свойство коммутативности обеспечивается упорядочением компонентов векторной оценки по невозрастанию (для $\Phi_w^{-1}(A)$ — по неубыванию). Учитывая это свойство, можно записать $\Phi_w(A) = \Phi_w(B)$, оговаривая, что B — вектор, полученный из вектора оценок A упорядочением по невозрастанию лингвистических термов.

3. LOWA — идемпотентный оператор. При $n = 2$ справедливость данного свойства вытекает из того факта, что при $i = j$

$$k = \min \{T, i + \text{round}(w(j-i))\} = \min \{T, i\} = i,$$

т. е., если $a_i = a_j = a$, то $\Phi_w(a_i, a_j) = a$.

Учитывая рекурсивное определение выпуклой комбинации, можно заключить о справедливости данного свойства для n аргументов.

4. LOWA-оператор не является ассоциативным.

Приведем пример. Пусть лингвистическая шкала определена в виде

$$S = \{S_0 = N, S_1 = VL, S_2 = L, S_3 = M, S_4 = H, S_5 = VH, S_6 = P\}.$$

Зададим вектор весов $W = (0.3, 0.7)$ и проверим справедливость равенства

$$\Phi_w(\Phi_w(VL, M), VH) = \Phi_w(VL, \Phi_w(M, VH)).$$

Вычислим левую часть выражения.

$$\Phi_w(VL, M) = L = S_2,$$

так как $B = (M, VL)$, $j = 3$, $i = 1$, то

$$k = \min \{6, 1 + \text{round}(0.3 \cdot (3-1))\} = \min(6, 2) = 2.$$

Далее $\Phi_w(L, VH) = M = S_3$, так как $B = (VH, L)$, $j = 5$, $i = 2$,

$$k = \min \{6, 2 + \text{round}(0.3 \cdot (5-2))\} = \min(6, 3) = 3.$$

С другой стороны, $\Phi_w(M, VH) = H = S_4$, так как $B = (VH, M)$, $j = 5$, $i = 3$,

$$k = \min \{6, 3 + \text{round}(0.3 \cdot (5-3))\} = \min(6, 4) = 4.$$

Затем $\Phi_w(VL, H) = L = S_2$, так как $B = (H, VL)$, $j = 4$, $i = 1$,

$$k = \min \{6, 1 + \text{round}(0.3 \cdot (4-1))\} = \min(6, 2) = 2.$$

Таким образом,

$$\Phi_w(\Phi_w(VL, M), VH) = S_3 \neq S_2 = \Phi_w(VL, \Phi_w(M, VH)).$$

5. $\Phi_w(A)$ монотонно возрастает по каждому аргументу. Пусть $A^1 = (a_1^1, \dots, a_n^1)$ и $A^2 = (a_1^2, \dots, a_n^2)$ — два упорядоченных по невозрастанию вектора лингвистических оценок, таких, что $\forall i = \overline{1, n}$ ($a_i^1 \geq a_i^2$), тогда для любого фиксированного вектора весов W $\Phi_w(A^1) \geq \Phi_w(A^2)$.

Данное свойство доказывается индукцией по числу аргументов.

Пусть $n = 2$, $a_1^1 = S_j$, $a_2^1 = S_i$, $a_1^2 = S_p$, $a_2^2 = S_q$. Ясно, что $j \geq p$, $i \geq q$. Взяв произвольное $w_1 \in [0, 1]$, имеем $j \cdot w_1 \geq p \cdot w_1$ и $i \cdot (1 - w_1) \geq q \cdot (1 - w_1)$, тогда

$$j \cdot w_1 + i \cdot (1 - w_1) \geq p \cdot w_1 + q \cdot (1 - w_1).$$

Округляя, получим

$$\begin{aligned} \text{round}(j \cdot w_1 + i \cdot (1 - w_1)) &\geq \text{round}(p \cdot w_1 + q \cdot (1 - w_1)) \Leftrightarrow \\ \text{round}((j - i) \cdot w_1 + i) &\geq \text{round}((p - q) \cdot w_1 + q). \end{aligned}$$

Так как $i \in \mathbb{Z}^+$ и $(j - i) \cdot w_1 > 0$, то

$$i + \text{round}((j - i) \cdot w_1) \geq q + \text{round}((p - q) \cdot w_1),$$

откуда $\Phi_W(A^1) \geq \Phi_W(A^2)$, т. е. для $n = 2$ свойство доказано.

Предположим, что свойство является истинным для $(n - 1)$, т. е.

$$\Phi_W(a_1^1, \dots, a_{n-1}^1) \geq \Phi_W(a_1^2, \dots, a_{n-1}^2),$$

где $a_1^1 \geq \dots \geq a_{n-1}^1$, $a_1^2 \geq \dots \geq a_{n-1}^2$, тогда для n аргументов имеем

$$\Phi_W(A) = w_1 \otimes a_1^1 \oplus (1 - w_1) \otimes C^{n-1} \{(\lambda_k, a_k^1), k = \overline{2, n}\},$$

$$\Phi_W(B) = w_1 \otimes a_1^2 \oplus (1 - w_1) \otimes C^{n-1} \{(\lambda_k, a_k^2), k = \overline{2, n}\}.$$

Так как

$$C^{n-1} \{(\lambda_k, a_k^1), k = \overline{2, n}\} = \Phi_W(a_2^1, a_3^1, \dots, a_n^1)$$

и

$$C^{n-1} \{(\lambda_k, a_k^2), k = \overline{2, n}\} = \Phi_W(a_2^2, a_3^2, \dots, a_n^2),$$

то в соответствии с гипотезой

$$\Phi_W(a_2^1, a_3^1, \dots, a_n^1) \geq \Phi_W(a_2^2, a_3^2, \dots, a_n^2),$$

Пусть $\Phi_W(a_2^1, a_3^1, \dots, a_n^1) = S_j$, $\Phi_W(a_2^2, a_3^2, \dots, a_n^2) = S_i$, причем $S_j \geq S_i$. Так как $a_1^1 \geq a_1^2$, а $a_1^1 \geq S_j$, $a_1^2 \geq S_i$, то

$$\Phi_W(A^1) = \Phi_W(a_1^1, S_j), \quad \Phi_W(A^2) = \Phi_W(a_1^2, S_i).$$

Так как для $n = 2$ свойство справедливо, т. е. $\Phi_W(a_1^1, S_j) \geq \Phi_W(a_1^2, S_i)$, то $\Phi_W(A^1) \geq \Phi_W(A^2)$, что и требовалось доказать.

Таким образом, оператор Φ_W , ассоциированный с вектором весов W , обладает свойствами коммутативности, идемпотентности, монотонности, но не является ассоциативным.

3. Иллюстративный пример

Предположим, что сотрудники отдела разработки программного обеспечения Иванов И. И. и Петров П. П. претендуют на должность JavaDeveloperlead. Требуется определить наиболее подходящего кандидата. К данной должности в компании предъявляются требования к владению определенными компетенциями. Для оценки кандидатов на должность сформирована лингвистическая шкала, которая соответствует лингвистической переменной *Уровень соответствия требованиям*. Данная шкала имеет вид

$$S = \{VL - \text{очень низкий}, L - \text{низкий}, M - \text{средний}, H - \text{высокий}, VH - \text{очень высокий}\}.$$

Предположим, что в рамках процедуры претенденты получили оценки, представленные в следующей таблице.

Таблица

Оценки претендентов

Информационные технологии	Java	SQL	C#	Python	Linux	MSOffice	PHP	Zabbix
Иванов И. И.	VH	H	L	H	M	M	M	L
Петров П. П.	H	H	M	M	H	M	VH	VH

Для формирования весов использовалась функция квантификации $Q(x) = x^2$, которая задает лингвистический квантор *большинство*, а, следовательно, при формировании обобщенной оценки учитывается *большинство* частных оценок. Согласно [6], весовые коэффициенты рассчитывались по формуле $w_i = \frac{2i-1}{n^2}$ ($i = \overline{1, n}$). В результате использования лингвистического оператора Φ_w получены обобщенные оценки претендентов Иванов И. И. — М, Петров П. П. — Н. Таким образом, Петров П. П. является наиболее подходящим претендентом на должность.

Заключение

Предложенный подход планируется использовать при разработке модуля управления персоналом автоматизированной системы управления проектами.

Литература

1. Волкова Л. П. Социологические исследования в управлении персоналом: учебное пособие / Л. П. Волкова – Воронеж : Изд-во Воронежского гос. ун-та, 2008. – 264 с.
2. Кибанов А. Я. Основы управления персоналом: учебник: 3-е изд., перераб. и доп / А. Я. Кибанов. – М. : ИНФРА-М, 2014. – 448 с.
3. Баскина Т. В. Техники успешного рекрумента / Т. В. Баскина. – М. : Альпина Бизнес Букс, 2008. – 211 с.
4. Броневич А. Г. Нечеткие модели анализа данных и принятия решений / А. Г. Броневич, А. Е. Лепский. – М. : Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. – 264 с.
5. Леденева Т. М. Обработка нечеткой информации / Т. М. Леденева. – Воронеж : Воронеж. гос. ун-т, 2006. – 233 с.
6. Леденева Т. М. Обзор основных классов операторов порядкового взвешенного агрегирования / Т. М. Леденева, И. Н. Левкина // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Серия : Системный анализ и информационные технологии. – 2022. – № 1. – С. 5–31.
7. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫХ МОДУЛЕЙ

М. М. Шишов

Воронежский государственный университет

Аннотация. В статье предложен подход для распределения программных модулей между тестирующими, который основан на оптимизационной модели. В качестве целевой функции выступает максимизация вероятности обнаружения ошибки. Рассмотрено обобщение данной модели на случай, когда исходная информация задана приближенно в форме нечетких чисел. В качестве основного метода решения задачи выступает метод максимального элемента. Приведен иллюстративный пример, демонстрирующий эффективность подхода.

Ключевые слова: распределение ресурсов, задача математического программирования, метод максимального элемента, нечеткие числа.

Введение

Зачастую современные программные продукты разрабатываются в сжатые сроки и при ограниченных бюджетах, что обуславливает необходимость контроля их качества на всех этапах жизненного цикла. В связи с этим имеет смысл говорить о важности тестирования в общем процессе разработки программного обеспечения. Можно выделить три основные тенденции. Во-первых, растет понимание необходимости промышленных методов тестирования, в частности с применением специальных средств автоматизации. Во-вторых, идет поиск возможностей для оптимизации затрат на выполнение данных работ с точки зрения общей организации процесса, в том числе с использованием модели аутсорсинга. В-третьих, развивается такое направление, как исследовательское тестирование, под которым подразумевается способ проверки продукта без определенного набора тестов, когда на первый план выходит творческий подход и максимальное использование возможностей человеческого мышления. Для данного вида тестирования важен опыт работы тестирующего, который позволяет использовать различные методы тестирования и выбирать наиболее подходящий для каждого сценария проверки. При этом противники данного метода считают его бессистемным и ненаучным по сравнению с традиционным тестированием по документации.

В данной статье предлагается оптимизационная модель распределения программных модулей между тестирующими с целью минимизации затрат времени. Для решения задачи используется метод максимального элемента [5], особенностью которого является то, что решение многомерной задачи с n переменными, сводится к последовательному решению n задач с одной переменной, т. е. осуществляется декомпозиция исходной задачи на несколько взаимосвязанных подзадач меньшей размерности.

1. Постановка задачи

Рассмотрим следующую задачу, которая относится к классу задач распределения ресурсов [3, 4] (в нашем случае под ресурсами подразумеваются тестирующие).

Пусть имеется программное обеспечение включает N программных модулей, при этом в модуле i может быть допущена ошибка, априорная вероятность которой равна p_i $\left(\sum_{i=1}^N p_i = 1 \text{ или } \sum_{i=1}^N p_i = 100\% \right)$. Для тестирования разработанного программного обеспечения

привлекается команда из M тестировщиков. Необходимо таким образом распределить N модулей между M тестировщиками, чтобы вероятность обнаружения ошибки была максимальной. Тестировщики имеют равную эффективность, а уровень их квалификации задан вектором $(w_1, \dots, w_N)$, где w_i — вероятность обнаружения ошибки i -м тестировщиком.

Заметим, что при распределении возможны следующие ситуации:

- $N = M$, т. е. количество модулей равняется количеству QA тестировщиков;
- $N > M$, т. е. количество модулей больше, чем количество QA тестировщиков;
- $N < M$, т. е. количество модулей меньше, чем количество QA тестировщиков.

В данной статье рассмотрим первый вариант. Предположим, что все тестировщики упорядочены списком, и индекс i соответствует порядковому номеру тестировщика в списке; x_i — количество модулей, назначенных тестировщику i для поиска ошибки. Вероятность того, что тестировщик i найдет хотя одну ошибку в x_i выделенных ему модулях равна $1 - (1 - w_i)^{x_i} = 1 - \varepsilon_i^{x_i}$.

Тогда вероятность обнаружения ошибки равна $F(x) = \sum_{i=1}^N p_i (1 - \varepsilon_i^{x_i})$, где $X = (x_1, \dots, x_N)$.

Формальная постановка задачи имеет вид

$$F(x) = \sum_{i=1}^N p_i (1 - \varepsilon_i^{x_i}) \rightarrow \max$$

при линейном ограничении на его компоненты

$$\sum_{i=1}^N x_i \leq M,$$

и при дополнительных условиях для всех $i = \overline{1, N}$ вида

$$\begin{cases} x_i \in \{0, 1, \dots, K\}, \\ 0 \leq \varepsilon_i \leq 1, \\ p_i \geq 0. \end{cases}$$

2. Метод максимального элемента

Для решения данной задачи применим метод максимального элемента [5], который включает следующие шаги:

1) Положить $F_0 = 0$ (начальное значение целевой функции), $t = 1$ (t — количество итераций, модулей). Вычислить компоненты вектора $(\Delta_i^t)_S$ по формуле

$$\Delta_i^t = p_i w_i \quad (i = \overline{1, N})$$

2) Найти

$$\Delta_{\max}^t = \max_{1 \leq i \leq N} \{\Delta_i^t\}.$$

Пусть $\Delta_{\max}^t$ — значение оценки для $i = l_t$, тогда назначить текущего в списке тестировщика на модуль l_t . Если таких элементов несколько, то из них берется любой.

3) Увеличить счетчик итераций t . Исключить тестировщика l_t , сформировав текущий вектор $x^{(t)}$ с компонентами $i = \overline{1, N}$ по правилу

$$x_i^t = \begin{cases} x_i^{(t-1)}, & \text{если } i \neq l_t, \\ 0, & \text{если } i = l_t, \\ x_i^{(t-1)} + 1, & \text{если } i > l_t. \end{cases}$$

4) Вычислить текущее значение целевой функции

$$F_t = F_{t-1} + \Delta_{\max}^t.$$

5) Проверить условие $t \leq K$: да — перейти к шагу 6, нет — перейти к шагу 7.

6) Пересчитать компоненты текущего вектора $(\Delta'_i)_S$ согласно правилу

$$\Delta'_i = \begin{cases} \Delta_i^{t-1}, & \text{если } i \neq q, \\ \Delta_i^{t-1} \varepsilon_i, & \text{если } i = q. \end{cases}$$

7) Перейти к пункту 2.

8) Останов: найдено распределение модулей между тестирующими в форме вектора $x^{(t)}$, при этом значение целевой функции равно F_t .

3. Задача оптимального распределения ресурсов в условиях неопределенности

Заметим, что исходная информация в данной задаче может быть приближенной. В этом случае для ее формализации целесообразно использовать понятие нечеткого числа [1].

Пусть U — некоторое универсальное множество, x — элемент множества U , α — некоторое свойство. Нечетким подмножеством A множества U называется множество упорядоченных пар вида $A = \{(x / \mu_A(x))\}_{x \in U}$, где $\mu_A(x)$ — функция принадлежности, которая принимает свои значения в линейно упорядоченном множестве M и определяет степень принадлежности элемента x к подмножеству A .

Нечеткая переменная задается кортежем $\langle \gamma, A, U \rangle$, где γ — название переменной, A — нечеткое подмножество универсального множества U с функцией принадлежности μ_A , т. е. представляет собой нечеткое подмножество заданного универсального множества с именем.

Если $U = \mathbb{R}$, то нечеткая переменная называется нечеткой величиной.

Нечетким числом $\tilde{\alpha}$ назовем нечеткую величину, функция принадлежности $\mu_{\tilde{\alpha}}$ которой является выпуклой и унимодальной на $\mathbb{R}$. Пусть α — точка экстремума функции принадлежности $\mu_{\tilde{\alpha}}$ (модальное значение), тогда нечеткое число можно рассматривать как функцию распределения значений высказывания « x приблизительно равно α ».

Простейшим нечетким числом является треугольное нечеткое число с функцией принадлежности

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - \frac{\alpha - x}{l}, & \text{если } \alpha - l \leq x \leq \alpha, \\ 1 - \frac{x - \alpha}{r}, & \text{если } \alpha \leq x \leq \alpha + r, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

где l — левый коэффициент неопределенности; r — правый коэффициент неопределенности.

Так как, функция μ зависит от трех параметров α, l, r , поэтому треугольное нечеткое число с модальным значением a обозначается тройкой (α, l, r) .

Пусть $\alpha \in (0, 1]$, тогда α -срезом нечеткого множества A называется обычное множество $A_\alpha = \{x : \mu_A(x) \geq \alpha\}$.

α -срез представлен на рис. 1.

α -срез треугольного нечеткого числа имеет следующий вид:

$$T_\alpha = (a, l, r)_\alpha = [a - l(1 - \alpha), a + r(1 - \alpha)].$$

Общая методика решения задач с нечеткими параметрами [2] сводится к заданию параметра α ,

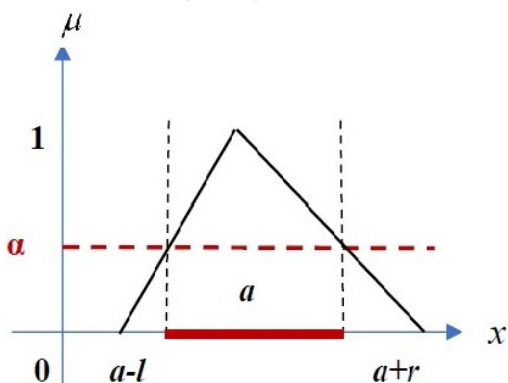


Рис. 1. α срез нечеткого числа (α, l, r)

что позволяет от нечетких чисел перейти к интервальным, а затем, выбрав на интервале определенное значение произвольно или с учетом дополнительной информации, перейти к решению четкой задачи с использованием известных методов и алгоритмов. В нашем случае процедура решения нечеткой задачи сводится к реализации следующих шагов:

1. Формализация исходной информации на основе нечетких чисел, определение их α -срезов.
2. Формирование нечеткой и интервальной постановок задачи.
3. Выбор конкретных значений параметров из α -срезов нечетких чисел.
4. Решение задачи методом максимального элемента.
5. Анализ решений при различных значениях α .

Предположим, что априорная вероятность p_i нахождения ошибки в i -м программном модуле и вероятность w_i обнаружения ошибки i -м тестирующим являются нечеткими треугольными числами с функциями принадлежности μ_{p_i} и μ_{w_i} соответственно. Это означает, что вероятность нахождения ошибки в i -м модуле приблизительно равна p_i , а вероятность обнаружения ошибки i -м тестирующим приблизительно равна w_i .

Соответственно, целевая функция будет иметь следующий вид:

$$F(x) = \sum_{i=1}^S \mu_{p_i} \left(1 - (1 - \mu_{w_i})^{x_i} \right) \rightarrow \max,$$

при линейном ограничении на его компоненты

$$\sum_{i=1}^N x_i \leq M,$$

и при дополнительных условиях для всех $i = \overline{1, N}$ вида

$$\begin{cases} x_i \in \{0, 1, \dots, K\}, \\ 0 \leq \varepsilon_i \leq 1, \\ p_i \geq 0. \end{cases}$$

4. Вычислительный эксперимент

Рассмотрим иллюстративный пример. Предположим, что необходимо произвести тестирование 5 программных модулей. Априорные вероятности нахождения ошибки в i -м модуле в процентах приблизительно равны (14, 7, 29, 33, 17) и $\sum_{i=1}^N p_i = 100$. Имеется команда из 5 тестирующих, которые имеют равную эффективность, а уровень их квалификации задан вектором (0.51, 0.85, 0.24, 0.69, 0.35), где w_i — приблизительная вероятность обнаружения ошибки i -м тестирующим. α -срезы заданы (0; 0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1). Требуется распределить 5 модулей между 5 тестирующими, чтобы вероятность обнаружения ошибки была максимальной. Для формализации приближенной информации зададим параметры нечетких чисел в виде: $l = 0, 1$, $r = 0.05$. Тогда, например, вероятность нахождения ошибки в первом проекте приблизительно равна 14 формально представляется нечетким числом «приблизительно 14», или формально $T(14, 0.1, 0.05)$. В табл. 1 представлена декомпозиция данного нечеткого числа.

С остальными нечеткими числами поступим идентично.

Таблица 1

Левые и правые границы треугольного числа $T(14, 0.1, 0.05)$

$p_1 = 14$						
α	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$T(\alpha)$	13.9	13,92	13,94	13,96	13,98	14
$\bar{T}(\alpha)$	14.05	14,04	14,03	14,02	14,01	14

Найдем левые и правые границы нечеткого треугольного числа $T(0,51,0.1,0.05)$, т. е. вероятность нахождения ошибки 1-м тестирующим приблизительно равна 0.51. Результаты представлены в табл. 2. С остальными числами поступим идентично.

Таблица 2

Левые и правые границы треугольного числа $T(0,51,0.1,0.05)$

$w_1 = 0,51$						
α	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$\underline{T}(\alpha)$	0.41	0.43	0.45	0.47	0.49	0.51
$\bar{T}(\alpha)$	0.56	0.55	0.54	0.53	0.52	0.51

Нетрудно заметить, что при значении $\alpha = 1$ получим первоначальное число.

Для реализации алгоритма распределения ресурсов разработан программный комплекс на языке программирования Python 3 [6] с использованием GUI фреймворка Tkinter для разработки оконного приложения. Результаты работы программного комплекса представлены в табл. 3 и табл.4.

Таблица 3

Решение задачи при $\underline{T}(\alpha)$

α	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$F(x)$	42.47	43.86	45.39	46.91	48.41	49.88
Цепочка назначений	4,4,1,2,5	4,4,1,2,3	4,4,1,2,3	4,4,1,3,2	4,4,1,3,2	4,1,4,3,2
Точное решение	[1.1.0.2.1]	[1.1.1.2.0]	[1.1.1.2.0]	[1.1.1.2.0]	[1.1.1.2.0]	[1.1.1.2.0]

Таблица 4

Решение задачи при $\bar{T}(\alpha)$

α	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$F(x)$	53.93	53.13	52.33	51.52	50.7	49.88
Цепочка назначений	4,3,1,5,4	4,3,1,5,4	4,3,1,4,5	4,3,1,4,5	4,1,3,4,5	4,1,4,3,2
Точное решение	[1.0.1.2.1]	[1.0.1.2.1]	[1.0.1.2.1]	[1.0.1.2.1]	[1.0.1.2.1]	[1.1.1.2.0]

Наибольшее значение целевой функции получим при значения $r = 0.05$ и $\alpha = 0$. В этом случае значение $F(x) = 53,93$. Цепочка назначений выглядит следующим образом: $4 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 4$, т. е. это последовательность номеров программных модулей для поиска ошибки. Что касается точного решения [1.0.1.2.1], то для того, чтобы вероятность обнаружения ошибки была максимальной, необходимо одного тестирущика назначить на первый модуль, одного на третий, двух на четвертый и одного на пятый.

Заключение

Таким образом, в данной работе была рассмотрена задача оптимального распределения ресурсов, метод максимального элемента и его модификация с использованием нечетких чисел. Рассмотрен модельный подход к проблеме оптимального распределения ресурсов. На языке программирования Python 3 [6] реализована программа поиска оптимального решения. Проведены численные эксперименты и выполнен анализ и проверка полученных результатов.

Литература

1. Леденева Т. М. Обработка нечеткой информации / Т. М. Леденева. – Воронеж : Изд-во Воронежского государственного университета, 2006. – 232 с.
2. Мелькумова Е. М. О решении некоторых задач нечеткого математического программирования / Е. М. Мелькумова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2009. – № 2. – С. 17–22.
3. Юдин Д. Б. Задачи и методы линейного программирования. Математические основы и практические задачи / Д. Б. Юдин, Е. Г. Гольштейн. – Москва : Либроком, 2010. – 322 с.
4. Саати Т. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы / Т. Саати. – Москва : Наука, 2012. – 979 с.
5. Берзин Е. А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем / Е. А. Берзин. – Москва : Советское радио, 1974. – 304с.
6. Мэтиз Э. Изучаем Python. Программирование игр, визуализация данных, веб-приложения / Э. Мэтиз. – СПб. : Питер, 2017. – 496 с.