
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
И СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ**

МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ О МЕСТЕ ПОКУПКИ АВТОМОБИЛЯ

Е. М. Аристова

Воронежский государственный университет

Аннотация. В данной статье рассматривается метод анализа иерархий Саати для определения рейтинга объектов, его алгоритм и особенности. Рассмотрена и решена данным методом задача выбора лучшего автосалона из представленного списка для покупки автомобиля.

Ключевые слова: рейтинг объектов, ранжирование, лицо принимающее решение (ЛПР), анализ сравнения по критериям, метод анализа иерархий для построения рейтинга объектов.

Введение

Рейтинг — числовой или порядковый показатель, отображающий важность или значимость определённого объекта или явления.

Можно заметить, что рейтинг представляет собой определённую позицию анализируемого объекта среди аналогичных, определённый способ размещения всех объектов рейтинга, от более весомого к менее весомому. Рейтинг определяется путем опроса большой целевой группы или ограниченной группы экспертов. Место в рейтинге для выбранного объекта определяется любым параметром оценки или группой параметров, рассчитанных по определённому алгоритму оценки, согласно заданной шкале ранжирования.

В последние годы очень часто применяются рейтинговые оценки. Оценки являются удобным средством обоснования решений по определению наилучшего или наихудшего показателя. Многие компании часто используют рейтинговые оценки для того, чтобы выбрать лучшие решения для оцениваемых объектов, при помощи качественных и количественных оценок они могут рассмотреть различные последствия этого решения.

При оценивании отдельных критериев компании невозможно отследить полного функционирования, если проводить улучшение на определенном объекте, это не дает большой эффективности, поэтому компании привлекают экспертов для независимой оценки и сравнения их с другими компаниями на рынке. При правильном подходе и рассмотрении всех компонентов, рейтинговая оценка увеличивается, тем самым помогает компаниям иметь преимущества на рынке, то есть при выборе необходимой продукции заинтересованный человек отдаст свой выбор той компании, чей рейтинг на рынке выше.

Сущность и понятие рейтинга

Рейтинг — это некий числовой или порядковый показатель, который демонстрирует значимость или важность того или иного объекта.

Рейтинги можно составлять при помощи голосования, опросов общественного мнения или анкетирования, т. е. рейтинг — это показатель оценки, основанный на мнениях компетентных людей (компетентность в данном случае — это не только наличие определенного уровня знаний об изучаемом объекте, но и заинтересованность в результате) [10, 11].

Основной целью рейтинга является *нахождение наиболее востребованного объекта*. Рейтинг решает следующие задачи:

- раскрытие информации (рейтинг — это источник информации для человека, расширяющий горизонты);
- установление ограничений на риск (рейтинг используется человеком как точка отсчета для установления ограничений типа «да/нет» или «покупать/не покупать»);
- формирование объективной оценки компании интересующего его объекта;
- использование в качестве инструмента регулирования.

Спрос на рейтинги в современной жизни очень высок, потребителями могут выступать: инвесторы, коммерческие и некоммерческие организации различных направлений и т. д. Рейтинги необходимы для того, чтобы сделать правильный выбор в условиях как избыточной, так и неполной информации, потому что в обоих случаях людям сложно принять правильное решение: если данных много, то их сложно обобщить и структурировать, если мало, то высока вероятность совершения ошибки без учета важных параметров.

В создании рейтингов в развитых странах составляют рейтинговые агентства, занимающиеся различными объектами ранжирования. Значения показателей определяются экспертными или расчетно-аналитическими методами [10, 11].

Рейтинг помогает объекту оценивания совершать действия для поднятия рейтинга на более высокий уровень.

Постановка задачи построения рейтинга объектов

Пусть для каждого из m объектов множества $X = \{1, 2, \dots, m\}$ заданы n числовых неотрицательных значений показателей (характеристик), т. е. задана матрица

$$A = (a_{ij}), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}.$$

В этой матрице каждому объекту $i \in X$ соответствует строка с номером i , а каждому показателю — столбец с номером j . В матрице A нет ни одной строки с нулевыми значениями показателей, так как рассмотрение таких объектов не имеет смысла. В матрице A также отсутствуют столбцы, все элементы которых равны нулю. Предполагается, что большие значения показателей более предпочтительны по отношению к меньшим их значениям.

Характеристикам соответствуют весовые коэффициенты $g_j \geq 0, j = \overline{1, n}$, значения которых нормируются. Нормированные значения весовых коэффициентов имеют вид $w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j}$,

при этом $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

Вычисляются новые значения показателей с учетом весовых коэффициентов $b_{ij} = a_{ij} w_j$. Значения показателей b_{ij} также нормируются: определяются $b_j = \max_{1 \leq i \leq m} b_{ij}$, нормированные значения x_{ij} показателей b_{ij} с учетом весов w_j имеют вид $x_{ij} = \frac{b_{ij}}{b_j}, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$. Полученные значения x_{ij} удовлетворяют условиям $0 \leq x_{ij} \leq 1$ и не имеют размерности [1]. Отсутствие размерности делает осмысленными математические и логические операции над разными по содержанию показателями.

Остановимся на проблеме *определения коэффициентов важности критериев*, т. е. весовых коэффициентов. В работах [5, 7] рассмотрены различные аспекты этой проблемы, стоит отметить, что рассматриваемая задача относится к задачам выбора вариантов.

Решение задачи определения рейтинга может быть выполнено как для всего набора из n показателей, так и для любого подмножества $J = \{j_1, j_2, \dots, j_k\}$ различных показателей этого набора. С формальной точки зрения представленная задача — это задача кластеризации [4] с некоторыми дополнительными условиями.

Задача кластеризации состоит в разделении исследуемого множества объектов на группы «похожих» объектов, называемых *кластерами*. В задаче кластеризации отнесение каждого из объектов данных осуществляется к одному (или нескольким) из заранее неопределенных классов. Разбиение объектов данных по кластерам осуществляется при одновременном их формировании. Определение кластеров и разбиение по ним объектов данных выражается в итоговой модели данных, которая является решением задачи кластеризации [1].

Под *кластером* в рассматриваемой задаче понимается множество объектов, имеющих одинаковый рейтинг. Множество объектов X необходимо разбить на p непересекающихся подмножеств $\bigcup_{k=1}^n X_k = X$, $X_k \cap X_s = \emptyset$, $s \neq k$ при этом число подмножеств p может быть заранее неизвестно, т. е. определяться в процессе решения задачи.

Возможны также дополнительные ограничения вида $x_{\min} \leq X_i \leq x_{\max}$ для некоторых или всех подмножеств. Дополнительные условия состоят в том, что разбиение производится для выделенного набора показателей и в соответствии с максимальным значением некоторых функций $g_i(A)$, $i = \overline{1, k}$, вычисленных для каждого из объектов. Из высказанного ранее предположения о предпочтительности больших значений показателей по сравнению с меньшими следует: если для двух объектов с номерами s и k выполнены условия, $x_{sj} \geq x_{kj}$, $j = \overline{1, n}$, то рейтинг объекта с номером s не может быть ниже, чем рейтинг объекта с номером k .

В процессе разбиения каждому из подмножеств X_k ставится в соответствие определенный показатель q_k , называемый *рейтингом объекта*; все объекты из множества X_k неразличимы по этому показателю.

Остановимся более подробно на методе анализа иерархий Саати для построения рейтинга объектов.

Метод анализа иерархий Саати

Метод анализа иерархий (МАИ) заключается в декомпозиции проблемы на более простые составные части и в дальнейшей обработке последовательности суждений эксперта по парным сравнениям. Метод Саати используется для обоснования принятия решений в условиях неопределенности и многокритериальности [6, 8]. Метод базируется на следующих принципах:

Принцип декомпозиции. Данный принцип предусматривает структурирование проблемы в виде иерархии, что является первым этапом применения МАИ. Иерархия считается полной, если каждый элемент заданного уровня связан со всеми элементами последующего уровня.

Полная иерархия выглядит таким образом (рис. 1) и включает в себя: цель, критерии и альтернативы.

Принцип сравнительных суждений. Необходимо установить приоритеты критериев и получить оценки для альтернативных решений, в МАИ используется метод парных сравнений —



Рис. 1. Иерархия

строятся матрицы парных сравнений $A = (a_{ij})$, где $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$, w_i — «вес» i -го элемента иерархии [2, 6]. Очевидно, $a_{ii} = 1$, $a_{ij} = 1/a_{ji}$, то есть диагональные элементы матрицы равны 1, матрица является обратносимметричной. Для каждой матрицы вычисляется отношение и индекс однородности.

Принцип синтеза приоритетов. Итак, будем считать, что

– построены матрицы парных сравнений: одна для второго уровня иерархии (для критериев), а на каждом последующем уровне — столько матриц парных сравнений, сколько элементов содержит предшествующий уровень иерархии (в каждой матрице — результаты сравнения по одному из критериев);

– вычислены интегральные оценки, распределены значения от максимального до минимального.

Метод анализа иерархий Саати состоит из следующих этапов:

1. Построение иерархии;
2. Получение оценок объектов, весовых коэффициентов критериев;

При расчете матриц парных сравнений используют шкалу для сравнения критериев между собой (шкалой относительной важности) (табл.1).

Таблица 1

Шкала относительной важности

a_{ij}	Пояснения
1	Равная важность сравниваемых элементов иерархии. Оба сравниваемых элемента имеют одинаковую значимость для элемента более высокого уровня.
3	Умеренное превосходство i -го элемента иерархии над j -м. Предшествующий опыт и оценка говорят о немного большей значимости одного элемента по сравнению с другим.
5	Существенное или сильное превосходство i -го элемента. Предшествующий опыт и оценка говорят о более высокой значимости одного элемента по сравнению с другим.
7	Значительное превосходство i -го элемента. Очень высокая значимость элемента явно проявилась в прошлом.
9	Очень значительное превосходство i -го элемента. Речь идет о максимально возможном различии между двумя элементами.
2, 4, 6, 8	Промежуточные степени превосходства. Значения попадают в интервал между определенными выше баллами значимости.

3. Оценка однородности иерархии:

$ИО = \frac{\alpha_{\max} - n}{n - 1}$ — индекс однородности, где α_{\max} — максимальное собственное значение матрицы; n — порядок матрицы, $ОО = \frac{ИО}{СС}$ — отношение однородности [9].

Случайная согласованность (СС) уже известна и определена (табл. 2).

Таблица 2

Случайная согласованность

Размерность матрицы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Случайная согласованность	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Если отношение однородности превышает 0,1, то оценки эксперта выставлены некорректно, поэтому их необходимо пересмотреть для более точного оценивания.

4. Расчет интегральных оценок объектов:

Интегральная оценка объекта вычисляется, как сумма всех показателей, умноженных на нормированное значение весовых коэффициентов [9].

Благодаря этому методу, можно найти оптимальное решение в любой ситуации, так как оно позволяет сравнивать все факторы одновременно.

Вычислительный эксперимент

Рассмотрим следующую задачу: необходимо определить лучший из пяти автосалонов для покупки автомобиля. Значения параметров (показателей) для всех объектов (автосалоны) приведены в табл. 3. В качестве объектов выступают автосалоны (множество $S = (s_1, \dots, s_5)$, где s_i ($i = 1, 5$) i -й салон). Параметров ($m = 3$) — это расположение салона, работа персонала и его репутация [3].

Будем использовать общую шкалу для показателей с качественными оценками — {отл, хор, удовл, неудл}. Данные оценки были поставлены экспертом.

Таблица 3

Качественные оценки автосалонов

№ Салона	Оценки		
	А	Б	В
1	удовл	хор	отл
2	неуд	отл	удовл
3	отл	хор	удовл
4	отл	неуд	отл
5	отл	отл	хор

Обозначим показатели, как «отл» — 9, «хор» — 7, «удовл» — 5, «неудл» — 3. Значения показателей представлены в таблице (табл. 4):

Таблица 4

Значения показателей

Автосалон	Показатели		
	К1	К2	К3
s1	5	7	9
s2	3	9	5
s3	9	7	3
s4	9	3	9
s5	9	9	7

Матрица A_{ij} имеет вид:

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} 5 & 7 & 9 \\ 3 & 9 & 5 \\ 9 & 7 & 3 \\ 9 & 3 & 9 \\ 9 & 9 & 7 \end{pmatrix}.$$

Допустим, что в данной задаче все показатели равноценны, поэтому $w_j = \frac{1}{3}$. Построим матрицу с новыми значениями показателей:

$$B_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{5}{3} & \frac{7}{3} & \frac{9}{3} \\ 1 & \frac{9}{3} & \frac{5}{3} \\ \frac{9}{3} & \frac{7}{3} & 1 \\ \frac{9}{3} & 1 & \frac{9}{3} \\ \frac{9}{3} & \frac{9}{3} & \frac{7}{3} \end{pmatrix}.$$

Найдем максимальный элемент в каждой строке для нормирования по формуле $b_j = \max_{1 \leq i \leq m} b_{ij} : b_1 = \frac{9}{3}, b_2 = \frac{9}{3}, b_3 = \frac{9}{3}$. Рассчитаем новые значения показателей b_{ij} с учетом весов w_j :

$$X_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{5}{9} & \frac{7}{9} & 1 \\ \frac{3}{9} & 1 & \frac{5}{9} \\ 1 & \frac{7}{9} & \frac{3}{9} \\ 1 & \frac{3}{9} & 1 \\ 1 & 1 & \frac{7}{9} \end{pmatrix}.$$

Для построения рейтинга объектов воспользуемся *методом Саати*. Построим иерархию, где в качестве показателей (критериев) будут: расположение салона, работа персонала и репутация (рис. 2).

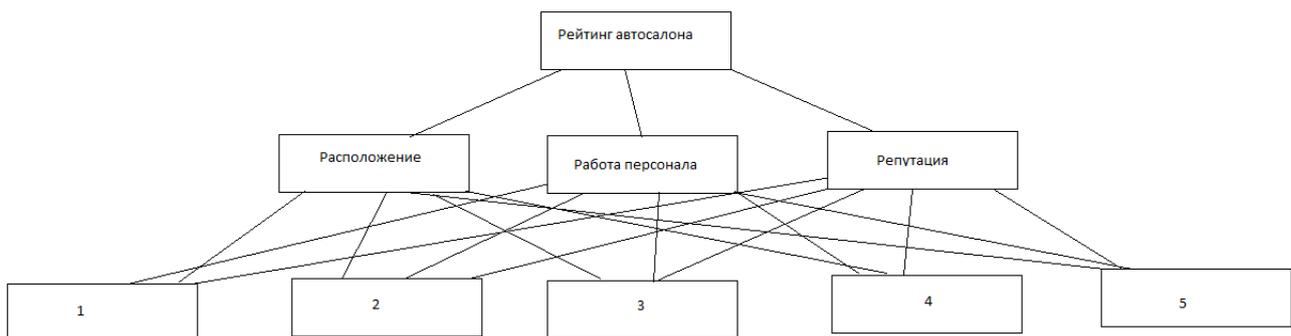


Рис. 2. Иерархия объектов

Рассчитаем весовые коэффициенты (табл. 5).

Таблица 5

Весовые коэффициенты

Название критерия	Расположение салона	Работа персонала	Репутация салона
Расположение салона	1	5	$\frac{1}{7}$
Работа персонала	$\frac{1}{5}$	1	$\frac{1}{9}$
Репутация салона	7	9	1

Построим и вычислим матрицу весовых коэффициентов с помощью строчных сумм (табл. 6).

Таблица 6

Матрица весовых коэффициентов

Критерий	Расположение	Работа персонала	Репутация	Строчные суммы	Нормированные значения	Обозначение
Расположение салона	1	5	$\frac{1}{7}$	6,1	0,251	w_1
Работа персонала	$\frac{1}{5}$	1	$\frac{1}{9}$	1,31	0,053	w_2
Репутация салона	$\frac{7}{1}$	$\frac{9}{1}$	1	17	0,695	w_3

Проведем анализ сравнения автосалонов по выше предложенным критериям (табл. 7–9).

Таблица 7

Анализ сравнения салонов по критерию «Расположение салона»

№ автосалона	№ автосалона					Строчная Сумма	Нормированное значение критерия	Обозначение
	1	2	3	4	5			
1	1	3	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	4,6	0,089	k_{11}
2	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{7}$	1,76	0,034	k_{12}
3	5	7	1	1	1	15	0,292	k_{13}
4	5	7	1	1	1	15	0,292	k_{14}
5	5	7	1	1	1	15	0,292	k_{15}
Сумма	16,33	25,00	3,34	3,34	3,34	51,36	1	

$$\alpha_{\max} = 5,249, \quad IO = \frac{\alpha_{\max} - n}{n - 1} = 0,06, \quad OO = \frac{IO}{M(IO)} = 0,05.$$

Таблица 8

Анализ сравнения салонов по критерию «Работа персонала»

№ автосалона	№ автосалона					Строчная Сумма	Нормированное значение критерия	Обозначение
	1	2	3	4	5			
1	1	$\frac{1}{3}$	1	7	$\frac{1}{3}$	9,66666666	0,21530085	k_{21}
2	3	1	3	9	1	17	0,37863253	k_{22}
3	1	$\frac{1}{3}$	1	5	$\frac{1}{3}$	7,66666666	0,17075585	k_{23}
4	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{5}$	1	$\frac{1}{9}$	1,56507936	0,03485823	k_{24}
5	3	1	1	3	1	9	0,20045252	k_{25}
Сумма	8,1428	2,7778	6,2	25	2,7777	44,8984127	1	

$$\alpha_{\max} = 5,2918, \text{ ИО} = 0,0729, \text{ ОО} = 0,065.$$

Таблица 9

Анализ сравнения салонов по критерию «Репутация салона»

№ автосалона	№ автосалона					Строчная сумма	Нормированное значение критерия	Обозначение
	1	2	3	4	5			
1	1	7	9	1	5	21	0,35	k_{31}
2	$\frac{1}{7}$	1	3	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{7}$	4,485	0,07	k_{32}
3	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{5}$	1,7555	0,029	k_{33}
4	1	5	9	1	3	19	0,31	k_{34}
5	$\frac{1}{3}$	5	7	$\frac{1}{3}$	1	13,6	0,22	k_{35}
Сумма	2,58	18,33	29	2,644	7,34	59,907	1	

$$\alpha_{\max} = 5,643, \text{ ИО} = 0,1608, \text{ ОО} = 0,14.$$

Можно сделать вывод, что при расчете отношение однородности не превышает 0,10, то есть оценки эксперта были корректными, поэтому вычислим интегральных оценок (табл.10):

Таблица 10

Расчет интегральных оценок

№ автосалона	Значение интегральной оценки	Рейтинг автосалона
1	0,277	2
2	0,080	5
3	0,102	4
4	0,295	1
5	0,242	3

Так как высокий рейтинг соответствует максимальному значению, наибольший приоритет оказался у четвертого автосалона. Именно этот салон будет выбран в качестве оптимального для покупки автомобиля.

Заключение

Рассмотренный в работе подход, основанный на методе анализа иерархий Саати, может применяться при решении задач ранжирования объектов в различных сферах деятельности, например, определение рейтинга высших учебных заведений, определение лучшего банка для вложения денежных средств. В статье рассмотрен пример выбора наилучшего автосалона для покупки автомобиля, при этом в качестве критериев сравнения выступили расположение салона, работа персонала и его репутация.

Литература

1. Аристова Е. М. Определение рейтинга объектов / Е. М. Аристова // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационный технологии. – Воронеж : 2014. – № 2. – С. 51–56.
2. Аристова Е. М. Учет взаимодействия между целевыми функциями и их агрегирование в задачах оптимизации // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. – Воронеж : ВГУ, 2012. – 152 с.
3. Аристова Е. М. Построение рейтинга объектов // Е. М. Аристова, А. И. Сухоручкина // Межвузовская научная конференция молодых ученых и студентов «Математика, информационные технологии, приложения». – Воронеж: 2012. – № 1. – С. 203–212.
4. Мандель И. Д. Кластерный анализ / И. Д. Мандель. – Москва : Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
5. Подиновский В. В. Количественная важность критериев / В. В. Подиновский // Автоматика и телемеханика. – № 5. – 2000. – С. 110–123.
6. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.
7. Шахнов И. Ф. Количественная оценка важности целей / И. Ф. Шахнов // Известия РАН. Теория и системы управления. – № 1. – 2003. – С. 78–86.
8. Метод анализа иерархий (метод Саати). – Режим доступа: [https://edu.tltsu.ru/sites/sites_content/site216/html/media67140/lec1_is-2_2020%20\(1\).pdf](https://edu.tltsu.ru/sites/sites_content/site216/html/media67140/lec1_is-2_2020%20(1).pdf) (дата обращения: 11.11.2022).
9. Принятие решений в условиях концептуальной неопределенности на основе МАИ Саати. – Режим доступа: <https://helpiks.org/3-61476.html?ysclid=lb66gmblow123432322> (дата обращения: 11.11.2022).
10. Технологии рейтингов. – Режим доступа: <http://md-consulting.ru/articles/html/article19.html> (дата обращения: 10.11.2022).
11. Что собой представляют рейтинги и ранкинги и что лежит в их основе. – Режим доступа: <https://vc.ru/flood/23240-ratings-n-rankings> (дата обращения: 10.11.2022).

ОПТИМИЗАЦИЯ И КОНТРОЛЬ БАНКОВСКИХ УСЛУГ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Н. Б. Баева, Е. В. Куркин

Воронежский государственный университет

Аннотация. В работе рассматривается вопрос оптимизации кредитного портфеля банка в условиях недружественной среды с целью максимизации прибыли и минимизации рисков с последующей организацией оптимального контроля над сформированным портфелем и состоянием банка. Проведен анализ основных существующих подходов и предложен вариант моделирования по одному из них, который на наш взгляд является наиболее подходящим. Предложено три типа оптимизационных моделей под различные типы заемщиков и способ расчета оптимальной точки контроля. Модели неоднородной векторной линейной оптимизации. Контроль построен на теории трудности достижения целей. Приведены примеры расчетов по модели и определения точки контроля.

Ключевые слова: кредитный портфель максимизация прибыли, минимизации рисков банка, недружественная среда, оптимизационная модель, оптимальный контроль.

Введение

Кредитные операции, наряду с приёмом денег во вклады, являются для банка той группой операций, которые конституируют сущность банка в отличие от спекулятивных операций с ценными бумагами. Коммерческие банки привлекают свободные денежные средства, высвобождающиеся в хозяйственном процессе, и предоставляют их во временное пользование контрагентам, нуждающимся в дополнительном капитале для осуществления своего хозяйственного процесса. Осуществляя кредитные операции, банк формирует свой кредитный портфель. Кредитная деятельность банка имеет постоянный характер, поскольку в силу своей природы для эффективного функционирования банку необходимо постоянно размещать имеющиеся в его распоряжении средства. Пока существуют коммерческие банки, вопросы, связанные с кредитованием, не потеряют своей актуальности. Управление кредитным портфелем — ключевой вопрос кредитной деятельности коммерческого банка, поскольку требует от исполнителей высокого профессионализма и понимания экономической сущности кредитования. Современное состояние кредитных портфелей коммерческих банков следует рассматривать как результат деятельности под влиянием огромного числа внешних и внутренних факторов. Выдача кредитов для банков является не просто доходной операцией, а одним из основных источников получения доходов, так как при любом уровне развития экономики, даже в условиях финансовой нестабильности предприятий, кредитование не приостанавливается. Все зависит лишь от того, каким образом тот или иной банк проводит свою кредитную политику, эффективен ли его кредитный портфель.

1. Понятие и сущность кредитного портфеля

Существует множество различных подходов к вопросу об определении понятия и сущности кредитного портфеля банка. Под портфелем следует понимать совокупность, набор, запас определенных материальных, финансовых, идейных или других параметров, дающих представление о характере, направлении, объеме деятельности, перспективах рыночной нише компании, банка, организации и т. п.

Сравнивая различные определения кредитного портфеля [1–3] можно сделать вывод, что общим для определений является трактовка понятий как некой совокупности. Большинство авторов при определении кредитного портфеля основываются только на одном из критериев классификации его элементов — кредитном риске. Для наиболее точного определения кредитного портфеля необходимо принимать во внимание и другие факторы, оказывающие на него непосредственное влияние (например, уровень доходности и степень ликвидности кредитного портфеля). В зарубежной экономической литературе под кредитным портфелем понимается характеристика структуры и качества выданных ссуд, классифицированных по определенным критериям в зависимости от поставленных целей управления. То есть в определение сущности кредитного портфеля иностранные экономисты включают результат применения элементов процесса кредитного менеджмента. В последнее время все большее число отечественных специалистов берет на вооружение именно зарубежную методику определения понятия кредитного портфеля.

В нормативных документах Банка России, регламентирующих отдельные стороны управления кредитным портфелем (в частности в Положении Банка России № 254-П от 26 марта 2004 г. «О порядке формирования кредитными организациями резервов на возможные потери по ссудам, ссудной и приравненной к ней задолженности»), определена его структура, из которой вытекает, что в него включается не только ссудный портфель, но и различные другие требования банка кредитного характера: предоставленные и полученные кредиты, размещенные и привлеченные депозиты, межбанковские кредиты и депозиты, факторинг, требования на получение (возврат) долговых ценных бумаг, акций и векселей, учтенные векселя, требования по приобретенным по сделке правам, по приобретенным на вторичном рынке закладным, по сделкам продажи (покупки) активов с отсрочкой платежа, по оплаченным аккредитивам, по операциям финансовой аренды (лизинга), по возврату денежных средств, если приобретенные ценные бумаги и другие финансовые активы являются некотируемыми или не обращаются на организованном рынке, суммы, уплаченные кредитной организацией бенефициару по банковским гарантиям, но взысканные с принципала. Данная структура кредитного портфеля объясняется сходством таких категорий как депозит, межбанковский кредит, факторинг, гарантии, лизинг, ценная бумага, которые в своей экономической сущности связаны с возвратным движением стоимости и отсутствием смены собственника.

2. Методы оптимизации кредитного портфеля

В настоящее время особую актуальность приобрела проблема формирования кредитного портфеля банка и оптимизация структуры кредитных ресурсов, так как ресурсы банков по времени значительно короче, чем сроки выдаваемых ими кредитов. Данная ситуация представляет реальную угрозу для многих коммерческих банков. Это возникает в том случае, когда пассивы, или обязательства самого банка, превышают активы, или требования банка к своим кредиторам, с одним сроком, т. е. возникает ситуация, когда банк должен больше, чем должны ему. Существует и обратная ситуация, когда сумма активов превышает над активами. Это называется «подушкой ликвидности», характеризующаяся избытком средств банка для расчета по своим обязательствам.

В ситуации, когда пассивы превышают активы, структуры обязательств самого банка и требований банка к своим кредиторам являются несбалансированными, что доказывается большими значениями «разрывов» ликвидности по отдельным временным интервалам. Если отдельно рассматривать ситуацию превышения активов над пассивами, то она не приносит банку никаких сложностей, и даже наоборот, повышает ликвидность. Превышение пассивов над активами приносит банку большие трудности с обеспечением ликвидности, так как банк не может в определенный срок ответить по своим обязательствам. Для этого ему необходимо

либо привлекать дополнительные средства, либо реализовывать свои активы со значительным дисконтом, в убыток.

Можно выделить следующие подходы к решению данной проблемы:

- Метод пассивной эволюции;
- Моделирование кредитного риска;
- Портфельная теория Марковица.

Приведем описание методов оптимизации.

2.1. Модель пассивной эволюции

Модель представляет собой метод постепенного прекращения потоков платежей банка при полной остановке им активных действий (операций по размещению и привлечению средств, с продолжением только взаиморасчетов с уже имеющимся клиентами). Смысл данного метода состоит в оценке работоспособности банка, его возможности к выполнению своих обязательств таких, искусственно созданных условиях.

Алгоритм данного метода состоит в следующем. Для каждого дня рассчитывают суммарные денежные изъятия, которые состоят из плановых изъятий и панических добавок, представляющих собой долг за прошлый (-ые) день (дни), в случае, если банк в это время испытывал финансовые трудности.

Для того чтобы покрыть изъятия в расчетный день, используют:

- Наличные денежные средства;
- Часть активов (подразумевается их продажа);
- Штраф (за недостаток наличных денежных средств). Подразумевает своеобразный кредит, где банк покупает денежные средства на межбанковском рынке для покрытия изъятия, возникшего сегодня, за которые он расплатится завтра за счет реализованных активов.

В случае, когда средств банка не хватает для покрытия суммарных денежных изъятий, банк признается несостоятельным и пассивная эволюция прекращается. Если же активов достаточно, то вычисляются величины и остатки активов.

2.2. Моделирование кредитного риска

При этом подходе кредитный риск рассматривается в трех вариантах:

- Когда заемщики выплачивают долг не вовремя;
- Выплачивают не всю сумму;
- Заявленную в договоре, или выплачивают долг не сразу, а частями.

Для данного подхода характерно то, что риск задержки или невозврата каждого, отдельно взятого кредита в момент решения выдавать кредит или отказать клиенту, невозможно определить. Поэтому предлагается ограничиться усредненной суммой возврата кредита.

2.3. Портфельная теория Марковица

Кредитный портфель оптимизируется с помощью математического моделирования. Задача сводится к максимизации ожидаемого дохода (целевой функции), а ответом на нее будет решение банка выдавать клиенту кредит или отказать ему в данной услуге. Для решения данной задачи необходимо построение системы ограничений.

Во-первых, это ограничения по суммарной величине выдаваемых кредитов по группам качества, то есть банк не может выдать больше, чем заложено в его нормативах.

Во-вторых, это ограничения по обязательным резервам банка. Согласно положению Центрального Банка РФ №254-П от 26 марта 2004 года «О порядке формирования кредитными

организациями резервов на возможные потери по ссудам, по ссудной и приравненной к ней задолженности» коммерческие банки обязаны формировать резервы на случай возможных потерь по кредитам. В данном положении сформированы группы качества клиентов, а также определена величина резервов необходимых для каждой группы.

В-третьих, ограничение по средствам банка. Банк обладает ограниченными денежными средствами. Величина всех выдаваемых кредитов и резервов, создаваемых на случай возможных потерь по кредитам, не может превышать средства банка, состоящие из собственных средств банка и средств, привлекаемых в виде депозитов.

Подход Марковица помогает банку решить две проблемы:

- Минимизировать риски;
- Максимизировать доходность кредитного портфеля.

Однако применение подхода Марковица к формированию кредитного портфеля банка не получило широкого распространения. Трудности применения вызывает сложный математический аппарат, а также наличие развитой системы сбора исходной информации.

3. Особенности кредитной деятельности коммерческого банка

В условиях недружественной среды имеют место следующие особенности:

- 1) Ориентированность на краткосрочное кредитование;
- 2) Высокий уровень неопределенности и сложность внешней среды;
- 3) Высокий уровень риска;
- 4) Низкий уровень доходности физических и юридических лиц.

Влияние внешней среды на работу организаций требует наличия в ней сильного адаптивного механизма. Учитывая это, для устойчивого функционирования компаний необходимо разработать совокупность моделей и методов, обеспечивающих наличие успешных процедур, компенсирующих внешнее влияние, приводящее к созданию труднопреодолимых ситуаций в деятельности банка.

Проблема, которую мы решаем, в данной экономической ситуации, сложившейся в последнее время, является актуальной и ее цель заключается в повышении эффективности деятельности банка в условиях недружественной среды в сфере кредитования, как в самой востребованной в настоящее время.

Введем следующие обозначения параметров в моделях, приведенных в подразделах ниже. Пусть p_k — вероятность отдачи от проекта, r_k — процентная ставка, b_k — объем кредита, x_k — выдаваемая доля кредита, \underline{x}_k — её нижняя граница, g_k — мера риска, R_k — отдача от проекта, S — заемные средства банка, Q — свободные кредитные ресурсы банка, ξ^* — норма резервирования, β — коэффициент оценки рискованных видов деятельности, I — процентная ставка по которой банк покупает кредит.

3.1. Задача оптимизации кредитного портфеля банка для физического лица

Целевые функции модели:

$$f_1(x) = \frac{\beta \xi^*}{1 + \beta \xi^*} \sum_{k=1}^n p_k r_k b_k x_k \rightarrow \max \quad \text{— определяет прибыль банка;}$$

$$f_2(x) = \sum_{k=1}^n g_k x_k \rightarrow \min \quad \text{— определяет риск операций.}$$

Ограничения в модели:

$$(1 + r_k) b_k x_k \leq R_k p_k \quad \text{— критерий проверки целесообразности выдачи кредита;}$$

$$\sum_{k=1}^n p_k (1 + r_k) b_k x_k \geq S \quad \text{— критерий проверки целесообразности взятия кредита банком;}$$

$\underline{x}_k \leq x_k \leq 1, \forall k = 1, \dots, n$ — ограничение на долю выдаваемого кредита;
 $\sum_{k=1}^n (b_k x_k + L_k) \geq Q + S$ — критерий рациональности поведения операции.

3.2. Задача оптимизации кредитного портфеля банка для индивидуальных предпринимателей

Целевые функции модели:

$$f_1(x) = \frac{\beta \xi^*}{1 + \beta \xi^*} \sum_{k=1}^n p_k r_k b_k x_k \rightarrow \max \text{ — определяет прибыль банка;}$$

$$f_2(x) = \sum_{k=1}^n g_k x_k \rightarrow \min \text{ — определяет риск операций.}$$

Ограничения в модели:

$$(1 + r_k) b_k x_k \leq R_k p_k \text{ — критерий проверки целесообразности выдачи кредита;}$$

$$\underline{r}_k \leq r_k \leq \overline{r}_k, \forall k = 1, \dots, n \text{ — границы процентной ставки, определяемые банком;}$$

$$\sum_{k=1}^n p_k (1 + r_k) b_k x_k \geq (1 + i) S \text{ — проверка целесообразности взятия кредита банком;}$$

$$\underline{x}_k \leq x_k \leq 1, \forall k = 1, \dots, n \text{ — ограничение на долю выдаваемого кредита;}$$

$$\sum_{k=1}^n (b_k x_k + L_k) \geq Q + (1 - i) S \text{ — критерий рациональности поведения операции.}$$

3.3. Задача оптимизации кредитного портфеля банка для юридических лиц

Целевые функции модели:

$$f_1(x) = \frac{\beta \xi^*}{1 + \beta \xi^*} \sum_{k=1}^n p_k r_k b_k x_k \rightarrow \max \text{ — определяет прибыль банка;}$$

$$f_2(x) = \sum_{k=1}^n g_k x_k \rightarrow \min \text{ — определяет риск операций;}$$

Ограничения в модели:

$$(1 + r_k) b_k x_k \leq R_k p_k \text{ — критерий проверки целесообразности выдачи кредита;}$$

$$\underline{r}_k \leq r_k \leq \overline{r}_k, \forall k = 1, \dots, n \text{ — границы процентной ставки, определяемые банком;}$$

$$\underline{R}_k \leq R_k \leq \overline{R}_k, \forall k = 1, \dots, n \text{ — границы отдачи от проекта, определяемые банком;}$$

$$\sum_{k=1}^n p_k (1 + r_k) b_k x_k \geq (1 + i) S \text{ — проверка целесообразности взятия кредита банком;}$$

$$\underline{x}_k \leq x_k \leq 1, \forall k = 1, \dots, n \text{ — ограничение на долю выдаваемого кредита;}$$

$$\sum_{k=1}^n (b_k x_k + L_k) \geq Q + (1 - i) S \text{ — критерий рациональности поведения операции.}$$

Полученные задачи являются задачами линейного программирования, исходя из этого, для нахождения долей выдаваемых кредитов заемщикам для каждой из задач, можно воспользоваться симплекс-методом.

4. Определение оптимального момента контрольных мероприятий

После формирования оптимального портфеля необходимо определить момент в который провести контроль доходности выданных кредитов, степень достижения целей и по необхо-

димости общее состояние банка. В случае существенных отклонений осуществить корректирующую мероприятия, которые могут в частности заключаться в изменении параметров модели. Организация системы контроля должна удовлетворять двум противоречивым требованиям: с одной стороны, точек контроля должно быть достаточно много, так как при отсутствии должного контроля мы можем оказаться в ситуации, когда что-либо менять уже поздно. С другой стороны, за проведение контроля приходится платить, поэтому точек контроля должно быть как можно меньше. Контроль объекта должен быть организован таким образом, чтобы можно было вовремя вмешаться в деятельность объекта, если его состояние приближается к опасной зоне. Один из таких подходов был предложен в работе [4] и получил развитие в работе [5]. Метод основан на понятии коэффициента трудности достижения цели [6]. Суть его заключается в следующем: пусть исполнительному объекту ставится задача достичь к заданному моменту определённого значения какого-либо показателя (например, получить заданный доход или произвести требуемый объём продукции), после этого объект начинает двигаться к цели по какой-либо траектории. Если выяснится, что достижение цели оказывается невозможным, то требуется обнаружить это как можно раньше и так изменить параметры цели объекта, чтобы она стала достижимой. Задачей системы контроля будет являться оценка текущего состояния экономического объекта, объёма выполненных работ, риска невыполнения плана, а также близости состояния системы – к критической области, откуда достижение цели будет невозможно при любых допустимых затратах. Помимо этого система контроля является одновременно и отправной точкой для системы перепланирования.

Допустим, что за время T нам нужно добиться результата, количественное выражение которого есть A . При этом известно, что существует минимальная скорость производства результата во времени V_{\min} и максимальная скорость V_{\max} (рис. 1).

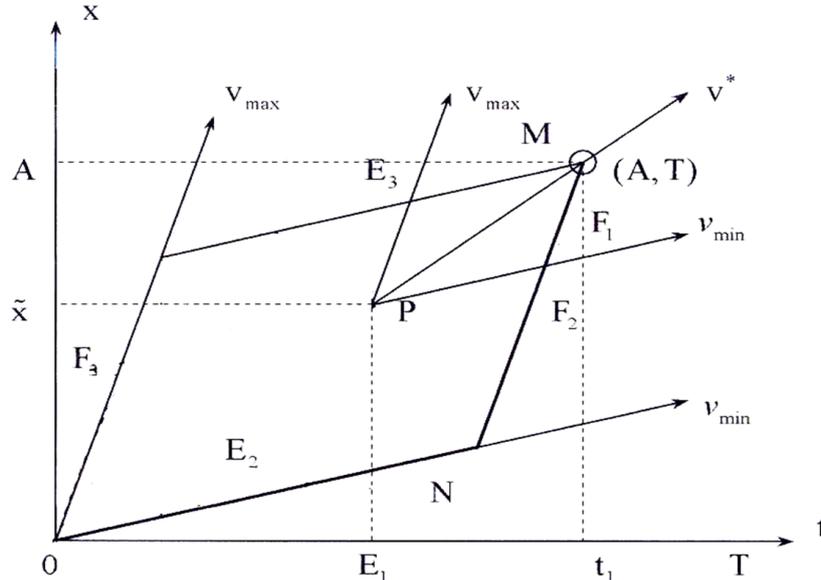


Рис. 1. Графическое представление схемы контроля

Важно найти точки контроля за состоянием объекта, выполняющего работу, которые могут быть моментами времени, когда необходимо принять решение об управляющем воздействии или пересмотре параметров цели. Если в процессе движения объект попадает в область, лежащую ниже прямой MN на рисунке, то достижение цели в заданное время станет невозможным, поэтому эта область становится запретной, и приближение к ней надо рассматривать как угрозу невыполнения задачи. Контроль объекта должен быть организован таким образом, чтобы можно было вовремя вмешаться в деятельность объекта, если его состояние приближается к опасной зоне.

Применительно к кредитному портфелю в качестве результата A может выступать прибыль банка полученная при решении выше приведенной модели. За плановое время T можно принять максимальный срок кредита из портфеля. Максимальную V_{\max} и минимальную V_{\min} скорость движения к цели целесообразно брать из предыстории функционирования объекта, а в случае её отсутствия максимальную скорость можно брать по условию отдачи кредитов всеми заемщиками строго по графику, а минимальную при условии неуплаты платежей по кредиту всеми заемщиками. Имея указанные параметры, по формуле

$$t = \frac{V_{\max} T - A}{V_{\max} - V_{\min}}$$

можем вычислить точку контроля [6], в которой целесообразно проводить оценку достижения цели и состояния банка в целом. При обнаружении критической ситуации необходимо произвести перемоделирование изменив параметры модели согласно текущей ситуации.

5. Экспериментальные расчеты

Приведем исходные данные, необходимые для расчета модели. Числа ниже даны в условных единицах. Сумма заемных средств банка $S = 60$, свободные кредитные ресурсы банка $Q = 140$, норма резервирования $\xi^* = 0.2$, коэффициент оценки рискованных видов деятельности $\beta = 1.2$ (как высокий уровень риска), ставка по которой банк покупает кредит $i = 0.03$. Далее в первых 7 столбцах табл. 1 информация по условным клиентам банка и в последних двух результаты расчета.

Таблица 1

Данные для расчетов и результаты модели физических лиц

Клиент	Проц. ставка, r_k	Отдача от проекта, R_k	Объем кредита, b_k	Мера риска, g_k	Вероятность отдачи от проекта, p_k	Нижняя граница, x_k	Результаты	
							x_k	Получаемая сумма
1	0,2	350	200	0,5	0,3	0,4	0,44	87,5
2	0,21	240	110	0,51	0,5	0,5	0,54	60
3	0,2	180	120	0,5	0,4	0,55	0,62	75
4	0,23	140	90	0,51	0,35	0,75	0,44	0
5	0,21	220	100	0,5	0,45	0,4	0,81	80
6	0,22	80	60	0,51	0,3	0,5	0,32	0
7	0,22	190	85	0,5	0,5	0,8	0,9	75

Банк, достигнув минимизации рисков и максимизации прибыли, получит сумму в 76520.

Для демонстрации расчета момента контроля допустим, что все кредиты выданы на три года, таким образом $T = 36$, единица измерения месяцы. Допустим, что $V_{\min} = 0$ — крайний случай, когда заемщики не платят по кредитам. Положим $V_{\max} = 2450$, как максимальную величину прибыли банка за месяц. Тогда точка контроля будет равна

$$t = \frac{2450 * 36 - 76520}{2450 - 0} = 4.7.$$

Таким образом, в конце 4 месяца необходимо провести контрольные мероприятия.

Заключение

В представленной работе рассмотрен процесс формирования кредитного портфеля коммерческого банка в условиях недружественной среды. Для описания этого процесса был сде-

лан анализ внешней среды в настоящее время в данных сложившихся экономических условиях. Под объектами управления в данной работе понимались активы и пассивы банка, поэтому выведены три модели оптимизации кредитного портфеля банка в условиях недружественной среды для физических лиц, юридических лиц и индивидуальных предпринимателей. Модели прошли апробацию в филиале одного из банков Воронежа. Дальнейшим развитием работы будет апробация и усовершенствование модели контроля, который по объективным причинам не может быть проведен за короткое время.

Литература

1. Банковское дело : Справ. пособие / [Бабичев М. Ю. и др.]; Под ред. Ю. А. Бабичевой. – М. : Экономика, 1994. – 396 с.
2. Курнишев В. В. Региональная экономика. Основы теории и методы исследования. – Москва : КНОРУС, 2016.
3. Баева Н. Б. «Партикулярный алгоритм сопряжения интересов управляющего коммерческого банка и его собственников» / Баева Н. Б., Куркин Е. В. // Вестник ВГУ, Серия: системный анализ и информационные технологии. – 2016. – № 4. – С. 111–118.
4. Бабунашвили М. К. Контроль и управление в организационных системах / М. К. Бабунашвили, М. А. Бермант, И. Б. Руссман // Экономика и мат. методы. – 1969. – Т. 5, № 2. – С. 212–227.
5. Баева Н. Б. Обобщение методов построения интегральных оценок качества на основе теории трудности достижения цели / Н. Б. Баева, Е. В. Куркин // Вестник ВГУ, Серия: системный анализ и информационные технологии. – 2011. – № 1. – С. 84–92.
6. Баева Н. Б. Математические методы поддержки процесса перехода региональных экономических систем в режим устойчивого развития: монография / Н. Б. Баева, Е. В. Куркин; Воронежский государственный университет. – Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2015. – 180 с.

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМ ПОДДЕРЖКИ ПЛАНИРОВАНИЯ СРОКА РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА В УСЛОВИЯХ НЕЧЕТКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РЕСУРСОВ

Ю. В. Бондаренко¹, Е. В. Васильчикова²

¹*Воронежский государственный университет*

²*Воронежский государственный технический университет*

Аннотация. Статья посвящена актуальным проблемам планирования проектов в условиях неопределенности и риска, в которых информация о производительности ресурсов может быть представлена нечетким трапецевидным числом. Для планирования времени выполнения проекта предлагается метод, основанный на рассмотрении α -срезов и последующем переходе к интервальным вычислениям критического пути. Такой подход позволил разработать логически обоснованный алгоритм количественной оценки риска превышения директивных сроков проекта. Для практической реализации алгоритма разработан программный продукт, позволяющий сократить время на принятие решений по планированию и оценке целесообразности реализации проекта.

Ключевые слова: проект, планирование, Fuzzy-число, нечеткое множество, α -срез, интервальные числа, критический путь, директивные сроки, оценка риска.

Введение

Одним из перспективных направлений современного управления различными социально-экономическими системами (от отдельного подразделения предприятия до государственного уровня) является проектный подход. Проектный подход предполагает не только отбор перспективных и значимых проектов, но и грамотное управление их планированием и последующей реализацией. Поскольку проекты, как правило, затрагивают достаточно большое количество последовательно и параллельно выполняемых работ, которые должны быть завершены к определенному времени и с минимальной стоимостью, эффективные механизмы поддержки управления должны базироваться на обоснованных математических расчетах [1–3].

В настоящее время можно отметить достаточно широкий круг научных исследований, посвященных вопросам управления проектами [2–7]. Спектр решаемых в работах задач достаточно разнообразен — планирование и оптимизация, контроль и управление командой проекта, распределение ресурсов, согласование интересов стейкхолдеров при реализации проекта, расчет финансовых характеристик, календарное планирование и т. д. Такое многообразие вызвано различными внешними условиями, спецификой конкретного проекта, ограничениями его реализации и финансирования, а также типом информации, на основе которой осуществляется планирование проекта.

В настоящее время существенно возросло количество таких проектов, в которых невозможно априори получить информацию о точной продолжительности каждой работы или производительности ресурсов. В числе таких проектов — ИТ-проекты, исследовательские проекты, инновационные проекты и т. д. В подобных случаях модели и алгоритмы поддержки их планирования основываются на интеллектуальных методах обработки нечеткой информации. В силу этого, развитие математических моделей, методов и алгоритмов поддержки планирования проектов на основе нечеткой информации, является актуальной задачей.

Целью настоящего исследования является разработка методов и алгоритмов, позволяющих осуществить математическую и программную поддержку на этапе планирования проекта — определить время выполнения проекта и рассчитать оценку риска превышения директивно-

го срока для случая, когда производительности ресурсов заданы трапецевидными нечеткими числами. Представленный в исследовании подход позволит лицу, принимающему решения, сделать выводы о целесообразности реализации проекта и сроках заключения контрактов.

1. Постановка задачи

Рассмотрим проект, включающий в своем составе N видов работ. Предположим, что для каждой работы определены те работы, на которые она непосредственно опирается. Таким образом, может быть построен сетевой график проекта «вершина-работа» или «вершина-событие» с правильной нумерацией вершин [7].

Для каждой работы с индексом i считается заданным ее объем W_i и количество ресурсов S_i , которые могут быть выделены проектным менеджером (лицом, принимающим решения, ЛПР) для ее выполнения.

Для определения времени выполнения каждой работы, проектному менеджеру необходимо получить от экспертов количественную информацию о производительности ресурсов. Предположим, что эксперты не могут предоставить точную информацию, но для каждой работы i могут определить:

- v_{i1} — наиболее пессимистичное значение производительности задействованных ресурсов;
- $[v_{i2}, v_{i3}]$ — интервал наиболее вероятного значения производительности;
- v_{i4} — наиболее оптимистичное значение производительности задействованных ресурсов.

При этом очевидно выполнение следующих неравенств:

$$0 < v_{i1} < v_{i2} \leq v_{i3} < v_{i4}.$$

Таким образом, скорость выполнения каждой работы (производительность ресурсов) может быть описана в виде трапецевидного нечеткого числа $\tilde{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, v_{i4})$, функция принадлежности которого изображена на рис. 1.

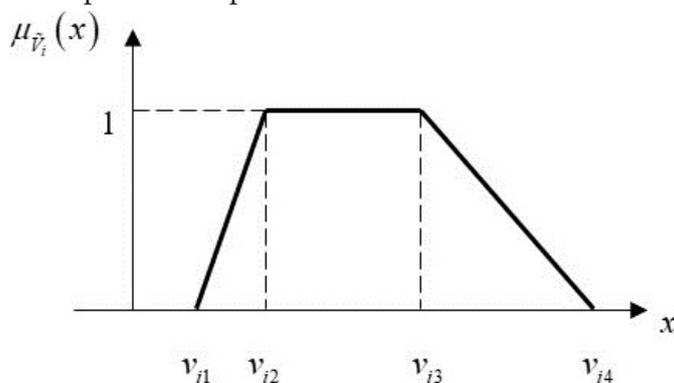


Рис. 1. Нечеткое число «Производительность работы i »

Аналитически функция принадлежности трапецевидного нечеткого числа (Fuzzy-числа, представленного трапецевидными LR-интервалами) определяется по следующей формуле:

$$\mu_{\tilde{V}_i}(x) = \begin{cases} (x - v_{i1}) / (v_{i2} - v_{i1}), & \text{если } v_{i1} \leq x \leq v_{i2}, \\ 1, & \text{если } v_{i2} \leq x \leq v_{i3}, \\ (x - v_{i4}) / (v_{i3} - v_{i4}), & \text{если } v_{i3} \leq x \leq v_{i4}, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Нечеткое представление производительности ресурсов влечет нечеткое представление времени выполнения каждой работы \tilde{T}_i в виде трапецевидного нечеткого числа, рассчитываемого по следующей формуле:

$$\tilde{T}_i = [a_1(T_i), m_1(T_i), m_2(T_i), a_2(T_i)] = \left[\frac{W_i}{S_i \cdot v_{i4}}, \frac{W_i}{S_i \cdot v_{i3}}, \frac{W_i}{S_i \cdot v_{i2}}, \frac{W_i}{S_i \cdot v_{i1}} \right], i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

Требуется, на основе имеющейся информации, определить планируемый срок завершения проекта и оценить риск превышения директивного срока T_{dir} .

Перейдем к решению поставленной задачи.

2. Методы и алгоритм решения

Планируемое время выполнения проекта совпадает с длиной критического пути, построенного по сетевому графику. Естественно, что длина критического пути \tilde{T}_{cr} для проекта с нечетким временем выполнения каждой работы также будет являться Fuzzy-числом.

Для расчета длины критического пути проекта воспользуемся методом α -срезов [8]. Данный метод позволяет, задав определенное число α -срезов времени выполнения каждой работы, построить α -срезы для нечеткой длины критического пути проекта и на их основе — функцию принадлежности.

Предположим, что лицом, принимающим решение, определено α -срезов, равное K . Тогда при условии, что значения α -срезов равномерно покрывают отрезок $[0, 1]$, получаем формулу для расчета значений параметра α :

$$\alpha_k = \frac{k}{K}, \text{ где } k = 0, \dots, K. \quad (2)$$

Рассмотрим некоторое значение $\alpha \in \{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_K\}$. Тогда для каждой работы i α -срез представляет собой множество:

$$\tilde{T}_i^\alpha = \{x \in U \mid \mu_{\tilde{T}_i}(x) \geq \alpha\} = [T_{iL}^\alpha, T_{iR}^\alpha], \quad i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

где $T_{iL}^\alpha = a_1(T_i) + (m_1(T_i) - a_1(T_i)) \cdot \alpha$, $T_{iR}^\alpha = a_2(T_i) - (a_2(T_i) - m_2(T_i)) \cdot \alpha$.

Переход к α -срезам означает переход от нечетких к интервальным вычислениям с интервальными значениями времени выполнения каждой работы (3).

Для работы возможно рассчитать нечеткие ранние сроки ее начала \tilde{E}_j ($j = 1, \dots, N$) по формулам, представляющим собой нечеткие расширения формул сетевого анализа проектов методом критического пути (СРМ) [8, 9]:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_1 &= [0, 0, 0, 0], \\ \tilde{E}_j &= \max_{i \in \text{Pred}(j)} \{\tilde{E}_i \oplus \tilde{T}\}, \quad j = 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\text{Pred}(j)$ — множество работ, непосредственно предшествующих работе j , 1 — номер начальной работы, не имеющей предшественников.

В формуле (4) используются операции сложения и взятия максимального с нечеткими числами, которые в общем случае для двух нечетким чисел $\tilde{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4]$ и $\tilde{Y} = [y_1, y_2, y_3, y_4]$ определяются следующим образом:

- $\tilde{X} \oplus \tilde{Y} = [x_1 + y_1, x_2 + y_2, x_3 + y_3, x_4 + y_4]$,
- $\max\{\tilde{X}, \tilde{Y}\} = [\max\{x_1, y_1\}, \max\{x_2, y_2\}, \max\{x_3, y_3\}, \max\{x_4, y_4\}]$.

Для интервальных чисел α -среза \tilde{E}_j^α ($j = 1, \dots, N$) интервальные ранние сроки начала работ рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_1^\alpha &= [E_{1L}^\alpha, E_{1R}^\alpha] = [0, 0], \\ \tilde{E}_j^\alpha &= [E_{jL}^\alpha, E_{jR}^\alpha] = \left[\max_{i \in \text{Pred}(j)} (E_{iL}^\alpha + T_{iL}^\alpha), \max_{i \in \text{Pred}(j)} (E_{iR}^\alpha + T_{iR}^\alpha) \right], \quad j = 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (5)$$

Для расчета интервальной величины времени окончания проекта для α -среза \tilde{T}_{cr}^α (интервальной величины критического пути) необходимо к интервальному раннему сроку работы, не имеющей потомков (полагаем, что это работа n), прибавить интервальное время ее выполнения:

$$\tilde{T}_{cr}^\alpha = [T_{crL}^\alpha, T_{crR}^\alpha] = \left[(E_{nL}^\alpha + T_{nL}^\alpha), (E_{nR}^\alpha + T_{nR}^\alpha) \right]. \quad (6)$$

На основе расчета интервального критического пути (6) для каждого значения α_k , определяемого формулой (2), возможно построить профиль α -срезов нечеткого критического пути \tilde{T}_{cr} , представленный на рис. 2.

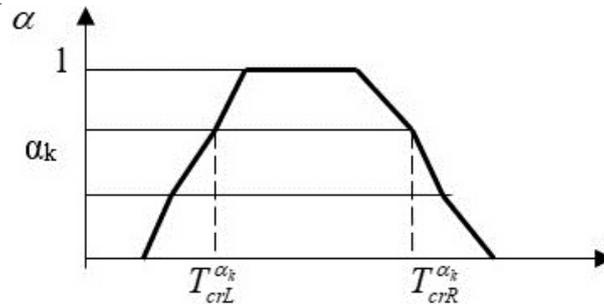


Рис. 2. Профиль α -срезов нечеткого критического пути

Нечеткий критический путь позволяет лицу, принимающему решение, оценить планируемое время реализации проекта. Вместе с тем, для проекта может быть априори определен директивный срок T^* . В этом случае важнейшей задачей является оценка риска превышения директивных сроков в условиях нечеткой информации, от которой зависит принятие или непринятие проекта к его реализации. Рассмотрим подход к формированию такой оценки, основанный на построении α -срезов.

Рассмотрим необходимые понятия.

Под K -оценкой риска превышения директивных сроков проекта $\lambda_K(T^*)$ будем понимать количественный показатель, рассчитываемый по следующей формуле:

$$\lambda_K(T^*) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^K \alpha_k \cdot \lambda_k(T^*), \quad (7)$$

где $\lambda_k(T^*)$ — оценка риска превышения директивных сроков для среза α_k .

Показатель $\lambda_k(T^*)$ предлагается рассчитывать по следующей формуле:

$$\lambda_k(T^*) = \begin{cases} 1, & \text{если } T^* \leq T_{crL}^{\alpha_k}, \\ 0, & \text{если } T^* \geq T_{crR}^{\alpha_k}, \\ \frac{T_{crR}^{\alpha_k} - T^*}{T_{crR}^{\alpha_k} - T_{crL}^{\alpha_k}}, & \text{если } T_{crL}^{\alpha_k} < T^* < T_{crR}^{\alpha_k}. \end{cases} \quad (8)$$

Для вычисления оценки риска превышения директивного срока проекта $\lambda(T^*)$ предлагается итерационный алгоритм, состоящий из следующей последовательности шагов:

Шаг 1. Полагаем $K = K_0$ — начальное количество α -срезов, задаем $\varepsilon > 0$ — критерий останова.

Шаг 2. По формулам (6)–(8) рассчитывается $\lambda_K(T^*)$,

Шаг 3. По формулам (6)–(8) рассчитывается $\lambda_{2K}(T^*)$.

Шаг 4. Если $|\lambda_K(T^*) - \lambda_{2K}(T^*)| < \varepsilon$, то останов, полагаем $\lambda(T^*) = \lambda_{2K}(T^*)$. Иначе — полагаем $K = 2K$, переход к Шагу 3.

В докладе предполагается обосновать сходимость предлагаемого алгоритма. Перейдем к вопросу его программной реализации.

3. Программная реализация

Для практической реализации описанного подхода разработан программный продукт, написанный на языке C#.

В качестве примера, демонстрирующего работу программы и представленный подход, рассмотрим IT-проект, данные о работах которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Описание работ проекта

№	Работа	Начальное событие	Конечное событие
A	Сбор и анализ требований	1	2
B	Написание и согласование технического задания	2	3
C	Разработка архитектуры приложения	3	4
D	Формирование макета приложения	3	5
E	Постановка задач back-end	4	5
F	Постановка задач front-end	4	6
G	Разработка БД	4	7
H	Разработка back-end	5	7
I	Разработка front-end	6	7
J	Тестирование	7	8
K	Оформление документации приложения	8	9

Сетевой график проекта «вершина-событие» представлен на рис. 3.

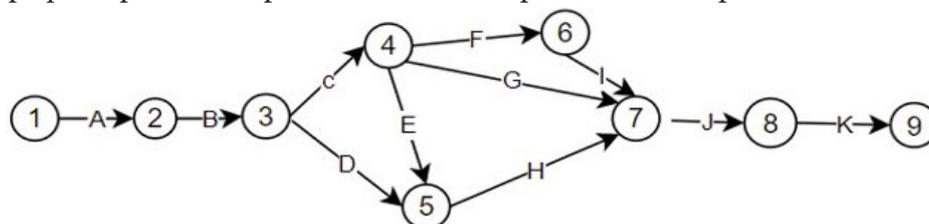


Рис. 3. Сетевой график проекта

На рис. 4. Показана форма ввода информации об объеме каждой работы и параметров нечеткого числа производительности ресурсов, начальное количество α -срезов.

Построенная на основе α -срезов нечеткая длина критического пути проекта, а также результаты алгоритмы построения оценки риска превышения директивных сроков проекта приведены в окне вывода результатов на рис. 5.

В результате получаем, что с оценка риска превышения директивного срока проекта (48 дней) составляет 0,13 (13 %). Полученное значение больше, чем допустимая для менеджера оценка риска (10 %) поэтому делается вывод, о том, что данный проект может быть рекомендовано отклонить.

Заключение

В настоящем исследовании рассмотрен подход к сетевому анализу проектов с нечеткой информации о производительности ресурсов, и следовательно, времени выполнения работ. Предлагаемый подход к построению функции принадлежности нечеткого критического пути

Введите продолжительность работ

Заполните таблицу работ Fuzzy-числами, полученными в ходе работы экспертов, где: [vn1, vn2, vn3, vn4] - скорость выполнения работы, представленная нечетким трапецевидным числом

	№ Работы	Объем работы	vn1	vn2	vn3	vn4	Кол-во ресурсов
	1	12	3	4	6	12	2
▶	2	12	1	2	3	4	2
	3	20	2	3	4	10	2
	4	200	14	16	20	30	2
	5	100	6	7	10	16	2
	6	100	6	7	10	12	2
	7	80	11	13	16	26	2
	8	100	8	11	13	20	1
	9	40	3	4	6	6	2
	10	100	2	4	6	8	2
	11	10	1	3	4	5	2
*							

Количество альфа-срезов:

Допустимая вероятность того, что время завершения проекта больше, чем установленное время:

Допустимая погрешность:

Планируемое время завершения проекта:

Вычислить вероятность неудачи планирования проекта и время завершения всех работ

Рис. 4. Окно ввода информации

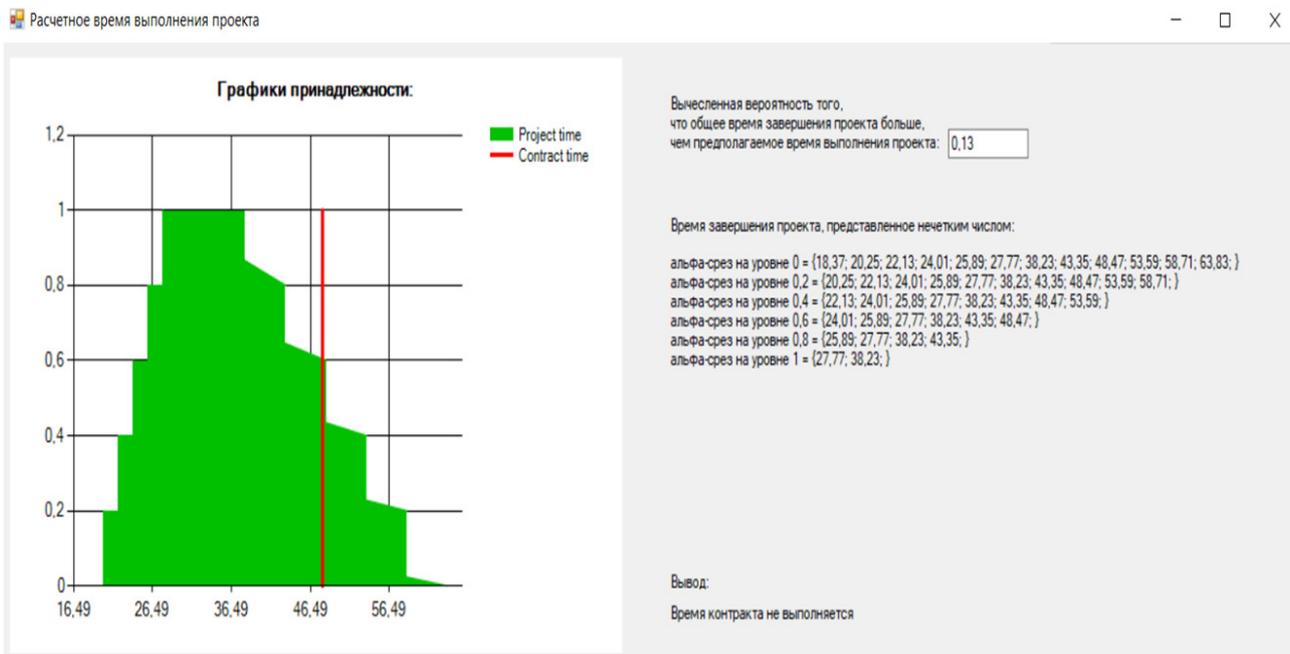


Рис. 5. Окно вывода результатов

основан на рассмотрении α -срезов нечетких трапецевидных чисел — времени выполнения каждой работы. Такой подход позволяет предложить логически обоснованный итерационный алгоритм оценки риска превышения директивного срока выполнения проекта. Для практической реализации подхода написана программа, позволяющая в удобной для пользователя форме ввести необходимую информацию и получить рекомендации для дальнейшего принятия проекта на основе значения оценки риска и ее отклонения от приемлемой для лица, принимающего решения. Проведенные расчеты на данных проектов ИТ-компании г. Воронежа показали, что предлагаемый подход может быть успешно применен на этапе планирования ИТ-проектов в условиях неопределенности и риска. Обсуждения результатов с проектными менеджерами наметили пути его дальнейшего развития.

Литература

1. *Аверина Т. А.* Азбука управления проектами / Т. А. Аверина, С. А. Баркалов, Е. В. Баутина [и др]. – Старый Оскол : ТНТ, 2018. – 328 с.
2. *Баркалов С. А.* Умное управление проектами / С. А. Баркалов, В. Н. Бурков, Я. Д. Гельруд [и др]. – Челябинск : Издательский Центр ЮУрГУ, 2019. – 189 с.
3. *Бурков В. Н.* Как управлять проектами / В. Н. Бурков, Д. А. Новиков. – Москва : ИПУ РАН, 1997. – 188 с.
4. *Каппелс Т. М.* Финансово-ориентированное управление проектами / Т. М. Каппелс – Москва : ЗАО «Олимп – Бизнес», 2008. – 400 с.
5. *Бондаренко О. В.* Математическая и программная поддержка формирования календарного плана проектов с учетом вспомогательных ресурсов / О.В. Бондаренко, Ю.В. Бондаренко // Сб. тр. Международной конференции Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 13–15 декабря 2021 г. – Воронеж : Издательство «Научно-исследовательские публикации», 2022 – С. 1732–1738.
6. *Ketankumar R. R.* Multi Objective Multi Mode Project Management Problem in Triangular Fuzzy Environment / R. R. Ketankumar, J. M. Dhodiya // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 1772–1780.
7. *Кремер Н. Ш.* Исследование операций в экономике / Н. Ш. Кремер, Б. А. Путко, И. М. Тришин, М. Н. Фридман. – Москва : ЮНИТИ, 2004. – 407 с.
8. *Зак Ю. В.* Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных / Ю. В. Зак. – Москва : ЛЕНАНД, 2016. – 352 с.
9. *Борисов А. Н.* Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А. Н. Борисов, А. В. Алексеев, Г. В. Меркурьев [и др]. – Москва : Радио и связь, 1989. – 304 с.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ПРИ ВЫБОРЕ КРИТЕРИЕВ НА ЭТАПЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМЕ

Н. Ю. Борзых, Т. Е. Смоленцева

Российский технологический университет – МИРЭА

Аннотация. В работе рассмотрены возможные варианты выбора приоритетных направлений на этапе формирования требований к системе с проведением сравнительного анализа. Проанализированы методы для определения важности того или иного критерия, каждый из которых имеет свои сильные и слабые стороны. В связи с тем, что на текущий момент не существует единого подхода для определения группы критериев однозначно удовлетворяющим всем заданным параметрам, необходимо проанализировать возможные способы формирования групп параметров и выбора метода для оценивания получаемых результатов.

Ключевые слова: КИС, критерии выбора, ранжирование, метод парных сравнений, шкала Лайкерта, шкала Гуттмана, факторный анализ.

Под КИС принято понимать Корпоративную Информационную Систему, представляющую собой комплекс программ или программную систему, обеспечивающую основные бизнес-процессы в компании [1]. Процесс ее внедрения на предприятии является достаточно трудоемким, конечный результат которого далеко не всегда предсказуем. В следствии этого обычно существуют различные варианты предлагаемых решений, которые можно подобрать в зависимости от текущей ситуации. Выбор же целесообразно осуществлять на основе критериев, набор которых заказчик определяет исходя из конкретной ситуации.

В приоритете это либо время или же качество и, конечно стоимость проектирования и разработки КИС. Таким образом к основным видам можно отнести следующие:

- Методологии разработки;
- Стоимость;
- Качество;
- Скорость внедрения;
- Скорость разработки;
- Возможность доработки;
- Техническая поддержка;
- Масштаб решения.

Под масштабом решения подразумевается, насколько каждое решение охватывает сферу деятельности компании. Является ли оно узконаправленным или затрагивает большинство бизнес-процессов организации. Техническая поддержка — будет ли она осуществляться внутренними силами или вендором и возможно ли она вообще. Это же касается и возможности доработки решения с помощью патчей и надстраиваемых модулей.

Критерии в свою очередь являются взаимосвязанными, поэтому проблема выбора стратегии является весьма актуальной на сегодняшний день. Сложность их сравнения и последующее определение требуемых критериев в первую очередь зависит от выбранного подхода. На рис. 1 демонстрируется зависимость выбранных критериев друг от друга. Каждый из них влияет на все последующие.

Необходимо учитывать, что критерии могут варьироваться в зависимости от ситуации и событий. Когда же сформирована группа критериев, по которым далее осуществляется выбор, требуется указать их важность, вес, благодаря которому осуществляется ранжирование.

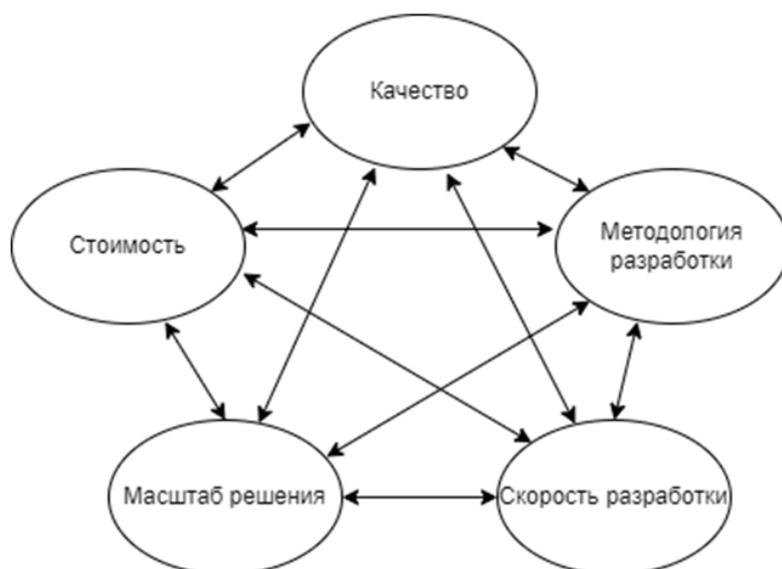


Рис. 1. Взаимосвязь критериев

Получив некое «среднее значение», то есть вычислив весовые коэффициенты, появляется возможность интерпретации полученных результатов.

Для проведения сравнительного анализа допустимо использование следующих методов:

- Шкала ранжирования;
- Метод парных сравнений;
- Факторный анализ;
- Шкала Лайкерта;
- Шкала Гутмана.

Каждый из перечисленных методов обладает как достоинствами, так и недостатками.

Ранжирование — расположение собранных данных в определенном порядке (по убыванию или нарастанию показателей), для определения местонахождения этого набора изучаемых объектов. Шкалы ранжирования отличаются тем, что с их помощью результаты измерений анализируются по правилам, применимым для ранговых шкал. Ранжирование довольно простой и удобный способ оценки. В свою очередь результаты можно использовать для того, чтобы принять решение о выборе подходящего действия. Однако, поскольку этот метод является приблизительным, оценки, сделанные с его помощью, не рекомендуются для принятия важных решений без подтверждения другими методами. Более сложным вариантом измерения с использованием ранговой шкалы является метод парных сравнений.

Метод парных сравнений — это метод построения оценочной шкалы, путем попарного сравнения всех изучаемых объектов. Идея этого метода заключается в попарном сравнении двух объектов и определении доминирования одного из них, отсюда и название — «попарное (или парное) сравнение». Для обработки полученных данных составляется ассиметричная матрица (табл. 1). Кроме того, асимметрия указывает на приверженность ходу мыслей респондента и реальности данных. Этот метод часто «сковывает» исследователя, поскольку респондент не может выбрать лучшую из предложенных пар и затрудняется ответить, что приводит к недостатку информации или ее отбраковыванию [2].

Шкала Лайкерта — это 5-разрядная шкала отношений, при применении которой респонденты должны определить степень согласия или несогласия для каждого набора утверждений о рассматриваемых объектах. Для проведения анализа каждому утверждению присваивается количество баллов от 1 до 5. Суммирование числовых показателей дает среднюю степень согласия с приведенным выше утверждением и строит статистическое распределение. Анализи-

Таблица 1

Матрица парных сравнений одного эксперта

Объект	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	Σ
A ₁	–	1	1	0	2
A ₂	0	–	0	0	0
A ₃	0	1	–	0	1
A ₄	1	1	1	–	3

руются баллы по отдельным пунктам или для каждого респондента рассчитывается окончательный балл путем суммирования баллов по отдельным пунктам.

Шкалу Лайкерта легко составлять и использовать, так как респонденты быстро понимают принцип ее заполнения. Основной недостаток данной шкалы — большое количество времени, требуемое для ее заполнения, по сравнению с другими детализированными шкалами.

Таблица 2

Шкала Лайкерта

Униполярная шкала	1	2	3	4	5
Биполярная шкала	–2	–1	0	+1	+2

При использовании Шкалы Гуттмана значение латентной переменной рассчитывается как сумма положительных ответов, данных респондентом. Рассматриваемые дихотомические признаки можно упорядочить и представить в виде диагональной матрицы. Ее особенность в том, что каждая оценка автоматически включает все последующие оценки и исключает предыдущие. Шкалы подобного типа называются кумулятивными.

Таблица 3

Шкала Гуттмана

Номер специалиста	Критерии			
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
1	+	+	–	+
2	+	–	–	+
3	–	+	–	+
Сумма	2	2	0	3

Факторный анализ — это процедура, с помощью которой большое число переменных, относящихся к имеющимся наблюдениям, сводят к меньшему количеству независимых влияющих величин, называемых факторами. Основная идея факторного анализа заключается в следующем — каждый наблюдаемый признак можно представить в виде линейной комбинации нормально распределенных факторов. Факторный анализ применяют при исследовании сложных объектов и систем, когда нет возможности непосредственно измерить величины, определяющие свойства этих объектов [3, 4].

Проблемами факторного анализа являются:

- Первая проблема факторного анализа — количество факторов. Количество факторов, необходимых и достаточных для аналитической процедуры, заранее неизвестно, поэтому исследователи должны определить и оценить это количество.

- Оценка значений факторов является следующей проблемой факторного анализа. Значения факторов можно оценить с помощью линейных комбинаций исходных переменных. Суть

проблемы в том, что невозможно точно выразить общие факторы через исходные переменные, что приводит к разной надежности оценок [5].

В табл. 4 приведена сводная информация по рассмотренным методам, в каких областях и с какой целью они применяются.

Таблица 4

Применимость представленных методов

Метод ранжирование	Применяется при взаимодействии субъектов друг с другом, путем их формализации с помощью математического, статистического, графического инструментария.
Метод парных сравнений	Используется в научном исследовании отношений, социального выбора, инженерии требований
Шкала Лайкерта	Используется в опросниках и анкетных исследованиях
Шкалы Гуттмана	Используется для измерения социальных установок людей по поводу перехода на новую систему
Факторный анализ	Используется с наборами данных, в которых имеется большое количество наблюдаемых переменных для снижения размерности данных

У каждого метода есть свои преимущества и недостатки. Их можно использовать в различных ситуациях и желательно в перекрёстном формате — проверяя результаты одного метода другим.

Заключение

Были проанализированы различные методы, помогающие в оценивании выбранных критериев на этапе формирования требований к проектируемой системе, их важности и веса. Представленные методы дают возможность четкого обоснования корректности принятого решения по проектированию КИС, на основе сформированных критериев. Однако в настоящее время не существует единого и однозначного подхода для определения критериев и выбора методов их обработки на стадии предпроектного анализа проектируемых систем.

Литература

1. Попова В. М. Бизнес-планирование. Учебник для вузов / В. М. Попова, С. И. Ляпунова, С. Г. Млодика. – М. : Финансы и статистика, 2012.
2. Мельковская Е. А. Методом парных сравнений методы определения весовых коэффициентов компетенций / Е. А. Мельковская, К. Ю. Паньков // Вестник военного образования. – 2018. – №. 2 (11). – С. 83–86.
3. Двоерядкина Н. Н. Факторный анализ при исследовании структуры данных / Н. Н. Двоерядкина, Н. А. Чалкина // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2011. – №. 53. – С. 11–15.
4. Равен Джон. В чем ошибочность применения факторного анализа тестов, соответствующих теории ответов на тестовые задания (IRT)? / Равен Джон, Фугард Энди // Азимут научных исследований: педагогика и психология. 2020. – № 4 (33). – С. 391–395.
5. Нестюркина М. В. Ранжирование многопараметрических объектов / М. В. Нестюркина, А. Г. Пятиренко // Проблемы современной науки и образования. – 2016. – № 18 (60). – С. 14–16.

МОДЕЛИ ГРУППОВОГО ВЫБОРА НА ОСНОВЕ МОДИФИКАЦИЙ ПРОЦЕДУРЫ ТЕРСТОУНА — МОСТЕЛЛЕРА

Ю. В. Бугаев, И. Ю. Шурупова

*Военный учебно-научный центр ВВС «Военно-воздушная академия
им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»*

Аннотация. Рассматривается подход к решению проблемы коллективного выбора на необозримом для ЛПР множестве альтернатив, основанный на идее экстраполяции экспертных оценок (ЭЭО). В качестве базового варианта построения процедуры группового выбора на множестве недоминируемых альтернатив предлагается модель Терстоуна парных сравнений. Предлагаются шесть модификаций процедуры, адаптированных к ЭЭО, отличающихся видом минимизируемого функционала и условиями проведения экспертиз. Также предлагается способ усовершенствования метода вероятностного анализа процедур коллективного выбора.

Ключевые слова: метод экстраполяции экспертных оценок, методы коллективного выбора, парные сравнения, полезности альтернатив, модель Терстоуна — Мостеллера, взвешенный МНК, нелинейный МНК, метод максимального правдоподобия, нестрогие предпочтения, транзитивность предпочтений, метод вероятностного анализа.

Введение

При решении задачи выбора на множестве недоминируемых альтернатив количество рассматриваемых вариантов может быть достаточно большим для того, чтобы ЛПР смог непосредственно к этому набору применить какой-либо механизм выбора оптимального варианта. В настоящее время в принятии важных решений, как правило, принимает участие целый коллектив. Поэтому актуальна проблема разработки методов коллективного выбора на необозримом для ЛПР множестве альтернатив.

Одним из возможных подходов является группа методов, основанных на идее экстраполяции экспертных оценок (ЭЭО) [1]. Результатом данной процедуры является идентификация системы коллективных экспертных предпочтений на основе ограниченной обучающей выборки альтернативных решений с последующим распространением выявленных предпочтений на всю исходную совокупность альтернатив. Идентификация состоит в определении неизвестных коэффициентов функции глобального критерия (функции ценности), при которых структура экспертных предпочтений или полностью сохраняется, или претерпевает минимальные изменения.

Достоинство метода в том, что эксперту или ЛПР предъявляются только реально существующие альтернативы. Благодаря этому, во-первых, появляются определенные гарантии адекватности идентифицированной ФП (поскольку экспертиза проходит в соответствующей области), во-вторых, в сознании эксперта или ЛПР создается целостный образ альтернативы, позволяющий объективно провести сравнение.

Построение системы предпочтений удобно осуществлять посредством парных сравнений альтернатив выборки. Метод парных сравнений имеет преимущество перед другими методами упорядочения в случаях, когда объектов много и (или) они трудно различимы. Наиболее популярен вариант, предложенный Л. Терстоуном [2] ещё в 1927 году. В данной работе предлагается несколько модификаций метода, направленных на его усовершенствование, а также излагается подход, позволяющий сравнить эти варианты и выбрать лучший.

1. Процедура Терстоуна и её модификации

Традиционная процедура Терстоуна — Мостеллера — Ноезе основана на частном случае линейной модели парных сравнений. В рамках этой модели каждому r -му эксперту $r = \overline{1, N}$ предъявляются пары альтернатив (A_i, A_j) из всего исходного множества, состоящего из m вариантов ($1 \leq i < j \leq m$), и он для каждой пары должен определить лучшую, по его мнению, альтернативу: либо $A_i \succ A_j$, либо $A_j \succ A_i$. Предполагается, что каждая альтернатива A_i обладает «истинной полезностью» V_i , а эксперт способен дать лишь некоторую ее оценку y_i , которая, вообще говоря, отличается от V_i и принимается за случайную величину. Таким образом, A_i превосходит A_j ($A_i \succ A_j$) в том случае, если $y_i > y_j$. Это означает, что существует вероятность предпочтения $P(A_i \succ A_j) = \pi_{ij} = P(y_i - y_j > 0)$. Набор π_{ij} удовлетворяет линейной модели, если существует набор действительных чисел V_i , таких, что $\pi_{ij} = \Phi(V_i - V_j)$, где $\Phi(x)$ — симметричная относительно нуля функция распределения непрерывной случайной величины. В модели Терстоуна $\Phi(x)$ — функция нормального распределения. Экспертная оценка полезности i -й альтернативы равна сумме двух компонент $y_i = V_i + \varepsilon_i$, где V_i , ε_i — неслучайная и случайная величины, соответственно, и имеет нормальное распределение с параметрами (V_i, σ^2) .

Метод поиска статистических оценок «истинных полезностей» V_i ($i = \overline{1, m}$), предложенный Ноезе [3], основан на допущении, что $\sum V_i = 0$ и состоит в следующем.

1) Определяются экспериментальные вероятности парных предпочтений по следующей формуле:

$$p_{ij} = \alpha_{ij} / N,$$

где α_{ij} — число случаев, когда эксперт предпочел $A_i \succ A_j$, ($i, j = \overline{1, m}, i \neq j$).

2) Значения вероятностей $p_{ij} = 0$ и $p_{ij} = 1$ заменяются на $p_{ij} = 1/(2N)$ и $p_{ij} = 1 - 1/(2N)$ соответственно, и вычисляются

$$d_{ij} = \Phi^{-1}(p_{ij}),$$

где $\Phi^{-1}(p_{ij})$ — функция, обратная функции нормального распределения;

3) Согласно методу (невзвешенных) наименьших квадратов производится минимизация по V_i величины

$$S = \sum_{i \neq j}^m [d_{ij} - (V_i - V_j)]^2 \quad (1)$$

при условии

$$\sum_{i=1}^m V_i = 0. \quad (2)$$

Ноезе показал, что минимум (1) при условии (2) достигается при

$$V_i = \frac{1}{m} \sum_{i \neq j}^m d_{ij}. \quad (3)$$

Главное достоинство модели Терстоуна, на наш взгляд, состоит в возможности получения численных оценок полезностей сравниваемых альтернатив, что помимо упорядочения набора позволяет применять найденные оценки в ЭЭО.

Рассмотрим теперь возможные модификации описанной процедуры.

1.1. Параметризация

Параметризация оценок полезности альтернатив с целью использования модели Терстоуна в МЭЭО должна основываться на допущении, что их значения V_i равны соответствующим значениям функции ценности, т. е. $V_i = F(x^i)$. При линейной зависимости F от параметров b_j вектор истинных ценностей объектов выбора можно определить как

$$V = Zb, \quad (4)$$

где Z — структурная ($m \times k$) матрица, каждая строка которой представляет собой значения базисных функций в точке x^i , т. е.

$$Z_{ij} = f_j(x^i), \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, k},$$

$x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_s^i)^T$ — векторная оценка альтернативы A_i по s критериям качества. В этом случае вместо непосредственного поиска оценок для V_i при минимизации (1) ищутся оценки b_j .

Чтобы при этом соблюдалось условие (2), будем использовать матрицу Z специального вида, а именно, потребуем, чтобы в ней сумма элементов каждого столбца равнялась нулю. Справедливо следующее утверждение.

Теорема. Пусть V — вектор оценок полезностей, удовлетворяющий условию (2), и Z — произвольная матрица размера $m \times k$ ранга k , сумма элементов каждого столбца которой равна 0. Тогда отображение (4) взаимно-однозначно.

Доказательство. Прежде всего, покажем, что вектор V , полученный по формуле (4), удовлетворяет условию (2). Обозначим $e = (1, 1, \dots, 1)^T$ — вектор, содержащий m единиц. Тогда $\sum V = e^T V = e^T Z b$. Так как сумма элементов столбцов матрицы Z равна 0, то $e^T Z = (0, 0, \dots, 0)$, а, следовательно, $e^T Z b = e^T V = 0$ при любом b .

Предположим, что для некоторого V существуют два различных вектора b^1 и b^2 , удовлетворяющих равенству (4). Тогда

$$\vec{0} = Z(b^1 - b^2) = Zx. \quad (5)$$

Так как ранг Z равен k , т. е. числу неизвестных, то по известной теореме алгебры нулевой вектор является единственным решением системы однородных уравнений (5). Значит $x = b^1 - b^2 = 0$, т. е. $b^1 = b^2$.

Так как ранг Z равен числу её столбцов k , то матрица $Z^T Z$ имеет обратную, а матрица $A = (Z^T Z)^{-1} Z^T$ удовлетворяет условию $AZ = I$. Отсюда равенство

$$b = (Z^T Z)^{-1} Z^T V \quad (6)$$

определяет однозначное преобразование, обратное (4), и отображение (4) взаимно-однозначно, что и требовалось доказать.

Следствие. Для поиска оценки вектора коэффициентов b с помощью процедуры Терстоуна — Мостеллера — Ноезе можно использовать формулу (6), где вектор V вычисляется по формуле (3). Столбцы матрицы Z должны быть центрированы (иметь нулевую сумму).

1.2. Нелинейный МНК и минимум суммы модулей

Описанная вычислительная процедура, предложенная Дж. Ноезе [3], основана на линейризации каждой разности в выражении

$$Q = \sum_{i,j=1, i \neq j}^m [p_{ij} - \Phi(V_i - V_j)]^2 \quad (7)$$

и приведении нелинейной целевой функции (7) к виду (1). Как известно [4], подобный подход приводит к значительной потере точности. Однако не стоит забывать, что статья с описанием метода увидела свет в 1960 году во времена сильной ограниченности вычислительных средств. Так что предложенный способ оптимизации был вынужденной мерой. Очевидно, более точный результат можно получить, если, если использовать в качестве способа оптимизации метод непосредственной минимизации суммы (6) — нелинейный МНК.

При минимизации можно использовать встроенные функции математических пакетов MathCAD, Matlab и др. Но, как показывают численные эксперименты, даже при использовании современных математических пакетов не всегда удаётся найти минимум функции (6) вви-

ду её плохой обусловленности при наличии эмпирических вероятностей $p_{ij} = 1$ (или 0). Расчёты показывают, что вероятность найти решение увеличивается при хорошем начальном приближении. Для его поиска предлагается воспользоваться схемой с поправочными весами, описанной в [4].

Допустим, что уравнение, связывающее вход и выход исследуемого объекта, нелинейно по параметрам, т. е. имеет вид

$$y = F(x, b). \quad (8)$$

Решением (вектором коэффициентов) задачи среднеквадратичной аппроксимации при нелинейной модели (8) будем считать то значение вектора $b \in E^k$, для которого сумма квадратов отклонений

$$\Psi(b) = \sum (F(x_i, b) - y_i)^2$$

принимает минимальное значение. В некоторых случаях уравнение (8) можно преобразовать к линейному виду:

$$g(y) = g(F(x, b)) = b_1 f_1(x) + \dots + b_k f_k(x). \quad (9)$$

Введя новую переменную $z = g(y)$, получим обычный МНК.

При наличии ошибок в исходных данных преобразование (9), как правило, приводит к потере точности, так как минимизация проводится уже преобразованной суммы квадратов, чьё оптимальное значение не соответствует минимуму $\Psi(b)$. Расхождение между истинным значением функции и её аппроксимацией, полученной в результате линеаризации, можно значительно уменьшить с помощью введения соответствующих весов ρ_i для экспериментальных точек, т. е. минимизировать сумму

$$\tilde{\Psi}(b) = \sum \rho_i^2 (g(F(x_i, b)) - g(y_i))^2, \quad (10)$$

где $\rho_i = \frac{1}{g'(y_i)}$ [4].

Для модели Терстоуна — Мостеллера $y = p$, а $g(p_{ij}) = \Phi^{-1}(p_{ij})$. Пусть $f(x) = \Phi\left(\frac{x}{\sigma}\right)$ и $g(y) = f^{-1}(y)$. Имеем

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x/\sigma} e^{-\frac{1}{2}t^2} dt, \text{ где } f'(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2}.$$

Тогда $g'(y) = \frac{1}{f'(x)}$ в точке $y = f(x)$. Найдём соответствующее значение $x = f^{-1}(y) = \Phi^{-1}(y) \cdot \sigma$. Отсюда

$$g'(y) = \sigma\sqrt{2\pi} e^{\frac{1}{2}(\Phi^{-1}(y))^2},$$

где σ — среднеквадратичное отклонение для экспериментальных точек.

Решение, полученное описанным методом можно использовать и как начальное приближение при нелинейном МНК, и как окончательный ответ задачи.

Как было отмечено вначале п. 1, Ноезе предлагает использовать невзвешенный МНК, который применяется при обработке данных равноточных экспериментов. В противном случае рекомендуется вводить веса, обратные дисперсии ошибок. В данном случае результатом эксперимента является число наступления события $A_i \succ A_j$ у каждого эксперта. Согласно формуле Бернулли, в схеме из N независимых испытаний дисперсия числа наступления события равна $Np(1-p)$, где p — теоретическая вероятность наступления наблюдаемого события. Отсюда, формулу (7) нужно скорректировать и привести к виду

$$Q = \sum_{i,j=1, i \neq j}^m \frac{[p_{ij} - \Phi(V_i - V_j)]^2}{\Phi(V_i - V_j)(1 - \Phi(V_i - V_j))}.$$

Использование минимума суммы квадратов позволяет найти некую точку, «в среднем» минимально удалённую от некоторого набора экспериментальных данных. Однако при обработке данных часто используется такой объект, как медиана, для которой минимальна сумма модулей отклонений. В ряде случаев это даёт более адекватный результат. Так, в теории принятия решений широко используется медиана Кемени. Можно попытаться применить этот подход к модели Терстоуна. Для этого минимизируем сумму

$$T = \sum_{i,j=1,i \neq j}^m |p_{ij} - \Phi(V_i - V_j)|. \quad (11)$$

Метод такой минимизации описан в [5]. Введём набор вспомогательных неотрицательных переменных t_{ij} , число которых совпадает с числом слагаемых в (11) и решим задачу условной минимизации

$$\sum_{i,j=1,i \neq j}^m [p_{ij} - \Phi(V_i - V_j) + 2t_{ij}] \rightarrow \min_{V_i, t_{ij}} | t_{ij} \geq p_{ij} - \Phi(V_i - V_j), t_{ij} \geq 0$$

при соблюдении (4). В результате получим оценки коэффициентов функции ценности.

1.3. Нестрогие предпочтения

Рассмотрим достаточно распространённый случай, когда эксперты затрудняются высказать свои предпочтения в пользу одного из объектов пары, считая их эквивалентными. При ранжировании набора объектов такая ситуация получила название «связанные ранги».

Результаты экспертных сравнений разделим на две группы. К первой группе отнесём сравнения, в результате которых альтернатива A_i предпочтительней, чем A_j . Экспериментальную вероятность такого исхода, как и раньше, обозначим p_{ij} . Во вторую группу включим сравнения, в результате которых альтернатива A_i оказалась эквивалентна по полезности A_j . Экспериментальную вероятность такого исхода обозначим q_{ij} . Сделаем допущение, что существует некоторое пороговое значение V_0 для разности $(y_i - y_j)$ между случайными величинами, определяющее предпочтения одной альтернативы над другой и включим этот порог в число определяемых параметров.

Будем считать, что

$$P(A_i \succ A_j) = P(y_i - y_j > V_0) = \Phi(V_i - V_j - V_0),$$

а

$$P(A_i \approx A_j) = P((y_i - y_j) \in [-V_0, +V_0]) = \Phi(V_i - V_j + V_0) - \Phi(V_i - V_j - V_0).$$

Отсюда, минимизируемая функция будет иметь вид

$$R = \sum_{i,j=1,i \neq j}^m [p_{ij} - \Phi(V_i - V_j - V_0)]^2 + \sum_{i,j=1,i \neq j}^m [q_{ij} - (\Phi(V_i - V_j + V_0) - \Phi(V_i - V_j - V_0))]^2.$$

2. Метод анализа процедур

Приведём численные примеры результатов применения описанных процедур. Пусть имеем $m = 5$ альтернатив и $N = 7$ экспертов, оценивающих строгие предпочтения. Пусть результатом экспертизы является матрица парных сравнений

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 4 & 7 & 5 & 6 \\ 3 & 0 & 7 & 6 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & 6 & 0 & 3 \\ 1 & 1 & 7 & 4 & 0 \end{pmatrix}.$$

Будем оценивать только полезности альтернатив без определения коэффициентов функции ценности. Для этого в качестве Z можно взять любую матрицу ранга 4, удовлетворяющую условиям теоремы 1. Выберем матрицу

$$Z = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

В результате получим оценки V_1, \dots, V_5 , приведённые в табл. 1.

Из таблицы видно, что результаты оценивания различаются. Для объективного сравнения процедур группового выбора существует вероятностный метод [6]. В этом методе делается предположение об истинных значениях полезностей альтернатив. Далее перебираются все возможные результаты парных сравнений, рассчитываются вероятности всех исходов и вычисляется точное значение математических ожиданий оценок полезностей, полученных анализируемой процедурой. Качество процедуры оценивается по нескольким показателям: величины смещения математических ожиданий оценок полезности, среднеквадратичное отклонение полученных оценок от истинных значений полезностей, вероятность верного упорядочения альтернатив по полезности и др.

Таблица 1

Результаты нахождения оценок полезностей альтернатив

Процедуры	Терстоуна — Мостеллера — Ноезе	МНК из [4]	Нелинейный МНК	Взвешенный нелинейный МНК	Сумма модулей
Оценки V_1, \dots, V_5	0.8289	1.3661	1.2429	1.1274	1.4337
	1.5452	2.8744	1.1743	1.1718	1.1792
	-1.4034	-2.4493	-2.1783	-2.0458	-2.2062
	0	-0.1416	-0.1816	-0.1764	-0.3306
	-0.9707	-1.6495	-0.0574	-0.0769	-0.0760
Упорядоченность	A_2, A_1, A_4, A_5, A_3	A_2, A_1, A_4, A_5, A_3	A_1, A_2, A_5, A_4, A_3	A_2, A_1, A_5, A_4, A_3	A_1, A_2, A_5, A_4, A_3

Данный метод применялся в предположении, что при парных сравнениях все экспертные предпочтения транзитивны. Это было обусловлено тем, что в модели Терстоуна результаты парных сравнений определяются знаком разности $(y_i - y_j)$. Фактически это эквивалентно допущению о транзитивности предпочтений. Действительно, из $(y_1 - y_2 > 0)$ и $(y_2 - y_3 > 0)$ всегда следует $(y_1 - y_3 > 0)$, поэтому из $(A_1 \succ A_2)$ и $(A_2 \succ A_3)$ следует $(A_1 \succ A_3)$. Однако в реальной ситуации эксперт в своих предпочтениях не всегда мыслит транзитивно. Такая непоследовательность суждений может объясняться различными причинами: сложность задачи, неочевидностью предпочтительности альтернатив (в противном случае, когда все очевидно, нет смысла проводить экспертизу), недостаточной компетентностью эксперта, недостаточно чёткой постановкой задачи, многокритериальностью альтернатив и т. д.

При «максимальной» нетранзитивности предпочтений результаты сравнений альтернатив A_i и A_j можно определять знаками независимых случайных величин y_{ij} . В этом случае сравнения A_1 с A_2 и A_2 с A_3 будут никак не связаны со сравнением A_1 и A_3 . Соответствующую поправку можно будет внести в вероятностный метод анализа процедур.

Таким образом, мы имеем дело с моделями двух крайних случаев: «транзитивный» и «абсолютно нетранзитивный» эксперт. Чтобы приблизиться к реальности, необходимо уметь ге-

нерировать некоторый промежуточный вариант, при котором эксперт лишь иногда нетранзитивен в своих предпочтениях. В данной статье предлагается подход к моделированию таких предпочтений.

Как известно, степень статистической зависимости совокупности случайных величин определяется их ковариационной матрицей. Например, матрица независимых величин имеет диагональный вид. Выясним, чему равна ковариация двух разностей независимых случайных величин. Пусть имеем систему независимых случайных величин $\{y_i\}$ с дисперсией σ^2 . Несложно показать, что

$$\text{cov}((y_1 - y_2), (y_2 - y_3)) = -\sigma^2, \quad \text{cov}((y_1 - y_2), (y_1 - y_3)) = \sigma^2, \quad \text{cov}((y_1 - y_2), (y_1 - y_2)) = 2\sigma^2,$$

и т. д. Отсюда, например, система разностей $\{(y_1 - y_2), (y_1 - y_3), (y_1 - y_4), (y_2 - y_3), (y_2 - y_4), (y_3 - y_4)\}$, возникающих при транзитивных предпочтениях четырёх сравниваемых альтернатив (при $m = 4$) будет иметь ковариационную матрицу вида

$$K = \sigma^2 \cdot \begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 2 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 2 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & -1 & 1 & 2 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Верно и обратное, что ковариационная матрица вида (12) соответствует транзитивной системе предпочтений на множестве из четырёх альтернатив. Аналогичные утверждения для произвольного m доказываются по индукции.

Итак, при парных сравнениях ковариация между двумя экспертными оценками в случае нетранзитивных предпочтений равна 0, а при транзитивных $\pm\sigma^2$. Варьируя величины ковариаций между этими пределами можно имитировать промежуточные варианты степени транзитивности экспертных предпочтений.

Литература

1. Пустыльник Е. И. Об одном методе экстраполяции экспертных оценок / Е. И. Пустыльник, В. В. Сысоев, М. С. Чирко // Экономика и математические методы. – 1983. – Вып. 4. – С. 716–717.
2. Шмерлинг Д. С. Экспертные оценки. Методы и применение. (Обзор) / Д. С. Шмерлинг, С. А. Дубровский, Т. Д. Аржанова, А. А. Френкель // Статистические методы анализа экспертных оценок. Ученые записки по статистике. Т. 29. – М. : Наука, 1977. – С. 290–382.
3. Noether G. E. Remarks about a paired comparison model / G. E. Noether // «Psychometrika». – 1960. – V. 25. – P. 357–367.
4. Демиденко Е. З. Линейная и нелинейная регрессии / Е. З. Демиденко. – М. : Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
5. Хартман К. Планирование экспериментов в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шеффер / Пер. с нем. М. : Мир, 1977. – 552 с.
6. Бугаев Ю. В. Вероятностный метод анализа процедур построения коллективных экспертных оценок / Ю. В. Бугаев, М. С. Миронова, Б. Е. Никитин // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2011. – № 2. – С. 130–135.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ КОМПЕНСАЦИИ ВОЗМУЩЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ДИНАМИКУ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

А. С. Веркнер, Г. О. Горлова, Е. О. Гурьянова

*МИРЭА – Российский технологический университет,
Институт искусственного интеллекта, кафедра автоматических систем*

Аннотация. Статья посвящена исследованию принципов компенсации возмущения действующего на динамику объекта. Разработана математическая и компьютерная модели движения мобильного робота для детерминированных возмущений. Разработанная математическая модель, имеющая простую структуру, при этом удобная для решения различных задач управления, может применяться в учебно-методических целях. На основании принципов внутренней модели, упреждения возмущения и каскадного управления разработаны алгоритмы управления для компенсации возмущения. Исследована эффективность каждого принципа управления. Компьютерное моделирование проведено в среде класса MATLAB.

Ключевые слова: математическая модель мобильного робота, компьютерная модель мобильного робота, движение мобильного робота в гору, компенсация возмущения, принцип внутренней модели, упреждение возмущения, каскадное управление.

Введение

Большинство методов теории управления созданы для систем, на которые не действуют возмущения, хотя реальном мире такие системы практически не применяются. Поэтому возникает потребность в исследовании и совершенствовании известных подходов к управлению, в которых воздействия возмущений не скажется на работе регуляторов и качестве управления.

Актуальность работы связана с тем, что в программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) запланировано отраслевое сотрудничество между представителями наукоемкой промышленности и учёными в области разработки систем управления. Данная статья представляет исследование различных методов управления мобильным роботом, который подвержен действию возмущения.

Целью является разработка алгоритмов управления для компенсации возмущения и исследование принципов компенсации возмущения, действующего на динамику мобильного робота. В качестве объекта исследования рассматривается мобильный робот. Предметом исследования являются алгоритмы управления мобильным роботом, на которого действует возмущение.

1. Математическая модель движения мобильного робота для детерминированных возмущений

При построении математической модели были приняты следующие допущения:

1. Корпус робота — твердое тело, имеющее продольную плоскость симметрии;
2. Контакт колес с дорогой постоянный и точечный;
3. Колебания корпуса и колес не учитываются;
4. Движение робота прямолинейное и равномерное.

Модель робота (рис. 1) основана на системе уравнений, связывающих входные данные системы (командное напряжение) с выходными параметрами робота (движение или положение робота, скорость и ускорение при заданной нагрузке). Эта модель требует: 1) описание проте-

кания тока в двигателе; 2) уравнений движения робота с вращением двигателя в обобщенной координате; 3) электрических / механических соотношений в системе [1].

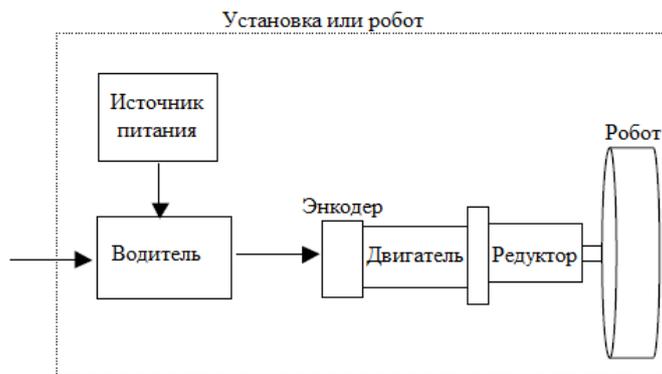


Рис. 1. Модель мобильного робота

Электроника двигателя

Схема системы привода двигателя построена и оценена с использованием закона напряжения Кирхгофа, рис. 2.

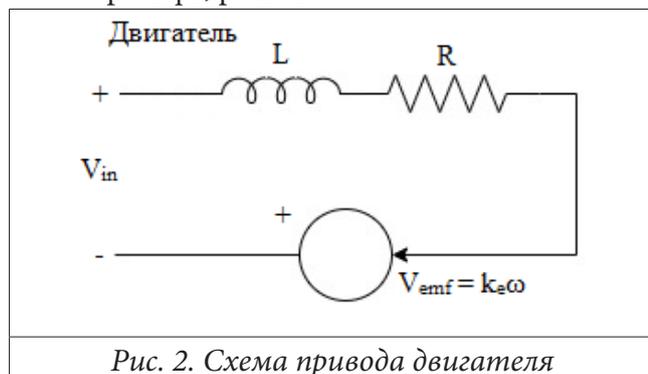


Рис. 2. Схема привода двигателя

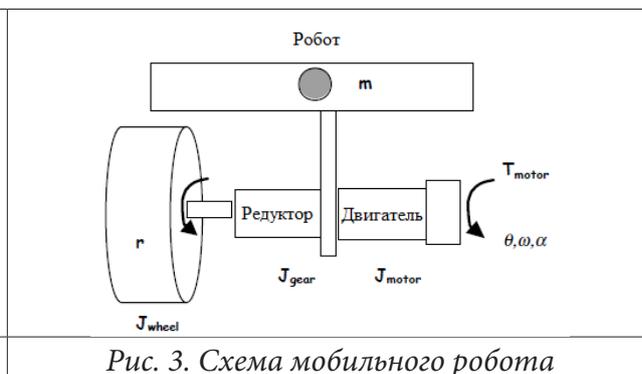


Рис. 3. Схема мобильного робота

Суммирование напряжений по всей цепи представлено в уравнении 1,

$$V_{in} = L \frac{di}{dt} + Ri + k_e \omega \quad (1)$$

обыкновенном дифференциальном уравнении первого порядка для тока i , где L , R — индуктивность и сопротивление двигателя, k_e — электрическая постоянная, V_{emf} — обратная ЭДС, ω — скорость вращения двигателя (рад/с).

Уравнения движения

Уравнения движения для робота рассматривают простой случай движения робота с одной степенью свободы, движущегося вперед и назад. Построена схема симметричной половины робота (рис. 3), которая используется для записи уравнений движения [2].

$$J\ddot{\theta} + C\dot{\theta} = T - T_{load}, \quad (2)$$

J — эквивалентная инерция относительно двигателя, C — эквивалентное вязкое демпфирование, воспринимаемое двигателем, T_{motor} — входной крутящий момент двигателя, T_{load} — все остальные нагрузки в системе.

Полная инерция системы относительно двигателя определяется следующим уравнением

$$J_{equiv} = J_{motor} + J_{gear} + (J_{wheel} + mr^2) \left(\frac{1}{GR} \right)^2, \quad (3)$$

J_{motor}, J_{gear} — инерция двигателя и редуктора относительно двигателя, J_{wheel} — инерция колеса робота m — масса робота, r — радиус колеса, GR — коэффициент передачи, выраженный, как отношение входного вращения к единичному выходному вращению. Ур. 2 дает обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка для вращения двигателя θ .

Электромеханическое соотношение

Электрические и механические компоненты связаны двумя способами. Во-первых, обычно используется приближенное соотношение, описывающее крутящий момент двигателя, как линейную функцию тока в двигателе [3].

$$T = k_t i, \quad (4)$$

k_t — постоянная момента двигателя. Кроме того, обратная ЭДС в двигателе линейно связана со скоростью вращения двигателя,

$$V_{emf} = k_e \dot{\theta}. \quad (5)$$

Электрические и динамические взаимосвязи теперь объединены в систему уравнений, управляющих реакцией робота. Уравнения 4 и 5 заменяются уравнениями 2 и 1 соответственно для получения окончательных уравнений системы, обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го и 2-го порядка с двумя неизвестными i и θ :

$$J\ddot{\theta} + C\dot{\theta} - k_t i = -T_{load} \quad (6)$$

$$Li + Ri + k_e \dot{\theta} = V_{in}. \quad (7)$$

В установившемся состоянии приведенная выше динамическая модель двигателя может быть значительно упрощена ($i = \dot{\theta} = 0$) для получения уравнений.

Эта система может быть преобразована в форму пространства состояний для получения системы из трех обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка [4]:

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{C}{J} & \frac{k_t}{J} \\ 0 & -\frac{k_b}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{VR}{L} \end{Bmatrix}; \quad \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix}. \quad (8)$$

В этом случае выходными переменными являются линейное положение и скорость робота, а также ток двигателя.

Исходными данными двигателя являются технические характеристики и параметры двигателя TTU ME3060, мобильного робота класса «robot car kit».

Таблица 1

Исходные данные

Обозначение	Численное значение	Название	Единицы измерения
l	2	3	4
m	5	Масса робота	кг
g	9.81	Ускорение свободного падения	м/с ²
rw	0.05	Радиус колеса	м
GR	1/15	Коэффициент передачи	
J_{motor}	1.3e-4	Инерция двигателя	кг·м ²

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4
C	$1.0791e-5$	Эквивалентное вязкое демпфирование	Н/м
kt	35	Крутящий момента двигателя	Нм
kb	0.7840;	Постоянная обратной ЭДС	об / мин
L	$4.8 \cdot 1e-3$	Индуктивность	Гн
R	9.65	Сопротивление	Ом
V	12	Входное напряжение	В

В статье управление реализуется по одному каналу, в качестве которого выбран канал угловой скорости двигателя. Из уравнения 8, путем простых преобразований, получена компьютерная модель объекта управления (ОУ), представленная на рис. 4. Компьютерная модель (рис. 4) на выходе показывает изменение угловой скорости двигателя. В статье реализовано управление скоростью вращения колёс робота, для этого необходимо выход объекта умножить на радиус колеса r и передаточное число GR . График переходного процесса объекта управления представлен на рис. 5.

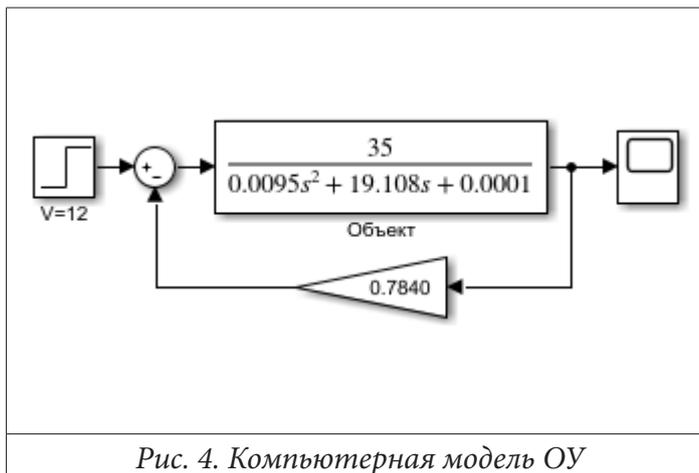


Рис. 4. Компьютерная модель ОУ

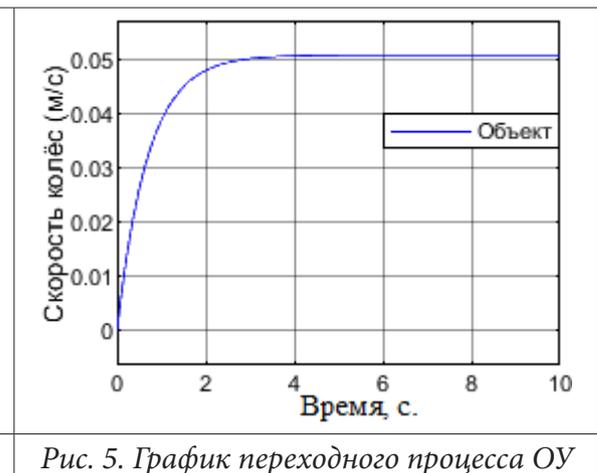


Рис. 5. График переходного процесса ОУ

Время переходного процесса составляет $t_{mn} = 4$ с. Величина перерегулирования $\sigma = 0$.

В качестве детерминированного возмущения используются единичная ступенька и апериодическое звено, вместе эти два объекта имитируют движение мобильного робота в гору. Для наглядности влияния возмущения на ступеньке установлена задержка в 4 секунды.

Математически, преобразованное по Лапласу, возмущение может быть записано, как

$$D_g(s) = \frac{N_d(s)}{\Gamma_d(s)} x_d(0),$$

$\Gamma_d(s)$ — полином формирующий возмущения. Полином соответствует знаменателю преобразования Лапласа. В текущем исследовании $\Gamma_d(s)$ имеет вид $\Gamma_d(s) = s(s+1)$.

Компьютерная модель ОУ с возмущением представлена на рис. 6, а график переходного процесса ОУ с возмущением на рис. 7.

На графике переходного процесса отчетливо видно, как при 4 секундах на объект начинает действовать возмущение, то есть объект начинает ехать в гору, и скорость вращения колес падает.

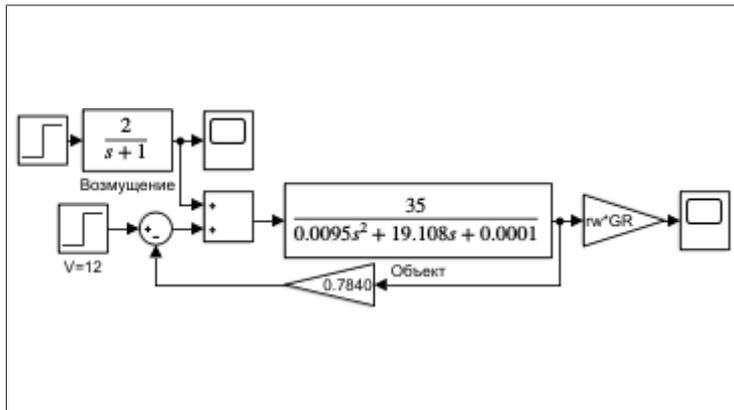


Рис. 6. Компьютерная модель ОУ с возмущением

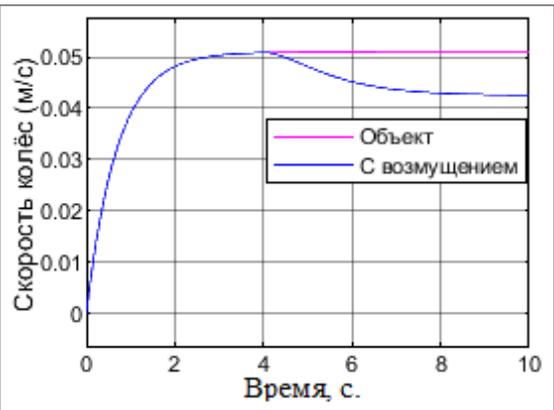


Рис. 7. График переходного процесса ОУ с возмущением

2. Обеспечение условий компенсации возмущения в установившемся режиме на основе использования принципа внутренней модели

Согласно принципу внутренней модели (ПВМ) для компенсации возмущения в установившемся режиме требуется, чтобы формирующий полином $G_d(s)$ был включен как часть знаменателя регулятора.

Пусть желаемый характеристический полином имеет вид.

$$A_d(s) = 0.0095s^5 + 19.1935s^4 + 172.2191s^3 + 497.0369s^2 + 458.5947s + 0.0025.$$

С помощью ПВМ найден регулятор системы, для компенсации возмущения

$$C = \frac{0.00489s^3 + 9.83349s^2 + 13.10268s + 0.00007}{s^3 + 9s^2 + 8s}.$$

Компьютерная модель системы имеет вид (рис. 8)

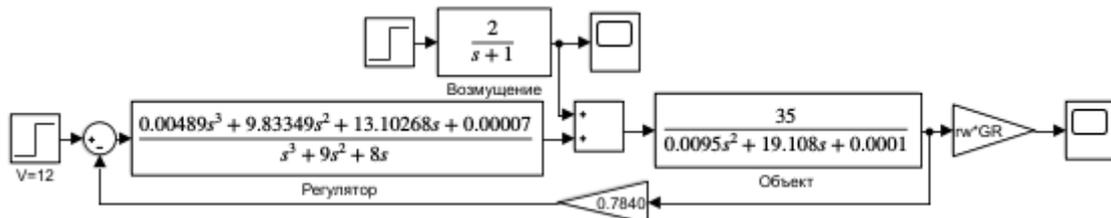


Рис. 8. Компьютерная модель системы с компенсацией возмущения

График переходного процесса замкнутой системы с регулятором (рис. 9)

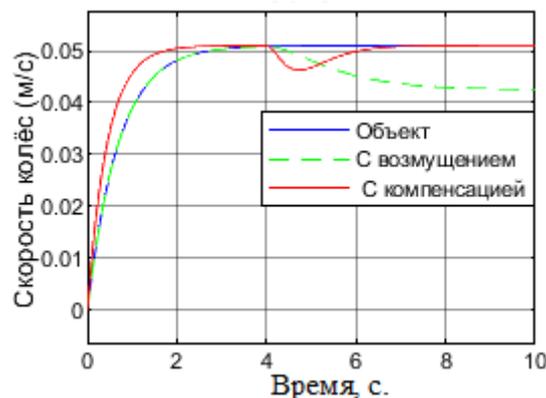


Рис. 9. График переходного процесса системы с компенсацией возмущения

Благодаря применению принципа внутренней модели, с помощью метода назначения полюсов удалось в значительной мере компенсировать возмущение, а также улучшить характеристики системы. Переходной процесс протекает быстрее, вызванное возмущением, падение скорости компенсировалось.

3. Упреждение возмущения

Структура для упреждения возмущения представлена на рис. 10 [5].

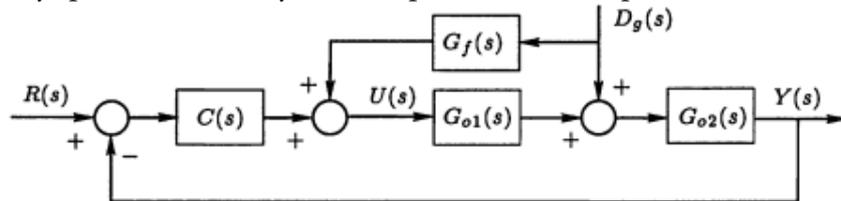


Рис. 10. Схема с упреждением возмущения

Из рисунка видно, что выход модели и реакция на выходе регулятора определяются выражениями:

$$Y_d(s) = S_0(s)G_{o2}(s)(1 + G_{o1}(s)G_f(s)D_g(s))$$

$$U_d(s) = -S_{uo}(s)G_{o2}(s)D_g(s) + S_0(s)G_f(s)D_g(s).$$

Как видно из уравнения, в идеале блок упреждения должен инвертировать часть номинальной модели, то есть $G_f(s) = -[G_{o1}(s)]^{-1}$. Также видно, что передаточная функция блока упреждения $G_f(s)$ должна быть устойчивой и собственной, так как действует в разомкнутом контуре.

На первом этапе необходимо осуществить синтез регулятора обратной связи, который реализован с помощью метода назначения полюсов. Пусть желаемый характеристический полином имеет вид:

$$A_{cl}(s) = 0.0095s^4 + 19.1935s^3 + 172.1621s^2 + 382.1609s + 0.000059.$$

С помощью метода назначения полюсов получен регулятор обратной связи

$$C(s) = \frac{P(s)}{L(s)} = \frac{0.00543s^2 + 10.9189s + 0.000059}{s(s + 9)}.$$

Для упреждения возмущения требуется найти $G_f(s) = -[G_0(s)]^{-1}$, $G_f(s)$ выбрана, как приближение инверсии $G_0(s)$.

$$G_f(s) = -\frac{0.0095s^2 + 19.108s + 0.0001}{\beta(0.0095s^2 + 19.108s + 0.0001)},$$

где β допускает компромисс между эффективностью упреждения и величиной управляющего воздействия. Согласно [5] β был принят 0,01, при котором наблюдается удовлетворительная динамика.

Компьютерная модель с упреждением возмущения (рис. 11).

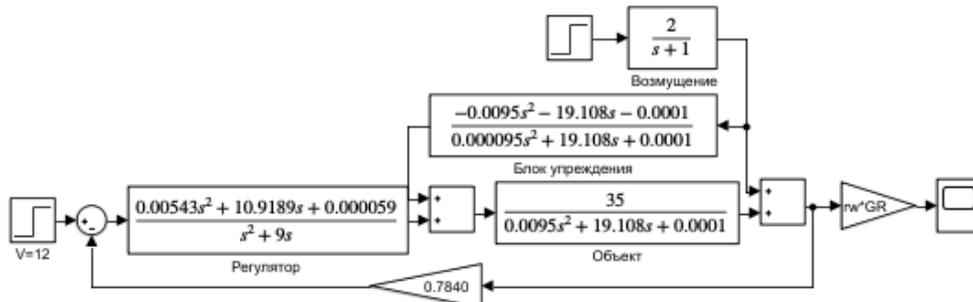


Рис. 11. Компьютерная модель с упреждением возмущения

График переходного процесса без упреждения и с упреждением возмущения (рис. 12).

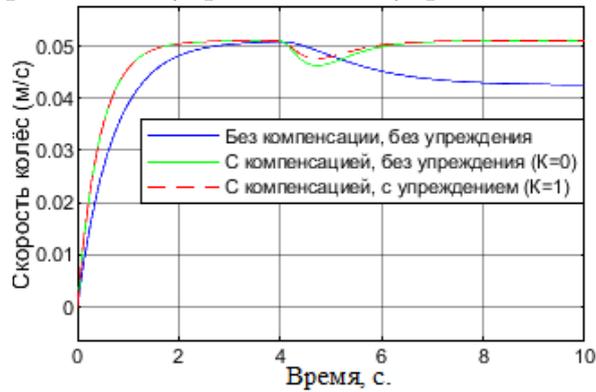


Рис. 12. График переходного процесса с упреждением возмущения

Из рис. 12 видно, что наилучшими характеристиками обладает система с использованием упреждения и компенсацией возмущения.

4. Аналитическое конструирование каскадного управления и оценка возможности его физической реализации

Основная идея каскадного управления заключается в том, чтобы передать в обратную связь некоторые промежуточные переменные, которые находятся между точкой приложения возмущения и выходом. В каскадном управлении вводится второй контур управления. Выход первого регулятора формирует эталонный сигнал для второго контура. В этой структуре имеются два контура управления, первичный контур с первичным регулятором и вторичный контур с вторичным регулятором.

На первом этапе требуется разделить объект для реализации двух контуров управления.

$$G_{01}(s) = \frac{35}{s+7}; \quad G_{02}(s) = \frac{s+7}{0.0095s^2 + 19.108s + 0.0001}.$$

На следующем этапе необходимо разработать вторичный регулятор. Пусть эталонный характеристический полином имеет вид

$$A_{cl}(s) = s^3 + 24s^2 + 191s + 504.$$

С помощью метода назначения полюсов получен вторичный регулятор

$$C_2 = \frac{(s+7)(0.457s+2.057)}{s(s+1)} = \frac{0.457s^2 + 5.256s + 14.399}{s^2 + s}.$$

Этот регулятор был выбран для получения удовлетворительной компенсации возмущения во вторичном контуре. Дополнительная чувствительность вторичного контура равна

$$T_{02} = \frac{BP}{AL + BP} = \frac{15.995s + 71.995}{s^2 + 16.995s + 71.995}.$$

Первичный регулятор работает с эквивалентным объектом

$$G_{oec} = G_{02}(s)T_{02}(s) = \frac{15.995s^2 + 183.69s + 503.3965}{0.0095s^4 + 19.2695s^3 + 325.424s^2 + 1375.682s + 0.0072}.$$

Теперь необходимо для объекта G_{oec} разработать первичный регулятор C_1 . Пусть эталонный характеристический полином, имеет вид

$$A_{cl}(s) = 0.0095s^7 + 19.536s^6 + 867.405s^5 + 15524.589s^4 + 139063.062s^3 + 622646.644s^2 + 1114304.25s + 5.832.$$

С помощью метода назначения полюсов найден первичный регулятор

$$C_1 = \frac{(-20.44s^3 + -41059.73s^2 + -408324.69s + -2.14)}{(s^3 + 28.1s^2 + 34462.84s + 150226.34)}$$

Таким образом система с каскадным управлением имеет вид (рис. 13).

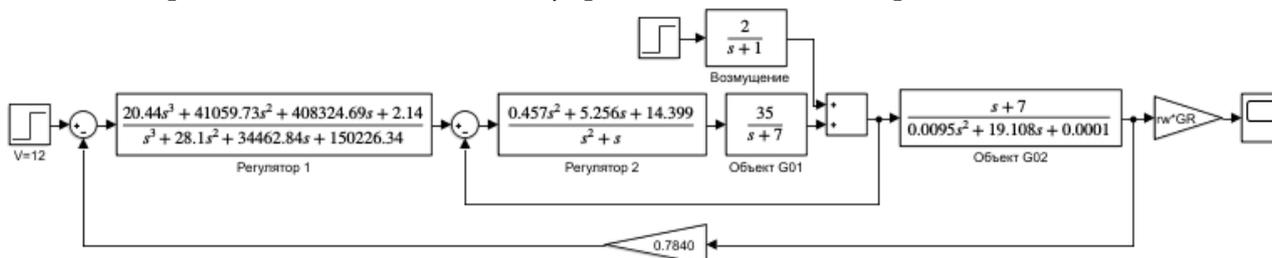


Рис. 13. Компьютерная модель с каскадным управлением

График переходного процесса с каскадным управлением (рис. 14).

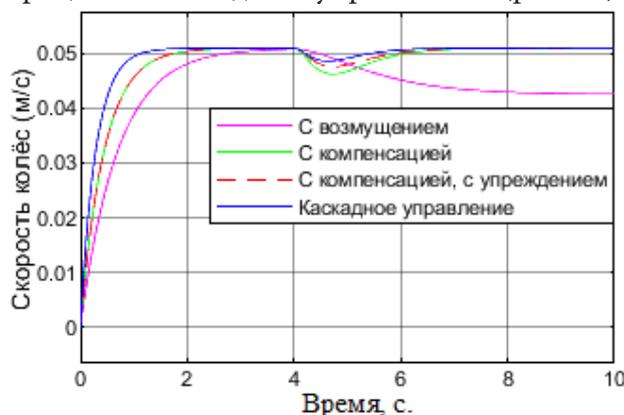


Рис. 14. График переходного процесса с каскадным управлением

Благодаря применению каскадного управления удалось существенно улучшить характеристики системы. Результаты использования каскадного управления значительно лучше, чем при использовании упреждения возмущения и компенсации возмущения.

Заключение

Разработана математическая модель объекта управления и произведено компьютерное моделирование. На основе использования принципа внутренней модели обеспечены условия компенсации возмущения в установившемся режиме. Реализовано упреждение возмущения применительно к данному объекту управления. Произведено аналитическое конструирование каскадного управления.

Из рис. 14 видно, что все структуры компенсируют возмущение, наилучшими характеристиками обладает система с применением каскадного управления.

Все результаты подтверждены вычислениями и компьютерным моделированием. Компьютерное моделирование проведено в среде класса MATLAB. Основные параметры приведены из открытых источников информации на примере мобильного робота класса «robot car kit» и двигателя TTU ME3060.

Литература

1. Технологический университет Теннесси: лаборатория ME 4370: Мехатроника и разработка интеллектуальных машин. – Теннесси, 2000. – URL: <https://www.cae.tnitech.edu/~scanfield/me4370/9Controls.PDF> (Дата обращения 17.07.22).
2. *Афанасьев В. Н.* Математическая теория конструирования систем управления: учеб. для вузов / В. Н. Афанасьев, Б. В. Колмановский, В.Р. Носов. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Высшая школа, 2003. – 614 с.
3. *Копылов И. П.* Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Т. 1 / И. П. Копылов, Б. К. Клоков. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
4. *Асанов А. З.* Моделирование и анализ динамических систем : учеб. пособие / А. З. Асанов; КамПИ. – Набережные Челны : Изд-во Камского государственного политехнического института, 2004. – 152 с.
5. *Гудвин Г. К.* Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин, С. Ф. Гребе, М. Э. Сальгадо. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

А. А. Воронцова

Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова

Аннотация. Данная статья посвящена многомерному статистическому анализу, в частности кластеризации. Это научное направление, как разновидность обучения без учителя, потенциально интересно, как для специалистов по данным, так и для представителей всех областей, занимающихся группировкой объектов. Мы сосредоточились на практическом применении кластеризации, т. е. выявлении скрытой структуры в реальных данных. В основу анализа были положены данные по всем регионам России. В результате было получено шесть групп регионов (шесть кластеров). Эти группы регионов оказались очень неоднородными по размерам, но почти для всех из них поддавались интерпретации устойчивые видовые характеристики. Кроме того, мы показали возможность экономической интерпретации результатов кластерного анализа, а также эффективность совместного использования метода Уорда, метода k-средних и метода главных компонент. **Ключевые слова:** кластеризация, k-means, метод Варда, обучение без учителя, социально-экономические исследования, региональный анализ, SPSS, регионы России, неоднородность, группировка объектов.

Введение

Необходимость классификации объектов преследует человечество с момента его зарождения (например, определение съедобных и ядовитых растений и грибов, хищников и травоядных животных и т. д.). Эта задача является тривиальной, если мы используем только один признак или заранее известно количество в метке класса. Однако, в социально-экономических исследованиях часто мы имеем множество объектов, которые характеризуются широким спектром показателей. Для нахождения устойчивых групп объектов в таких ситуациях чаще всего применяют методы кластерного анализа.

1. Кластеризация, как метод математического анализа

Кластеризация представляет собой способ группировки объектов таким образом, чтобы сходные объекты попадали в одну группу, а существенно различающиеся объекты — в разные группы. При этом чаще всего каждый из объектов характеризуется множеством параметров, то есть кластеризация — это в первую очередь многомерный статистический анализ. Кроме того, нам заранее неизвестно ни число кластеров, ни лейблы для них, то есть признаки, которые бы характеризовали типичных представителей группы.

В терминах теории множеств кластеризация представляет собой процесс разделения исходного множества объектов (каждый из которых описывается набором переменных) на несколько подмножеств. Часто такие подмножества также являются непересекающимися.

Фундаментальным в процессе кластеризации является следующий вопрос — «Как определить, что объекты расположены близко?» или «Как можно измерить расстояние между двумя точками в многомерном пространстве?». На них нет однозначного ответа, поэтому в зависимости от цели исследования и типа данных используются различные метрики: расстояние Евклида, Манхэттенское расстояние, расстояние Жаккарда и т. д.

В целом, есть свидетельства, что количество алгоритмов кластеризации превышает 1000, что является прямым следствием теоремы Клейнберга. Среди наиболее известных методов

можно отметить: метод k-средних, метод Варда, нейронные сети Кохонена, DBSCAN, Гауссовская смесь. Кроме того, наиболее важным является разделение алгоритмов — на четкие (каждому объекту присваивается значение членства только в одной группе) и нечеткие (учитывается вероятность вхождения объекта в каждую из групп).

Проиллюстрируем для двух популярных алгоритмов кластеризации — Ward's method и k-means method, которые впоследствии будут использованы в экспериментальной части. Обе формулы (1) и (2) оперируют расстоянием между элементами кластера и его центром (или центроидом):

$$\Delta = \sum_i (x_i - \bar{x})^2 - \sum_{x_i \in A} (x_i - \bar{a})^2 - \sum_{x_i \in B} (x_i - \bar{b})^2, \quad (1)$$

где \bar{x} — центроид объединенного кластера, \bar{a} и \bar{b} — центроиды кластеров A и B .

$$V = \sum_{j=1}^k \sum_{x_j^i \in S_j} (x_j^i - \bar{x}_j), \quad (2)$$

где k — количество кластеров (j — номер кластера), x_j^i — i -й элемент j кластера, \bar{x}_j — центроид j -го кластера.

2. Методика исследования

В экспериментальной части статьи мы сосредоточились на двух популярных методах кластеризации: Ward's method и k-means. Выбор указанных алгоритмов обусловлен их сравнительной простотой и эффективностью, а также тем, что они реализованы в статистическом пакете SPSS Statistics.

Объектами выступили 82 субъекта Российской Федерации, каждый из которых характеризовался 9 социально-экономическими признаками. Информационной базой, в основном, являлись данные Росстата.

Впоследствии для обеспечения сопоставимости данных было проведено их нормирование (в результате значения признаков варьировались от 0 до 1). Кроме того, исходное пространство признаков было уменьшено с применением факторного анализа (метод главных компонент). В итоге кластеризация проводилась на трех факторах.

В качестве метрики использован квадрат евклидова расстояния, вычисляемый по формуле:

$$D_{ij} = \sum_{l=1}^m (x_i^l - x_j^l)^2, \quad (3)$$

x^l — значение переменной l .

Расчеты произведены с помощью программного продукта IBM-SPSS Statistics.

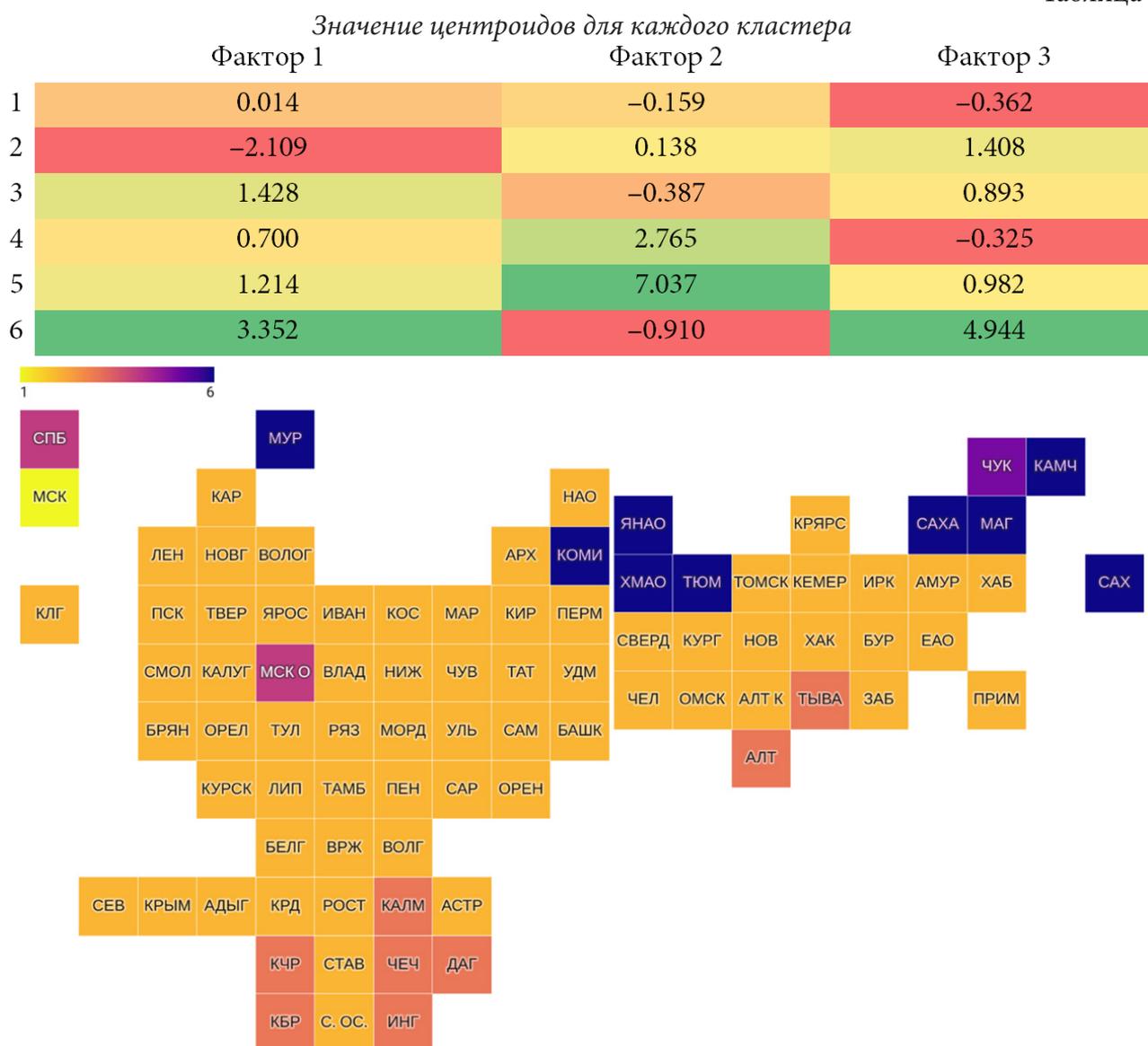
3. Результаты кластеризации

Кластеризация позволяет нам снизить объем данных, что облегчает процесс анализа. Например, в результате кластеризации методом k-means вместо 82 объектов мы получили 6 типичных представителей, каждый из которых можно охарактеризовать среднеарифметическим значением признака. Представлено в табл. 1.

Как мы видим, наиболее существенно отличаются от остальных регионов – кластер 5 (город Москва) и кластер 6 (Чукотский автономный округ). В то же время, относительно средними характеристиками обладают регионы самого большого первого кластера (63 региона).

Окончательное распределение регионов по кластерам представлено с помощью тепловой карты (рис. 1).

Таблица 1

Рис. 1. Распределение регионов по кластерам по методу *k-means*

Стоит отметить, что результаты, полученные независимо на основе двух методов кластеризации, являются практически идентичными (за исключением отдельных субъектов, например, Республики Коми), что подтверждает эффективность данной группировки. Вероятно, так как кластеризация в обоих случаях являлась четкой, Республика Коми имеет промежуточное положение и при принятии решения о ее отнесении в конкретную группу регионов необходимо экспертное мнение.

Несмотря на то, что кластеры получились очень неоднородными по размеру: 63, 8, 7, 2, 1, 1, регионы, принадлежащие к одному кластеру, географически находятся близко друг от друга, что также подтверждает обоснованность наших расчетов.

Чукотский автономный округ и город Москва, характеризующиеся соответственно очень низкой и очень высокой плотностью населения, образовали два самостоятельных кластера. Два региона с высоким уровнем развития (Московская область и город Санкт-Петербург) вошли в третий кластер. Еще несколько субъектов, с достаточно плохим климатом, образовали четвертую группу. И последними от общей группы регионов отделились пограничные территории России, большинство из которых характеризуются относительно низким уровнем качества жизни.

При этом большинство субъектов образовали один кластер, что может свидетельствовать об относительно схожих социально-экономических условиях.

Заключение

Методы многомерного статистического анализа (факторный анализ и классификация) позволили провести обработку достаточно большого массива статистических данных без существенной потери информации. Полученные центры кластеров могут быть рассмотрены, как репрезентативные агенты.

В целом, мы получили 6 групп регионов. При этом 2 кластера представлены отдельными регионами — аутлайерами. Кроме того, больше половины субъектов вошли в один кластер, что может свидетельствовать о их близком социально-экономическом положении. Для остальных групп можно определить устойчивые специфические характеристики, которые поддаются интерпретации.

Кроме того, мы показали эффективность совместного применения иерархического и итеративного кластерного анализа, что позволило нам задать количество кластеров для второго алгоритма в условиях отсутствия априорных знаний о характеристиках регионов.

В рассматриваемом примере Ward's method и k-means method показали практически идентичные результаты. Субъекты Российской Федерации, для которых были получены разные значения принадлежности к кластерам, могут считаться спорными регионами. Оптимально рассмотреть вероятность их вхождения в каждый из кластеров.

Дискуссионными являются вопросы, связанные с возможностью совместного применения факторного и кластерного анализа. Кроме того, здесь не приведены метрики качества кластеризации, которые могли бы быть полезны как для выбора оптимального количества кластеров, так и принятия решения о спорных регионах. Данные недочеты могут быть устранены в последующих работах, в том числе с использованием нечетких алгоритмов кластеризации.

Литература

1. *Adolfsson A.* To cluster, or not to cluster: An analysis of clusterability methods / A. Adolfsson, M. Ackerman, N. C. Brownstein // *Pattern Recognition*. – 2019. – No 88. – P. 13–26.
2. *Amigó E.* A comparison of extrinsic clustering evaluation metrics based on formal constraints / E. Amigó, J. Gonzalo, J. Artiles, F. Verdejo // *Information Retrieval*. – 2009 – Vol. 12, No 4. – P. 461–486.
3. *Davies D. L.* A Cluster Separation Measure / D. L. Davies, D. W. Bouldin // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-1*. – 1979. – No 2. – P. 224–227.
4. *Ding C.* K-means clustering via principal component analysis / C. Ding, X. He // In: *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Machine Learning, ICML '04, ACM*. – New York, 2004.
5. *D'Urso P.* Fuzzy clustering of mixed data / P. D'Urso, R. Massari // *Information Sciences*. – 2019. – No 505. – P. 513–534.
6. *Halkidi M.* On clustering validation techniques / M. Halkidi, Y. Batistakis, M. Vazirgiannis // *Journal of Intelligent Information Systems*. – 2001. – Vol. 17, No 2-3. – P. 107–145.
7. *Jain A. K.* Data clustering: 50 years beyond K-means / A. K. Jain // *Pattern Recognition Letters*. – 2010. – Vol. 31, No 8. – P. 651–666.
8. *Ward J. H.* Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function / J. H. Ward // *Journal of the American Statistical Association*. – 1963. – Vol. 58, No 301. – P. 236–244.
9. *Воронцова А. А.* Сравнение алгоритмов Варда и k-means / А. А. Воронцова // *СXXXI Международные научные чтения (памяти Чехарина Е. М.): сборник статей Международной научно-практической конференции (Москва, 18 декабря 2021 г.)*. – Москва : Научная артель, 2021. – С. 15–20.

НЕКОТОРЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ ТЕОРИИ ОБОБЩЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А. В. Елисеев^{1,2}, Н. К. Кузнецов², А. С. Миронов¹

¹*Иркутский государственный университет путей сообщения*

²*Иркутский национальный исследовательский технический университет*

Аннотация. В рамках проблемы анализа вынужденных движений и реакций систем рассматриваются задачи оценки, контроля и формирования динамических состояний механических колебательных систем, образованных твердым телом, совершающим вынужденные малые установившиеся колебания под действием связанных вибрационных нагрузений силовой природы, в предположении пренебрежимо малых сил трения. Используются методы структурного математического моделирования, в рамках которых, механическим колебательным системам, рассматриваемым в качестве расчетных схем технических объектов, сопоставляются схемы эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления. В рамках задач оценки, контроля и формирования динамических состояний предложены элементы теории обобщенных динамических состояний механических колебательных систем.

Ключевые слова: структурные методы математического моделирования, механические колебательные системы, режимы динамического гашения колебаний, передаточные функции, динамическая податливость, динамические инварианты, связность внешних силовых возмущений, колебание твердого тела, карта динамических инвариантов.

Введение

Проблемы обеспечения безопасности технических объектов, находящихся в условиях вибрационных нагрузений, определяют внимание к развитию методологических основ решения задач оценки, контроля и формирования динамических состояний механических колебательных систем, используемых в качестве расчетных схем в процессе математического моделирования [1]. В качестве методологической базы решения задач оценки, контроля и формирования динамических состояний механических колебательных систем в вынужденных малых установившихся колебаниях могут быть применены структурные подходы, в рамках которых, механическим колебательным системам, рассматриваемым как расчетные схемы технических объектов транспортного или технологического назначения, сопоставляются схемы эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления [2]. Использование механических колебательных систем, образованных твердыми телами, совершающими вынужденные малые установившиеся гармонические колебания, в предположении о пренебрежимо малых силах трения, под действием связанных синфазных гармонических возмущений силовой природы представляется обоснованным на начальных этапах моделирования существенных динамических особенностей технических объектов транспортного или технологического назначения.

Оценка динамических состояний твердого тела может быть проведена на основе динамических состояний семейства точек, распределенных по поверхности твердого тела. В качестве динамической характеристики особенностей движения фиксированной точки может выступать передаточная функция системы, использующая в качестве входного сигнала внешнее гармоническое возмущение, а в качестве выходного — возмущение колебаний точки, на основе движения которой оценивается динамическое состояние твердого тела. Передаточная функция, представляющая собой отношение амплитуд колебаний фиксированных точек к ам-

плитудам силовых возмущений, может быть интерпретирована как динамическая податливость. В свою очередь, для оценки многообразия динамических состояний механических колебательных систем рассматриваются амплитудно-частотные характеристики передаточных функций, в частности, отображающих частоты резонансов и обнулений колебаний точек, а также знакоположительные формы динамических взаимодействий элементов механических колебательных систем, находящихся в условиях связанных возмущений силовой природы. Методология решения задач оценки, контроля и формирования динамических состояний механических колебательных систем предполагает развитие методов определения особенностей амплитудно-частотных характеристик в зависимости от вариационных параметров системы.

Вместе с тем, зависимости между динамическими состояниями механических колебательных систем и вариационными параметрами ещё не получили детализации представлений в полной мере.

Доклад посвящен развитию обобщенных представлений о динамических состояниях механических колебательных систем, образованных твердыми телами, находящимися в условиях связанных вибрационных нагружений силовой природы в предположении о малости сил трения.

1. Общие положения и постановка задачи

Рассматривается механическая колебательная система, образованная твердым телом с массой M и моментом инерции J , установленном на упругие элементы с жесткостями k_1 , k_2 (рис. 1). Силы трения пренебрежимо малы. Система совершает малые вынужденные установившиеся колебания под воздействием, приложенных к т. A и т. B , связанных гармонических синфазных возмущений Q_1 , Q_2 ;

$$Q_2 = \gamma Q_1, \quad (1)$$

где γ — коэффициент связности. Крепления упругих элементов реализуются в тт. A и B отстоящих на расстояниях l_1 и l_2 от центра тяжести т. O твердого тела. На линии AB выбрана точка т. H с координатой h . Для фиксированного коэффициента связности γ динамическое состояние твердого тела определяется частотой ω внешних возмущений.

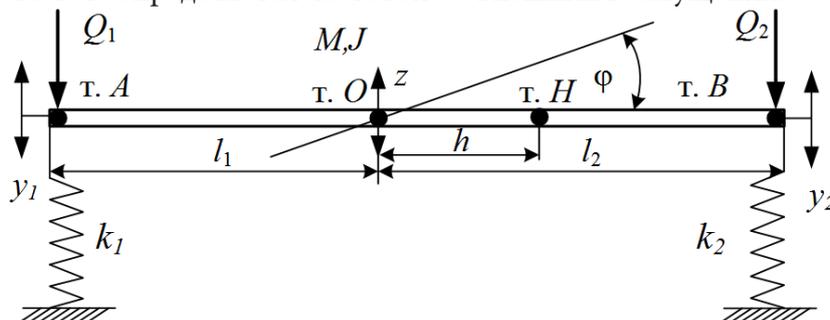


Рис. 1. Механическая колебательная система

Динамические особенности движения твердого тела проявляются в реализации критических режимов колебаний и знакопоопределенных форм динамических взаимодействий элементов системы. Для оценки динамических состояний использовано отношение амплитуд колебаний т. H к амплитудам колебаний внешних силовых возмущений, интерпретируемое как динамическая податливость, зависящая от частоты внешнего силового возмущения. Совокупность значений динамической податливости зависит от координаты т. H и коэффициента связности γ .

Задача заключается в разработке обобщенного подхода к оценке разнообразия динамических состояний, оцениваемых на основе динамической податливости в зависимости от вариационных параметров системы: коэффициента связности и координаты точки, на основе которой оценивается динамическое состояние твердого тела.

2. Математическая модель

В рамках формализма Лагранжа в качестве обобщенных координат могут быть рассмотрены $\{y_1, y_2\}$ — смещения тт. A и B твердого тела относительно положения статического равновесия и значения $\{\varphi, z\}$, где φ — угол поворота твердого тела относительно центра тяжести, z — величина вертикального смещения центра тяжести относительно положения статического равновесия (рис. 1). Системы координат $\{y_1, y_2\}$ и $\{\varphi, z\}$ связаны равенствами:

$$\begin{cases} z = ay_1 + by_2 \\ \varphi = c(y_2 - y_1) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} y_1 = z - l_1\varphi \\ y_2 = z + l_2\varphi \end{cases} \quad (3)$$

где $a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}$; $b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}$; $c = \frac{1}{l_1 + l_2}$.

Потенциальная и кинетическая энергии:

$$\Pi = \frac{1}{2}k_1y_1^2 + \frac{1}{2}k_2y_2^2, \quad (4)$$

$$T = \frac{1}{2}M\dot{z}^2 + \frac{1}{2}J\dot{\varphi}^2. \quad (5)$$

Уравнения Лагранжа 2-го рода в обобщенных координатах $\{y_1, y_2\}$ имеет вид:

$$\begin{cases} (Ma^2 + Jc^2)\ddot{y}_1 + k_1y_1 + (Mab - Jc^2)\ddot{y}_2 = Q_1 \\ (Mab - Jc^2)\ddot{y}_1 + (Mb^2 + Jc^2)\ddot{y}_2 + k_2y_2 = Q_2 \end{cases} \quad (6)$$

Система дифференциальных уравнений (6) после преобразований Лапласа:

$$\begin{cases} ((Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1)\bar{y}_1 + (Mab - Jc^2)p^2\bar{y}_2 = \bar{Q}_1 \\ (Mab - Jc^2)p^2\bar{y}_1 + ((Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2)\bar{y}_2 = \bar{Q}_2 \end{cases} \quad (7)$$

Алгебраическая система (7) может быть представлена в виде структурной схемы (рис. 2)

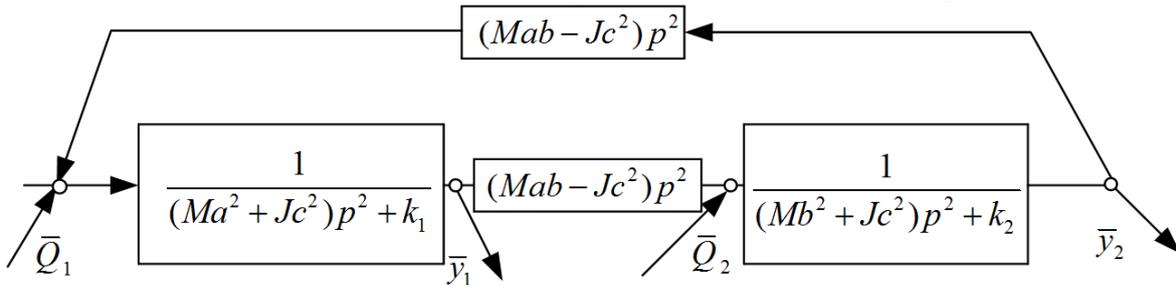


Рис. 2. Структурная схема механической колебательной системы (рис.1), $p = j\omega$ — комплексная переменная, $j = \sqrt{-1}$, ω — частота внешнего возмущения, символ «-» над переменной обозначает изображение Лапласа

Передаточные функции системы:

$$W_{11}(p, \gamma) = \left. \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} \right|_{\bar{Q}_2=0} = \frac{((Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2) - \gamma(Mab - Jc^2)p^2}{A(p)}, \quad (8)$$

$$W_{21}(p, \gamma) = \left. \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_1} \right|_{\bar{Q}_2=0} = \frac{((Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1)\gamma - (Mab - Jc^2)p^2}{A(p)}, \quad (9)$$

где $A(p) = ((Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1)((Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2) - ((Mab - Jc^2)p^2)^2$ — характеристический многочлен с корнями σ_1, σ_2 .

На основе передаточных функций (8)–(9) может быть определена динамическая податливость произвольной точки твердого тела.

3. Оценка динамических состояний с помощью интегральных характеристик динамических инвариантов

Для оценки динамических состояний т. H твердого тела построена передаточная функция:

$$W_h(p)|_{\bar{Q}_1=0} = \frac{\bar{y}_h}{\bar{Q}_1} = (a - ch) \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} + (b + ch) \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_1}. \quad (10)$$

Динамические особенности механической колебательной системы могут быть отображены на основе семейства амплитудно-частотных характеристик, для которых вариационными параметрами служат коэффициент связности и координата т. H :

$$A_h(\omega, \gamma, h) = \frac{\bar{y}_h(p, \gamma, h)}{\bar{Q}_1} \Big|_{p=j\omega}. \quad (11)$$

Каждой амплитудно-частотной характеристике может быть сопоставлен ориентированный граф, отображающий количество резонансов, частот обнуления и знакоположительных ветвей (рис. 3).

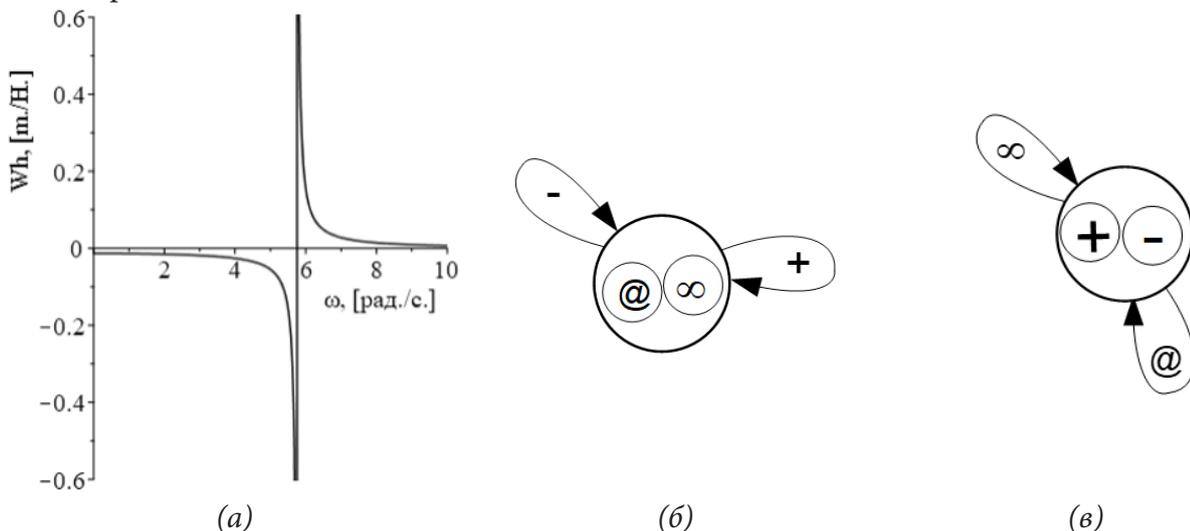


Рис. 3. Динамические особенности точки твердого тела с координатой $h = h_1$: (а) амплитудно-частотная характеристика, (б) динамический инвариант в виде графа, отображающий знакопостоянные формы динамических взаимодействий, (в) динамический инвариант в виде графа, отображающий динамическое состояния с одним резонансом

В общем случае бесконечно семейство амплитудно-частотных характеристик может быть разбито на классы, элементы которых обладают одинаковыми динамическими инвариантами. Для регуляризации бесконечного семейства амплитудно-частотных характеристик может быть использована частотная функция обнуления:

$$\omega^2(\gamma, h) = \frac{c(k_1\gamma - k_2)h + (bk_1\gamma + ak_2)}{(Mac\gamma - Mbc)h + Jc^2(\gamma + 1)}. \quad (12)$$

Частотная функция обнуления позволяет сопоставить амплитудно-частотным характеристиками динамические инварианты (рис. 4).

На основе множества координат h точек твердого тела определяется совокупность динамические инвариантов, отображающих разнообразие динамических состояний точек твердого тела для фиксированного коэффициента связности (табл. 1).

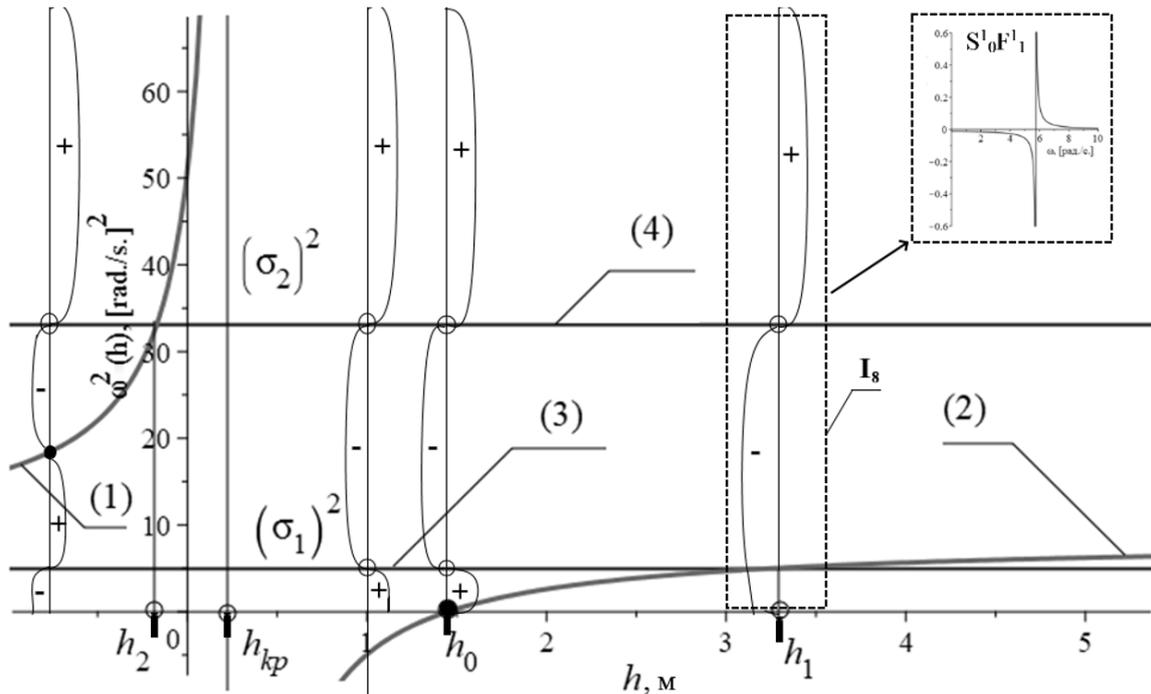


Рис. 4. Частотная функция обнуления для коэффициента связности $\gamma = 0$: h_1, h_2, h_0, h_{kp} — граничные значения координаты точки H , 1 — левая ветвь частотной функции обнуления, 2 — правая ветвь частотной функции обнуления, 3 — первая собственная частота, 4 — вторая собственная частота

Таблица 1

Распределение динамических инвариантов по координате h

	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9
<i>I</i>	$h < h_2$	$h = h_2$	$h_2 < h < h_{kp}$	$h = h_{kp}$	$h_{kp} < h < h_0$	$h = h_0$	$h_0 < h < h_1$	$h = h_1$	$h_1 < h$
<i>II</i>									
<i>III</i>									
<i>IV</i>	$S_1^2 F_2^2$	$S_0^1 F_1^1$	$S_1^2 F_2^2$	$S_0^2 F_1^2$	$S_0^2 F_1^2$	$S_1^2 F_1^2$	$S_1^2 F_2^2$	$S_0^1 F_1^1$	$S_1^2 F_2^2$
<i>V</i>	J_7	J_3	J_7	J_5	J_5	J_6	J_7	J_3	J_7

Существенные динамические особенности представлены в унифицированном виде $S_l^k F_n^m$, где k — количество резонансов, l — количество режимов обнуления амплитуды колебания координаты объекта, динамическое состояние которого оценивается, m — количество положительных форм взаимодействий, n — количество отрицательных форм динамических взаимодействий, $J_{k+l+m+n}$ — интегральная характеристика. Динамические инварианты строятся на основе известных методов.

Для фиксированного коэффициента связности γ может быть построена интегральная характеристика в виде кусочно-постоянной функции, представляющая собой алгебраическую сумму особенностей динамического взаимодействия элементов механической колебательной системы (рис. 5а).

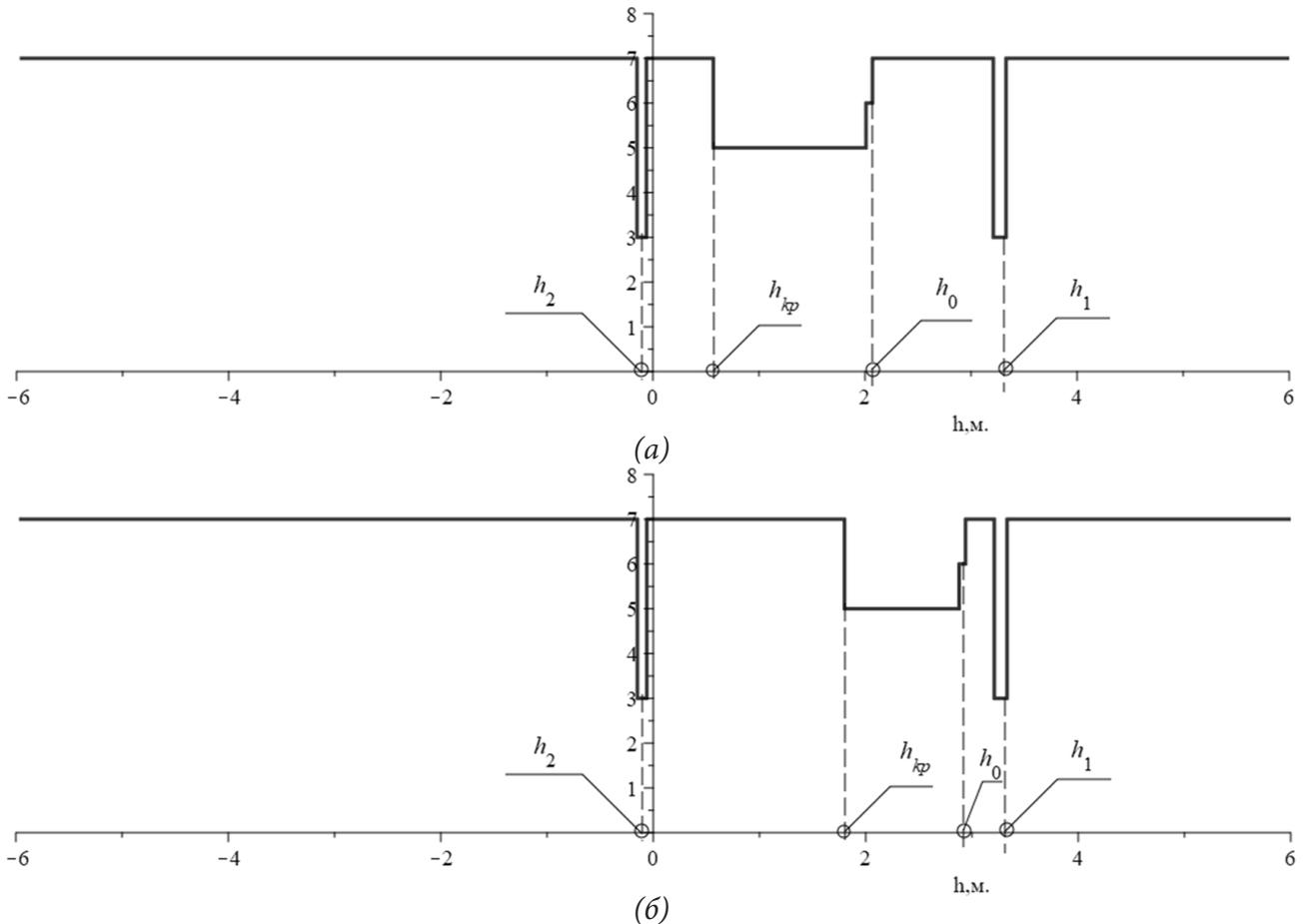


Рис. 5. Интегральные характеристики динамических особенностей твердого тела в зависимости от коэффициента связности: а) $\gamma = 0$; б) $\gamma = 0,3$

Изменение фиксированного значения коэффициента связности γ силовых возмущений Q_1 , Q_2 находит своё отражение в частичном перераспределении граничных точек, образующих разбиения множества координат точек поверхности твердого тела (рис. 5б)

4. Оценка динамических особенностей механической колебательной системы на основе карты динамических инвариантов

Сопоставление каждой паре параметров динамического инварианта позволяет построить карту динамических инвариантов. Карта динамических инвариантов (рис. 6) содержит области $\{\Omega_{ij}\}$, границы $\{\Gamma_{ij}\}$ и узлы $\{A_{ij}\}$, в которых динамические инварианты, отображающие существенные особенности взаимодействия элементов механических колебательных систем, сохраняют свои значения. Можно полагать, что в части элементов разбиения динамические инварианты сохраняют свои значения и скачкообразно изменяются при переходе из одного множества в другое.

Построенная карта динамических инвариантов (рис. 6) позволяет отображать специфические особенности динамических взаимодействий элементов механических колебательных систем.

Характерным примером использования карты динамических инвариантов может служить задача определения координаты точки динамического гашения на фиксированной частоте в зависимости от связности внешних возмущений. На фиксированной частоте внешних возмущений каждому коэффициенту связности γ может быть сопоставлена точка твердого тела, в которой реализуется режим обнуления амплитуд колебания (рис. 6в, линия 1).

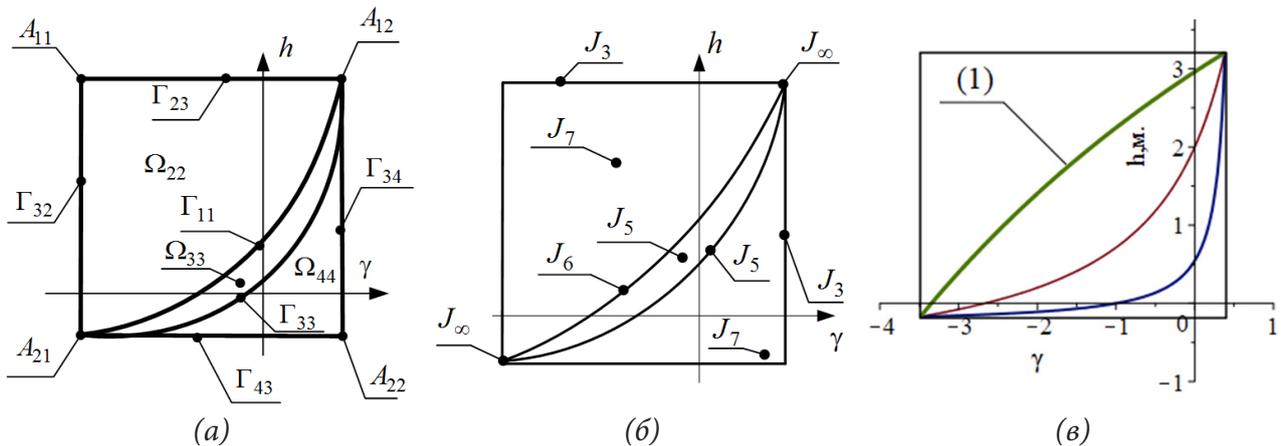


Рис. 6. Карта динамических инвариантов. (а) — фрагмент карты динамических инвариантов, образованной областями Ω_{ij} , границами Γ_{kl} и точками A_{nm} ; (б) — распределение динамических инвариантов по множествам карты динамических инвариантов; (в) — траектория характеристик динамических режимов на карте динамических инвариантов

Заключение

В рамках методологии структурного математического моделирования представлены элементы теории обобщенных динамических состояний механических колебательных систем, находящихся в условиях связанных вибрационных нагрузений, в предположении малости сил трения.

В качестве обобщенного динамического состояния предложено рассматривать так называемый динамический инвариант, отображающий существенные особенности совокупности динамических состояний механической колебательной системы в виде ориентированных графов, количества вершин и дуг которого равны количеству резонансов, частот обнуления амплитуд колебаний, положительных и отрицательных форм динамических взаимодействий элементов.

Показано, что бесконечному множеству амплитудно-частотных характеристик может быть сопоставлено конечно множество динамических инвариантов. Общая совокупность динамических инвариантов может быть построена на основе частотных функций обнуления, которая может быть задана в неявной форме путем обнуления числителя передаточной функции, в рамках рассматриваемой задачи интерпретируемой как динамическая податливость. Частотная функция обнуления сопоставляет вариационным параметрам системы частоту внешних силовых возмущений, на которой реализуется обнуление динамической податливости; в предположении, что частота обнуления не совпадает с собственной частотой колебания системы.

Показано, что изменение одного из вариационных параметров определяет совокупность различных динамических инвариантов, распределение которых по значениям параметра может быть отображено с помощью кусочно-постоянной интегральной характеристики, сопоставляющей каждому значению вариационного параметра общее число динамических особенностей.

Показано, что совокупность динамических состояний, соответствующая одновременному варьированию двух параметров системы, может быть отображена с помощью карты динамических инвариантов, разбивающей плоскость двух вариационных параметров на конечную совокупность непересекающихся областей, границ и точек перекрещивания границ, потенциально обладающих различными динамическими инвариантами. В частности, показано, что бесконечное разнообразие динамических состояний механических колебательных систем может быть представлено в виде конечного набора обобщенных динамических состояний.

Литература

1. *De Silva, C. W.* Vibration. Fundamentals and Practice /C. W. De Silva. – Boca Raton, London, New York, Washington, D.C. : CRC Press, 2000. – 957 p.
2. *Karnovsky I. A.* Theory of Vibration Protection / I. A. Karnovsky, E. Lebed. – Switzerland : Springer International Publishing, 2016. – 708 p.
3. *Eliseev S. V.* Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling in Problems of Dynamics of Technical Objects / S. V. Eliseev, A. V. Eliseev. – Cham : Springer International Publishing, 2020. – 521 p.

ДИНАМИКА СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ЛОРЕНЦА

В. Г. Задорожний, Е. В. Шкурченко

Воронежский государственный университет

Аннотация. В работе представлено моделирование поведения системы Лоренца при фиксированных параметрах, визуализация ее решения и фазовых траекторий в среде Wolfram Mathematica 13.0 с последующим приближением притягивающих областей элементарными функциями.

Ключевые слова: аттрактор Лоренца, странный аттрактор, среда Wolfram Mathematica, аналитические приближения графиков фазовых траекторий, бифуркация решений.

Введение

Одним из важнейших открытий XX века является обнаружение хаотических режимов в нелинейных динамических системах. Такое явление называется детерминированным (или динамическим) хаосом, при котором поведение системы представляется случайным, несмотря на то, что, казалось бы, оно должно быть определенным. Конечно, наблюдения за поведением аттрактора системы Лоренца недостаточно для того, чтобы понять механизмы динамического хаоса, но все же приведенная задача представляет собой немаловажный шаг в изучении данного вопроса.

1. Система Лоренца

Математическая модель Лоренца представляет собой нелинейную систему из трех обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma(y - x) \\ \dot{y} = x(r - z) - y \\ \dot{z} = xy - bz \end{cases} \quad (1)$$

Параметры $\sigma > 1$, $r > 0$ и $b > 0$ — положительные числа, соответственно, число Прандтля, нормированное число Релея и некоторая величина, определяемая геометрией конвекционной ячейки.

Эта система была предложена Эдвардом Нортеном Лоренцем в 1963 г. как нетривиальное приближение методом Галеркина для задачи о конвекции морской воды в плоском слое. Также вышеприведенная система фигурирует в моделировании других физических процессов, например, во вращении водяного колеса, в конвекции в замкнутой петле.

Особые точки находятся путем решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \sigma(y - x) = 0 \\ x(r - z) - y = 0 \\ xy - bz = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Отсюда, система Лоренца при любых параметрах имеет нулевое положение равновесия $P_1 = (0, 0, 0)$, а помимо него, при $r > 1$, еще два: $P_2 = (\sqrt{b(r-1)}, \sqrt{b(r-1)}, r-1)$ и $P_3 = (-\sqrt{b(r-1)}, -\sqrt{b(r-1)}, r-1)$, которые при $r \rightarrow 1$ сливаются в одно нулевое, то есть $r = 1$ является бифуркационным значением, другими словами, тем, при котором наблюдается изменение количества положений равновесия.

Свойства системы (1) и исследование ее особых точек на устойчивость рассмотрены в [1, 2].

2. Моделирование системы Лоренца в среде Wolfram Mathematica 13.0

Ниже приведен программный модуль в среде Wolfram Mathematica 13.0, визуализирующий численное решение задачи Коши методом Рунге-Кутты и его фазовую траекторию, написанный для исследования динамики системы.

```

σ = 10;
r = 28;
b = 8/3;
sys={x'[t] == σ(-x[t]+y[t]), x[0]==0.1, y'[t]==x[t]*(r-z[t])-y[t],y[0]==0,z'[t] ==
y[t]*x[t]-b*z[t],z[0] == 0};
nds = NDSolveValue[sys,{x,y,z},{t,0,30}, AccuracyGoal->100, Method->»ExplicitRungeKutta»]
Plot[{nds[[1]][t], nds[[2]][t], nds[[3]][t]}, {t, 0, 10}]
ParametricPlot3D[{nds[[1]][t],nds[[2]][t],nds[[3]][t]},{t,0,30},PlotRange -> All,
AxesLabel->{x,y,z}, PlotStyle -> Thin]

```

Параметры зафиксированы, и их значения взяты из оригинальной работы Эдварда Лоренца [3], а именно: $\sigma = 10$, $b = \frac{8}{3}$, $r = 28$. При таких значениях параметров движение системы становится крайне неупорядоченным: решение, раскручиваясь по спирали в окрестности одной из неподвижных точек в течение произвольного отрезка времени переходит в окрестность другой неподвижной точки и далее продолжает двигаться таким же образом. Оставаясь в ограниченной области фазового пространства, траектория представляет собой сложную структуру — странный аттрактор. Начальная точка — $(0.1, 0, 0)$. На рис. 1 и рис. 2 представлены результаты работы программы.

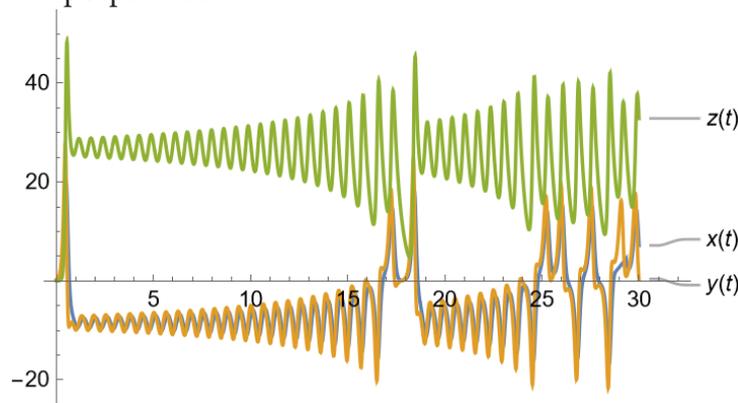


Рис. 1. График решения

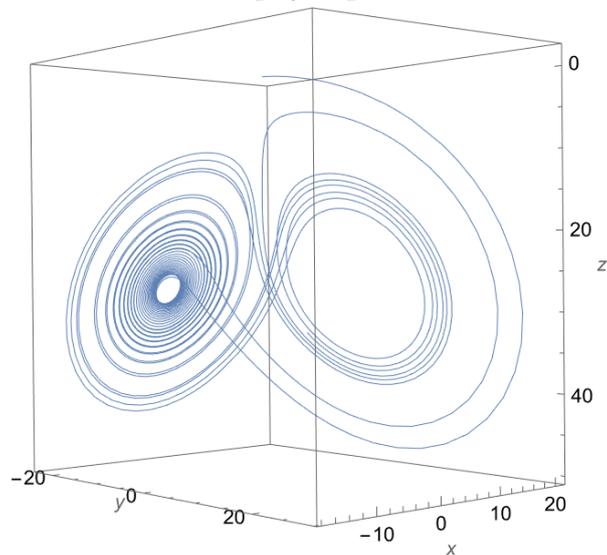


Рис. 2. Фазовая траектория

3. Приближение притягивающих областей системы при фиксированных параметрах

Из приведенных выше фазовых траекторий видно, что притягивающие области напоминают окружности, поэтому в качестве приближающих функций взяты функции вида:

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + A \sin(\omega t) \\ y(t) = y_0 + A \cos(\omega t) \\ z(t) = z_0 + A \sin(\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

В качестве (x_0, y_0, z_0) взята одна из точек равновесия, найденная из системы (3) — $P_3 = (-6\sqrt{2}, 6\sqrt{2}, 27)$, ω — период, найденный путем подбора, исходя из графиков решения. A — амплитуда, взятая минимальной, чтобы получить примерную границу области. В результате были подобраны функции:

$$\begin{cases} x(t) = -6\sqrt{2} + 1.5 \sin(2\pi t) \\ y(t) = -6\sqrt{2} + 1.5 \cos(2\pi t) \\ z(t) = 27 + 1.5 \sin(2\pi t) \end{cases} \quad (4)$$

В качестве приближения второй области аналогичным образом подобраны функции:

$$\begin{cases} x(t) = 6\sqrt{2} + 7 \sin(2\pi t) \\ y(t) = 6\sqrt{2} + 7 \cos(2\pi t) \\ z(t) = 27 + 7 \sin(2\pi t) \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 3, рис. 4 и рис. 5 представлены графики $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$, найденные численно с помощью встроенной функции Wolfram Mathematica и график приближения на промежутке времени от 0 до 35.

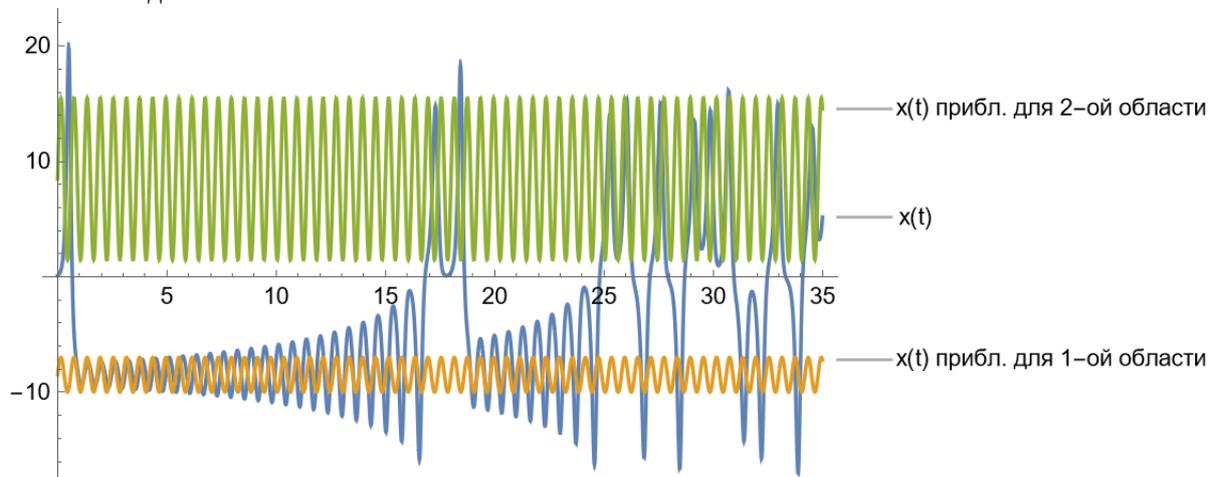


Рис. 3

Для того, чтобы реализовать переход из окрестности одной точки равновесия в окрестность другой, функция выбрана периодической. Сравнение графиков фазовой траектории, полученной численным решением системы и графиков функций (5), (6) представлено на рис. 6, где для наглядности также отмечены особые точки $P_2 = (6\sqrt{2}, 6\sqrt{2}, 27)$ и $P_3 = (-6\sqrt{2}, 6\sqrt{2}, 27)$

При таком определении функций только обозначаются притягивающие области, но не связь между ними. Положим тогда x_0, y_0 и A функциями от t , чтобы уравнения (3) приняли вид:

$$\begin{cases} x = (t - [t])(-1)^{[t]} 6\sqrt{2} + (1 - (t - [t]))(-1)^{[t]} (-6\sqrt{2}) + 7(1 + 0.2 \cos(0.7\pi t)) \sin(2\pi t) \\ y = (t - [t])(-1)^{[t]} 6\sqrt{2} + (1 - (t - [t]))(-1)^{[t]} (-6\sqrt{2}) + 7(1 + 0.2 \cos(0.7\pi t)) \cos(2\pi t) \\ z = 27 + 3.5 \sin(2\pi t) \end{cases} \quad (6)$$

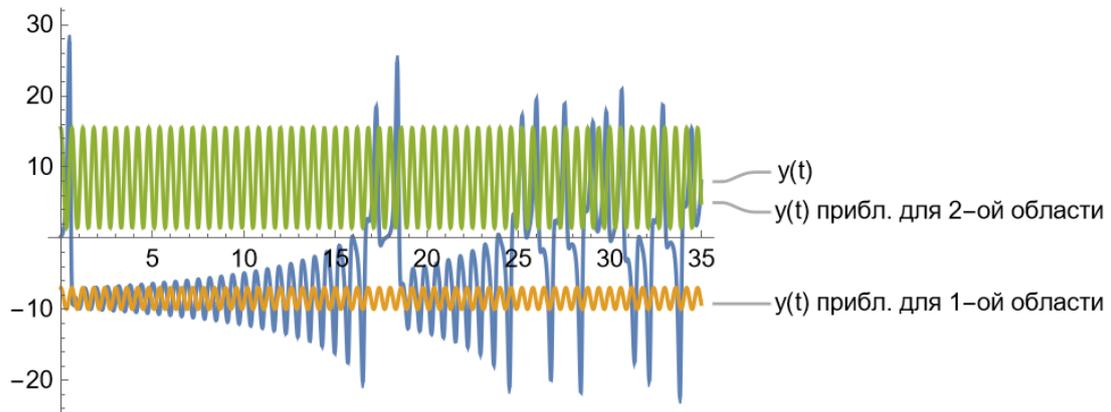


Рис. 4

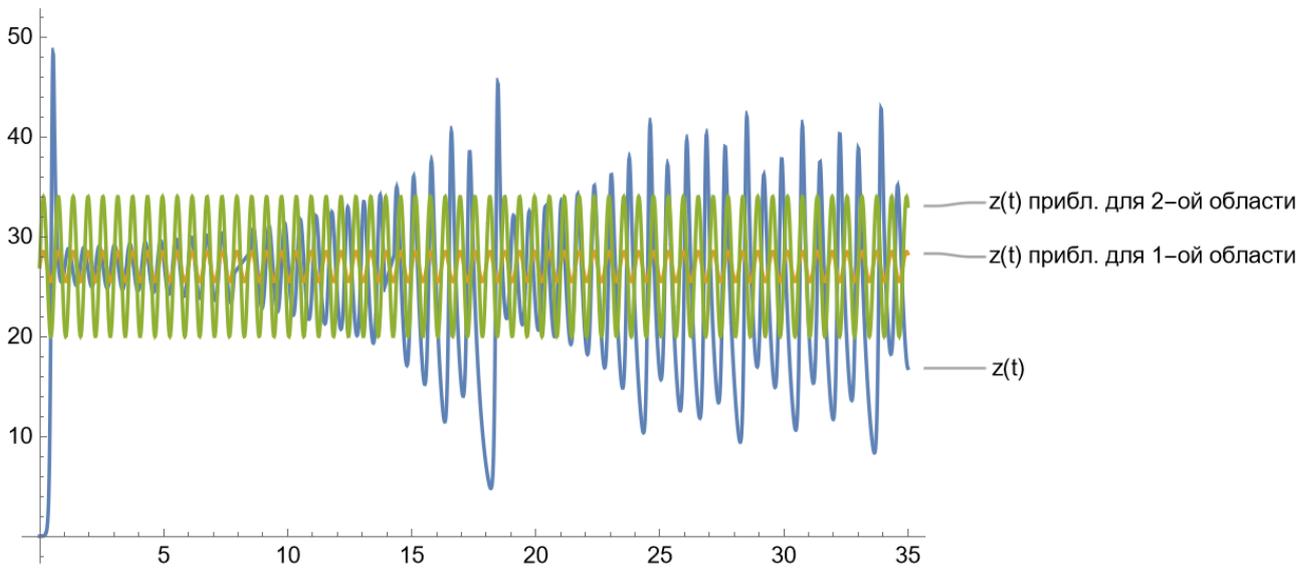


Рис. 5

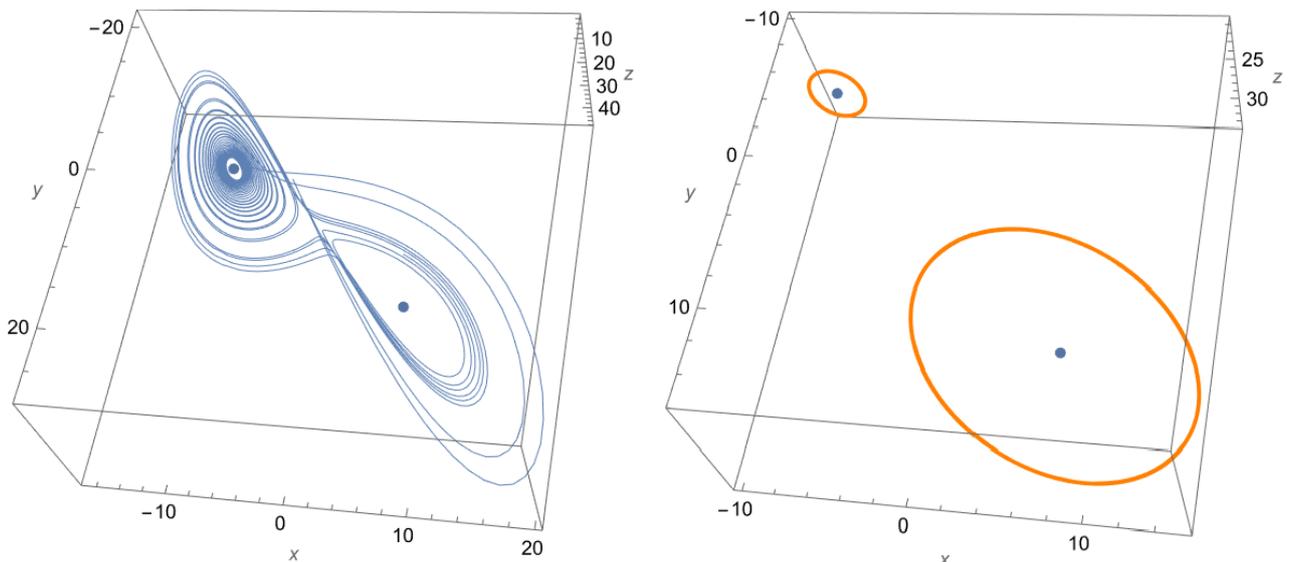


Рис. 6

Такое определение функций обеспечивает связь между двумя притягивающими областями и накручивание траекторий вокруг них. Графики функций (6) приведены на рис. 7.

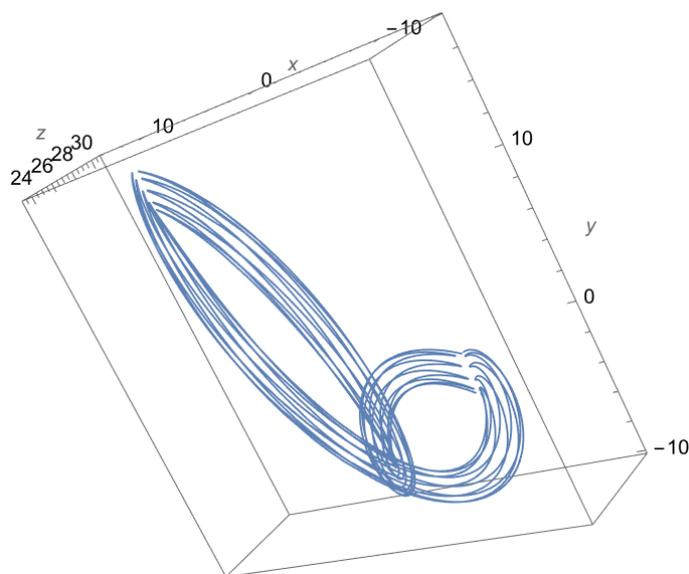


Рис. 7

Заключение

Поведение решений системы уравнений Лоренца традиционно изучают численными методами. Аналитические решения системы неизвестны, хотя аналитические формулы обычно позволяют более детально изучить поведение систем. В данной работе выведены приближенные формулы, графики которых близки к графикам решений, полученных для системы Лоренца численными методами. Возникает вопрос: как нашли аналитические выражения для траекторий системы Лоренца? Мы единственное что можем ответить, следуя Лескову: «а мы так, “... глаз пристрелявши”».

Литература

1. Гринченко В. Т. Введение в нелинейную динамику: Хаос и фракталы / В. Т. Гринченко, В. Т. Мацыпура, А. А. Снарский. – Москва : ЛКИ, 2007. – 264 с.
2. Кузнецов С. П. Динамический хаос: курс лекций / С. П. Кузнецов. – Москва : Издательство Физико-математической литературы, 2001. – 296 с.
3. Лоренц Э. Н. Детерминированное непериодическое движение / Э. Н. Лоренц // Странные аттракторы. – Москва, 1981. – С. 88–116.

МЕХАНИЗМЫ РЕСТРУКТУРИЗАЦИИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В. П. Квитко, В. В. Степин

Воронежский государственный университет

Аннотация. В работе изучается актуальность и необходимость использования межотраслевого баланса в современной экономике как инструмента, позволяющего правильно распределять имеющиеся ресурсы. Производятся экспериментальные расчеты модели на примере Воронежской области. Выявляется необходимость учета производственной лагуны и ее влияние.

Ключевые слова: межотраслевой баланс, величина валового выпуска, производственная лагуна, валовой региональный продукт, конечный продукт, коэффициенты прямых затрат.

Современные реалии показывают необходимость изменения как государственного управления в сфере экономики, так и регионального. И так как мы живем в мире цифровых технологий, то и развитие должно происходить с использованием имеющихся возможностей, которые значительно усилят эффективность управления экономикой. В связи с этим стоит вопрос о создании платформы, которая помогала бы грамотно распределять имеющиеся ресурсы региона или страны в целом и своевременно предпринимать необходимые меры для поддержания стабильности экономики. В связи с этим ключевым звеном должно стать использование межотраслевого баланса, благодаря ему можно увидеть слабые места в той или иной отрасли, либо потенциальные точки развития. Вследствие этого, учитывая актуальность данной модели как системного механизма анализа межотраслевых цепочек, Федеральная служба государственной статистики выпустила приказ от 7.07.2021 N 392 «Об утверждении указаний по заполнению форм федерального статистического наблюдения за затратами на производство и продажу продукции (товаров, работ, услуг) за 2021 год». Собранные данные будут использоваться в дальнейшем для построения модели межотраслевого баланса. Суть межотраслевого баланса состоит в том, чтобы рационально распределить имеющиеся в наличии ресурсы, такие как финансовые, трудовые, материальные и т. д., но не просто распределить, а исходя из потребностей в этих ресурсах. Межотраслевой баланс направлен на сохранение и поддержание баланса в экономике.

Экономическая система предполагает наличие отраслей, которые производят товар, отличный от продуктов других отраслей. Помимо этого, любая отрасль нуждается в ресурсах, необходимых для производства своего продукта, эти ресурсы производят другие отрасли, именно поэтому каждая из них выступает в качестве производителя и потребителя. По своему экономическому содержанию межотраслевой баланс делится на три раздела, каждый из которых отражает различные стороны процесса расширенного производства в системе. При этом мы не можем использовать стандартную модель межотраслевого баланса, так как необходимо учитывать влияние объектов, которые находятся за пределами рассматриваемой системы, на примере региона это могут быть объекты, которые административно не подчинены данной области. Статистика показывает, что величина валового выпуска, полученная в результате функционирования региона с использованием местных трудовых ресурсов, образуется в результате функционирования объектов, которые организационно не подвластны административному центру. Это приводит к тому, что ВРП региона, на территории которого зарегистрирован управляющий центр компании, значительно завышен, а ВРП региона, на котором расположены филиалы, наоборот занижен. Полученная ситуация говорит о необходимости учета данных объектов хозяйственной деятельности при описании экономики региона и мо-

делировании его развития, в дальнейшем совокупность данных объектов будет называться производственной лакуной.

В качестве эксперимента на основе МОБ за 2015 год и данных за 2020 год была построена модель межотраслевого баланса Воронежской области за 2020 год с учетом лагун (дополнительный $n + 1$ элемент), представленная на рис. 1.

	1	2	3	4	5	6	6+1	Y_i	X_i
Обрабатывающее производство	12515,4	2662,9	6990,0	5325,7	3574,9	3594,9	-16250,1	48157,7	66571,3
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	703,0	860,0	1263,0	2033,9	1492,6	196,8	14612,4	2270,6	23432,4
Сельское хозяйство	5216,0	723,3	1599,8	61,9	21,5	2304,5	-9644,8	41816,6	42098,7
Оптовая и розничная торговля	4444,9	706,9	3481,7	8925,1	9181,4	7608,5	-16118,3	70137,4	88367,7
Строительство	3963,1	345,5	167,6	690,9	444,6	509,6	1260,4	9719,8	17101,5
Транспорт и связь	3386,1	720,9	450,8	663,7	282,3	311,6	12814,8	2143,7	20773,9
Лагуна	12067,0	13293,5	21494,5	58967,8	1004,6	-2293,4			
Прибыль, млн руб.	14741,2	876,7	3140,4	2696,7	483,2	658,5			
Норма амортизации(средняя)	4896,3	2454,5	2415,2	5118,0	130,0	7228,6			
Труд, млн руб.	4638,3	788,3	1498,8	3884,0	486,4	654,4			
Валовой выпуск	66571,3	23432,4	42098,7	88367,7	17101,5	20773,9			

Рис. 1. МОБ за 2020 год

Далее рассмотрим межотраслевой баланс для определения валового продукта региона с учетом данных по лагунам и без их учета. Для отыскания регионального валового продукта на основе информации о межотраслевых потоках используется модель Леонтьева:

$$\begin{cases} (E - A)X = Y \\ X \geq 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $A = (a_{ij})$ — матрица межотраслевого потока из i -й отрасли в j -ю, $X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix}$ — вектор валового выпуска, $Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}$ — вектор конечного продукта, E — единичная матрица. Таким образом, для отыскания вектора валового выпуска X необходимо решить следующее уравнение:

$$X = Y(E - A)^{-1}. \quad (2)$$

Рассчитаем матрицу $A = (a_{ij})$, где $a_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_j}$. Рассчитанная матрица коэффициентов прямых затрат приведена на рис. 2.

Далее получаем вектор регионального валового продукта без учета лагун:

$$X = \begin{pmatrix} 1,807 \\ 1,445 \\ 1,542 \\ 1,310 \\ 2,303 \\ 2,065 \end{pmatrix}.$$

	1	2	3	4	5	6
Обрабатывающее производство	0,188	0,114	0,166	0,060	0,209	0,173
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	0,011	0,037	0,030	0,023	0,087	0,009
Сельское хозяйство	0,078	0,031	0,038	0,001	0,001	0,111
Оптовая и розничная торговля	0,067	0,030	0,083	0,101	0,537	0,366
Строительство	0,060	0,015	0,004	0,008	0,026	0,025
Транспорт и связь	0,051	0,031	0,011	0,008	0,017	0,015

Рис. 2. Матрица прямых затрат

Теперь произведем расчеты, учитывая данные межотраслевого потока лакуны. Получаем вектор валового продукта с учетом лакуны:

$$X^* = \begin{pmatrix} 3,539 \\ 4,253 \\ 4,325 \\ 4,470 \\ 4,932 \\ 3,508 \\ 3,953 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что вполне логичным является увеличение валового выпуска при учете лакуны, так как в данном случае получается, что присутствует потребность в продукции за пределами региона и потому объем произведенного продукта гораздо выше. То есть важнейшим аспектом при построении модели межотраслевого баланса и разработки на ее основе цифровой платформы является учет производственных лакун.

Литература

1. Баева Н. Б. Математические методы поддержки процесса перехода региональных экономических систем в режим устойчивого развития : монография / Н. Б. Баева, Е. В. Куркин ; Воронежский государственный университет. – Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2015. – 180 с.
2. Баева Н. Б. Математические методы исследования свойств производственной лакуны / Н. Б. Баева, Е. В. Куркин // Экономика и математические методы. – 2015. – 93 с.
3. Куркин Е. В. Модели и методы поддержки процесса перехода региональных экономических систем в режим устойчивого развития: дис. к.э.н.: 08.00.13 / Е. В. Куркин. – Воронеж, 2014. – 175 с.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА СИНХРОННО-ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ

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

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

Аннотация. В статье рассматривается способ повышения эффективности работы промышленных энергосетей путём цифрового мониторинга состояния всей энергосети (таких параметров, как мощность, сдвиг фаз, частота) в реальном времени с применением технологий синхронно-векторных измерений. Авторами разработан и сконструирован прототип программно-аппаратного комплекса синхронно-векторных измерений, аппаратная часть которого включает в себя GPS-синхронизированный АЦП на базе микроконтроллера, а программная часть — непосредственно программирование микроконтроллера, а также веб-сервер для оперативной обработки снятых показаний.

Ключевые слова: синхронно-векторные измерения, электроэнергетика, энергоэффективность, цифровые подстанции, энергосети, электросети, цифровая обработка сигналов, микроконтроллеры, энергосбережение, GPS/ГЛОНАСС, программно-аппаратный комплекс, системы диагностики электросетевого оборудования.

Введение

Современная энергетика в настоящее время сталкивается с целым рядом серьёзных проблем. Ввиду активной электрификации различных человеческих сфер деятельности потребность в энергоресурсах нарастает с каждым годом. Также важно отметить современную тенденцию по переходу к «зелёной энергетике» и возобновляемым энергоресурсам [6]. Такой подход, конечно, положительно сказывается на экологии, однако источники «зелёной» энергии имеют более низкую эффективность. Совмещая падение генерируемых мощностей с повышением потребляемых, получаем острую необходимость в контроле и устранении любых нежелательных потерь на пути от производителя электроэнергии к её потребителю.

Таким образом, современная энергетика остро нуждается в средствах мониторинга и управления генерируемой и передаваемой электроэнергией [3, 7]. Кроме того, если рассматриваемая сеть имеет большую протяженность, возникает проблема синхронизации полученных измерений. Ведь для принятия критических решений о перераспределении генерируемых мощностей необходима высокая точность сведений о состоянии сети в реальном времени.

Для решения этой проблемы современная промышленность использует устройства на базе синхронно-векторных измерений (УСВИ), где используется синхронизация времени глобальными позиционирующими системами, такими как GPS и ГЛОНАСС.

Задача синхронизации актуальна для многих приложений, включая системы промышленного назначения в телекоммуникациях, банковском секторе, военном деле, нефтегазовой и транспортно-логистической отраслях, где используется обработка данных в реальном времени. Данное исследование концентрирует внимание на применении УСВИ в энергетике.

1. Метод синхронно-векторных измерений

1.1. Устройство фазовых измерений РМУ

Синхронно-векторные измерения (СВИ) (англ. Synchrophasor Measurements) — это технология множественных одновременных измерений одного или нескольких параметров протя-

жённой системы посредством анализа разности частот, фаз напряжений и токов в разных её участках. Ярким примером области применения такой технологии являются электрические подстанции и линии электропередач между ними. Синхронизация в таких системах осуществляется путём координирования с глобальными позиционирующими системами (GPS, ГЛОНАСС).

В основе СВИ лежит цифровое устройство фазовых измерений — PMU (Phasor Measurement Unit) (рис. 1), способное оценить с высокой точностью синхрофазу, частоту и первую производную частоты по времени измеряемых напряжений и токов. **Синхрофаза или синхровектор** — это амплитуда и угол сигнала синусоидальной формы (тока или напряжения), измеренного в конкретный момент времени. Процесс измерения координируется международным временным стандартом UTC [2].

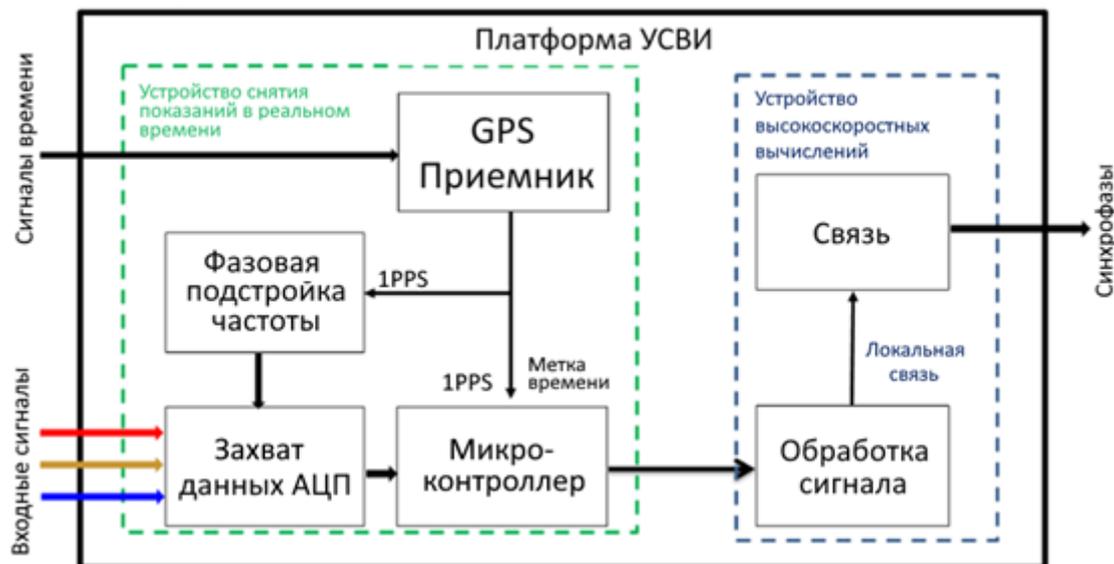


Рис. 1. Блок-схема устройства фазовых измерений (PMU) [4]

Сигнал поступает в PMU сразу с преобразователя напряжения и тока. Далее производится его дискретизация. Время дискретизации сигнала является постоянным и базируется на точном времени от геопозиционирующих систем, работающих с микросекундной точностью. Для дискретизации сигнала после его фильтрации используется АЦП (аналого-цифровой преобразователь). Полученные данные формируются в специальный цифровой пакет, к которому прикрепляется временная метка, и далее отправляются в концентраторы фазовых данных PDC (Phasor Data Concentrators). PDC представляют собой специальные накопительные устройства, используемые для хранения данных в режиме оффлайн, а также дальнейшей их отправки для анализа состояния системы в реальном времени.

Таким образом на основе получаемых PMU векторных измерений параметров сети осуществляется мониторинг состояния энергооборудования и, как следствие, создание современных интеллектуальных систем управления энергосетями.

1.2. Методы синхронизации точного времени

Синхронизация времени в промышленных сетях необходима для согласования работы устройств и приложений, осуществляющих обработку данных в режиме реального времени. Синхронизация также требуется в системах мониторинга и управления с целью протоколирования возникающих событий и своевременного реагирования.

Существует несколько методов синхронизации времени. В **одностороннем методе** ведущие часы (Master) отправляют информацию о времени на ведомые часы (Slave). Ведомые ис-

пользуют полученные данные, учитывая задержку на передачу информации, для синхронизации своего времени. Такой метод может быть использован только в тех системах, где есть передачи данных и путь от ведущих часов к ведомым не изменяется. В противном случае при синхронизации будет некорректно рассчитываться задержка.

В *двустороннем методе* между ведущими и ведомыми часами создаётся двусторонняя связь. Необходимость в такой конструкции возникает для корректного определения задержки на передачу данных при синхронизации по сети. Ведущие и ведомые часы обмениваются сообщениями с метками времени, после чего рассчитывается задержка, которая учитывается в алгоритмах синхронизации.

В зависимости от решаемых задач могут потребоваться разные уровни точности синхронизации времени. В табл. 1 приведена точность некоторых методов синхронизации времени стандарта IEEE 1588 [1].

Таблица 1

Точность различных методов синхронизации времени стандарта IEEE 1588

	Точность	Метод синхронизации	Сеть
GPS	< 1 мкс	Односторонний	Беспроводная
1PPS	< 1 мкс	Односторонний	Отдельная проводная
IRIG-B	10 мкс–1 мс	Односторонний	Отдельная проводная
NTP	0,5–100 мс	Двусторонний	Интернет
SNTP	1–50 мс	Двусторонний	Локальная
PTP	< 1 мкс	Двусторонний	Локальная

Из табл. 1 можно сделать вывод, что наиболее точным и наиболее подходящим методом синхронизации в протяженных сетях является GPS (ГЛОНАСС). В проведённом исследовании использовались целых три метода синхронизации, последовательно преобразуемых друг в друга: GPS → IRIG-B → 1PPS.

2. Разработка прототипа УСВИ

2.1. Общая структурная схема устройства

Основными блоками системы синхронно-векторных измерений, как уже отмечалось ранее, являются подсистема синхронизации времени по GPS/ГЛОНАСС, блоки векторных измерений PMU, концентратор данных векторных измерений PDC (Phasor Data Concentrator), а также коммуникационное оборудование и программное обеспечение (ПО) для визуализации полученных данных.

Фундаментом такой системы является синхронизированный по времени аналого-цифровой преобразователь (АЦП) (рис. 4), каждый отсчет которого снабжен меткой глобального времени, что позволяет сравнивать вычисленные параметры сигналов в одном месте с параметрами сигналов из других мест в широком географическом пространстве.

На вход схемы подаётся нормализованный измеряемый аналоговый сигнал в виде напряжения, изменяющегося в пределах 0–3,3 В. Далее по сигналу PPS запускается серия оцифровки полученного сигнала при помощи АЦП. Каждое дискретное значение записывается в память контроллера, формируя в ней блоки (страницы) с показаниями с обоих входных каналов за несколько последних секунд. Каждому блоку присваивается метка времени. По мере необходимости верхний уровень запрашивает последнюю сформированную страницу с измерениями из памяти контроллера. Передача данных осуществляется через последовательный порт по USB.

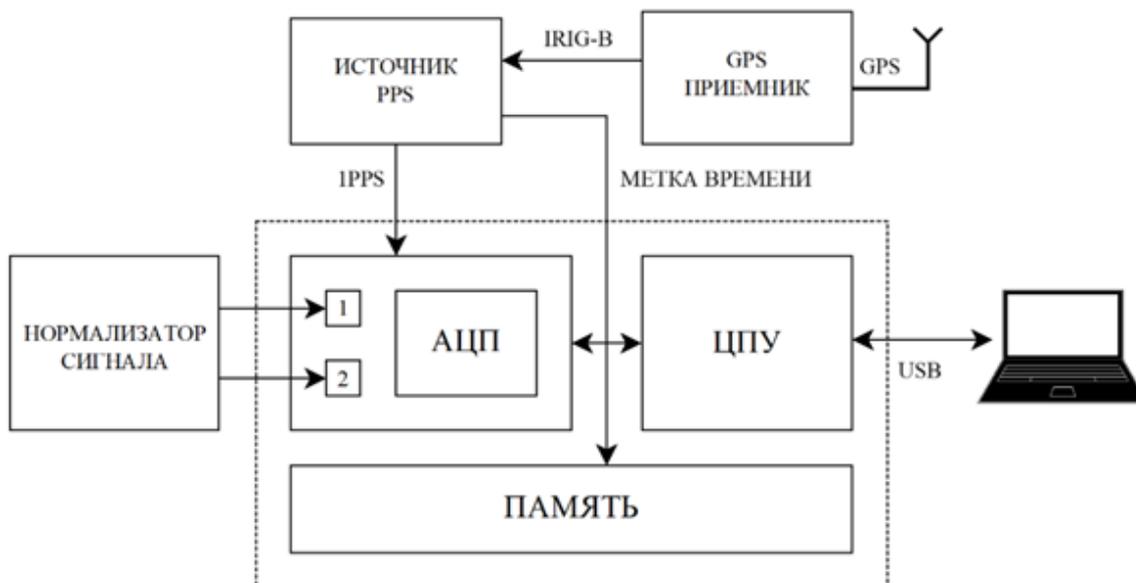


Рис. 2. Упрощенная структурная схема GPS-синхронизированного АЦП

Стоит отметить, что выделенные на рис. 4 нормализатор измеряемого сигнала, источник PPS и GPS-приёмник не являются частью микроконтроллера, а их задачи выполняют отдельные устройства. Границы микроконтроллера обозначены пунктирной линией.

Нормализатор сигнала необходим для преобразования некоторого входного сигнала в колебания напряжения в рабочих пределах используемого АЦП. В качестве источника нормализованного сигнала в разработанном прототипе используется цифровой генератор сигналов Zet210 от компании ZetLab. Генератор создаёт два синусоидальных сигнала с частотой 50Гц, смещённые по фазе друг относительно друга на некоторое значение. Амплитуда генерируемых сигналов находится в пределах 0–2 В. Управление генератором происходит через компьютер в приложении ZetLab. Для снятия контрольных показаний на выходе генератора используется осциллограф.

Для формирования сигнала точного времени в формате IRIG-B в прототипе используется оборудование компании «Prosoft Systems», состоящее из судовой GPS-антенны и источника сигнала синхронизации. Сформированный сигнал далее поступает на программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС) FPGA ALTERA MAXII, где происходит извлечение временной метки и выдача импульса 1PPS (Pulse Per Second — импульс в секунду).

Наконец, в качестве микроконтроллера в прототипе используется плата STM32 линейки Nucleo-144 Discovery с микроконтроллером STM32F767Zi. На одной плате имеется всё необходимое для разработки, включая точный высокочастотный АЦП, а также модуль отладчика и программатора ST-Link.

Рабочая установка в собранном виде, включающая все описанные выше блоки, изображена на рис. 3.

2.2. Программное обеспечение

В качестве языка программирования для микроконтроллера был выбран язык Rust. Это современный аналог языка C, мультипарадигменный высокоуровневый компилируемый язык программирования со статической типизацией, гарантирующий безопасность работы с памятью и не имеющий сборщика мусора.

В качестве среды разработки и отладки ПО для микроконтроллера был выбран современный инструментарий IntelliJ IDEA от чешской компании JetBrains. Для прошивки программы

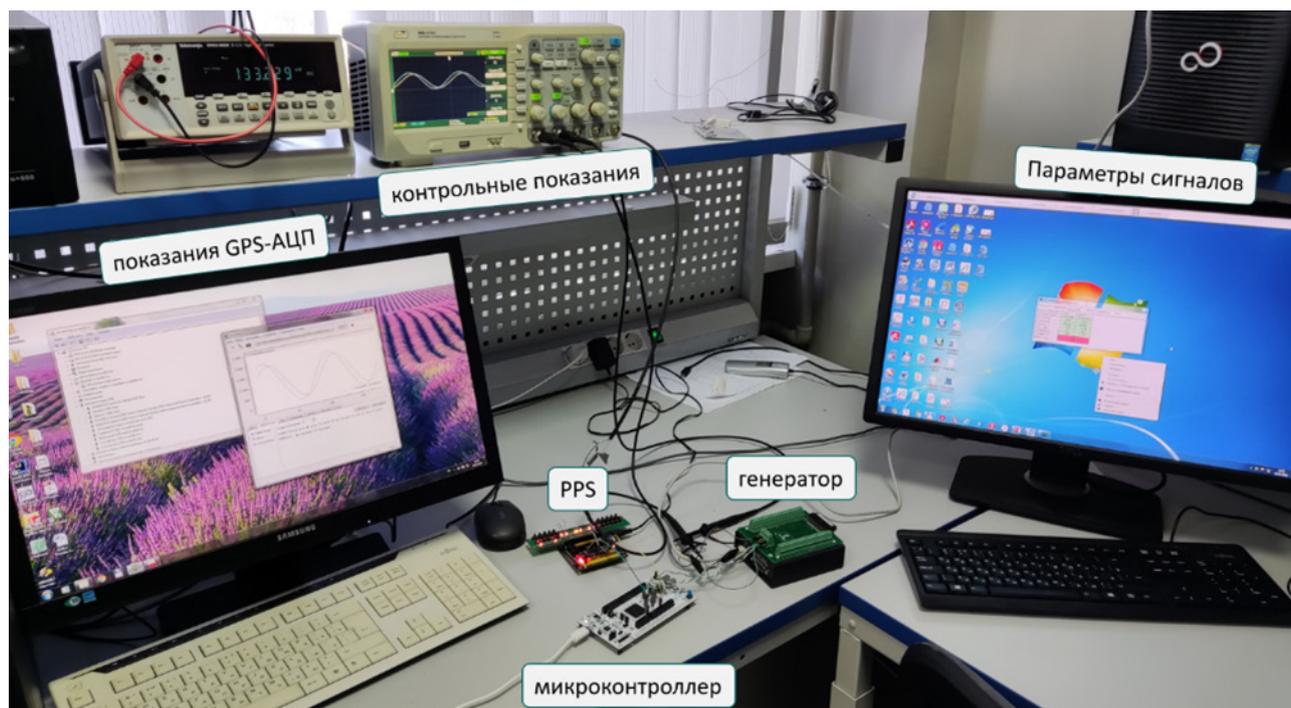


Рис. 3. Программно-аппаратный комплекс СВИ

микроконтроллера STM32F767ZI используется официальный драйвер для программатора St-Link V2-1.

Для задания параметров генерируемых сигналов используется базовая версия ПО от компании-разработчика генератора ZET210 – ZetLab Base. Для приёма измеренных показаний по серийному порту с микроконтроллера (через USB) и отправки команды для начала передачи на этапе отладки используется программа SerialPlot.

Приёмная часть установки находится под управлением OS Ubuntu (на базе ядра Linux). Такое техническое решение способствует исчезновению проблем с драйверами ST-Link и значительному приросту производительности компьютера.

2.3. Обработка результатов измерений

По запросу пользователя программа SerialPlot отправляет по серийному порту команду на микроконтроллер для передачи блока данных за последнюю секунду. Полученные показания (рис. 4) интерпретируются по заданному алгоритму таким образом, чтобы извлечь из байтовой последовательности показания различных каналов с заданным размером слова, числом каналов, размером буфера, градацией осей OX и OY и так далее. В экспериментальной установке использовался размер буфера на 12800 отсчетов, в два канала, с порядком байт от младшего к старшему, по два байта на отсчет. На рис. 4 также отчетливо видны 50 периодов синусоиды в секунду, т. е. заданная в настройках генератора частота в 50 Гц.

SerialPlot поддерживает экспорт исходных данных для построения в формате CSV. Проанализировав исходные данные в формате CSV средствами Matlab или Octave, можно получить Фурье-образ оцифрованного сигнала (рис. 5), а также представить фазу и амплитуду входных сигналов в векторном виде (рис. 6). Один из входных сигналов на рис. 6 выбран в качестве эталонного, а его фаза зафиксирована в нуле. Также на этом рисунке отчетливо видно, что разница фаз между сигналами на двух входных каналах составляет 45° . Показания в точности совпадают с параметрами генерируемого сигнала, заданными в окне настроек ZetLab.

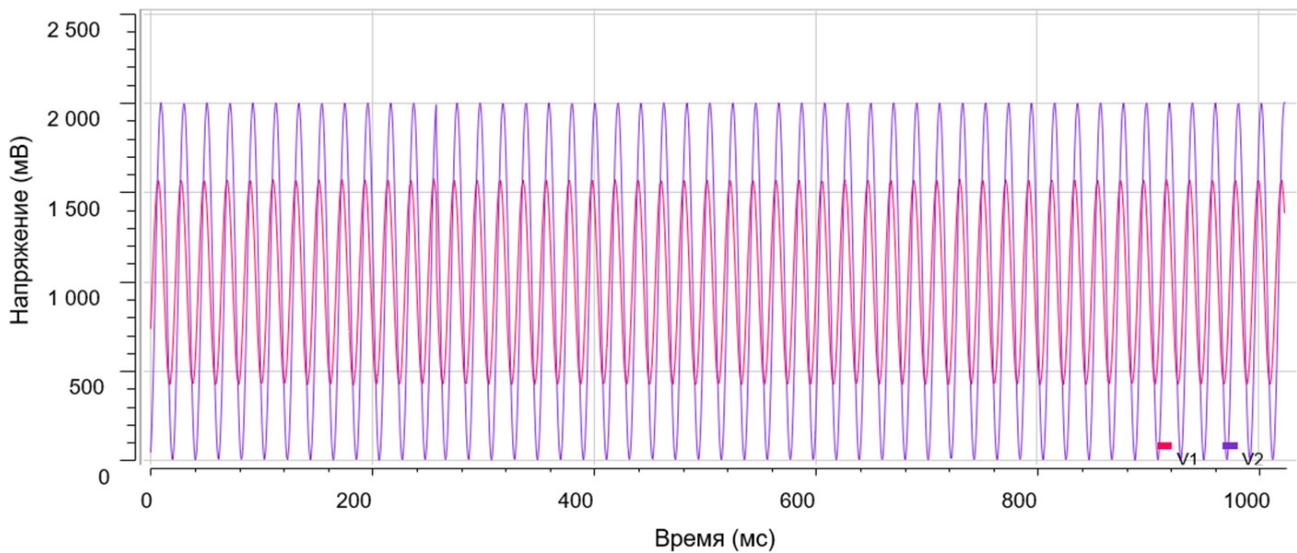


Рис. 4. Показания с GPS-АЦП за одну секунду (SerialPlot)

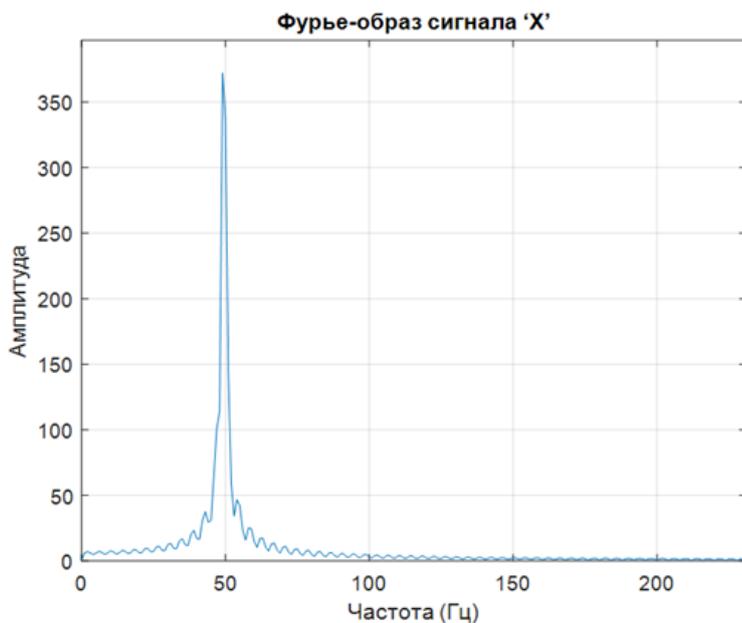


Рис. 5. Фурье-образ одного из входных сигналов с отчётливо наблюдаемым пиком на частоте 50 Гц

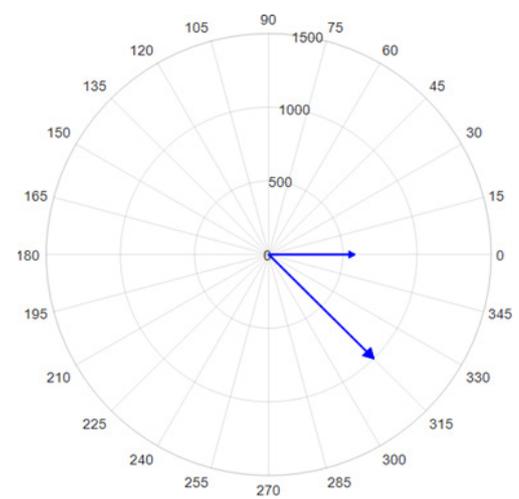


Рис. 6. Фаза и амплитуда входных сигналов в векторном виде

Способ обработки измерений в программной среде Matlab, однако, имеет некоторые неудобства, так как заставляет производить множество манипуляций в несвязанных между собой программах для извлечения, последующей конвертации и обработки полученных измерений. Ввиду этого в рамках разработки программно-аппаратного комплекса СВИ было разработано также собственное ПО, полностью реализующее процессы получения измерений, их обработки и отображения результата конечному пользователю. Все промежуточные этапы обработки между конечным пользователем и драйвером последовательного порта были заменены веб-сервером, осуществляющим процесс коммуникации с микроконтроллером. По команде пользователя сервер запрашивает показания, а затем их обрабатывает, генерируя Фурье-спектр и образы входных сигналов в векторном виде с заданными фазой и амплитудой (рис. 7). Доступ к веб-серверу может осуществляться как из локальной сети (включая ком-

пьютер, на котором исполняется бинарный файл веб-сервера), так и из сети Интернет, то есть через любое другое портативное устройство (телефон или планшет).

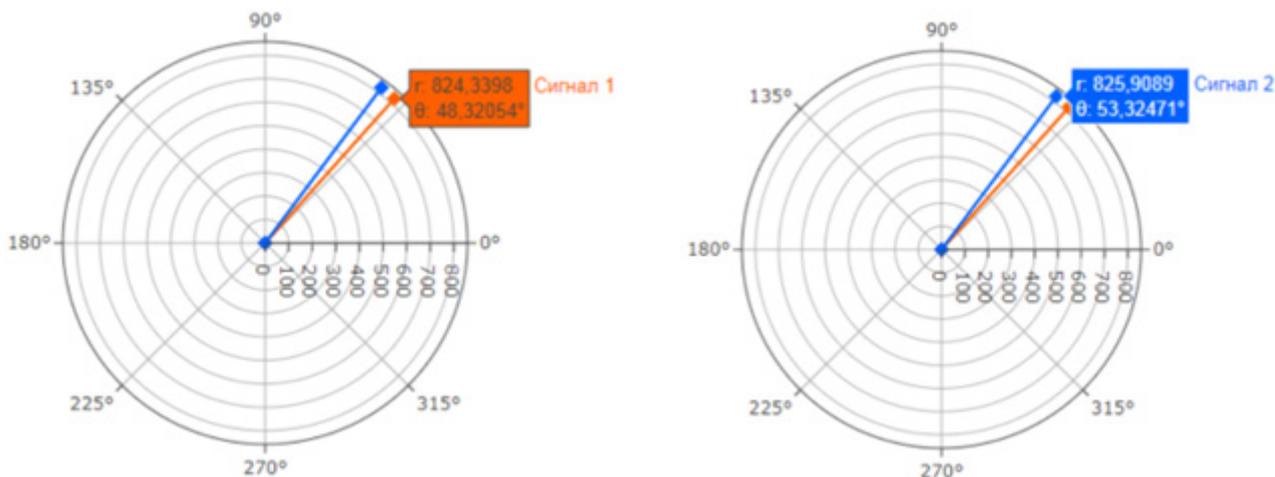


Рис. 7. Векторный вид входных сигналов с разностью фаз в 5 градусов (показания с веб-сервера)

Заключение

Устройства синхронизированных векторных измерений обеспечивают мониторинг электрических величин по всей энергосистеме в режиме реального времени. Они используются для распределения систем управления, проверки модели системы, мониторинга запаса устойчивости, контроля напряжения и фазовых углов в узлах энергосистемы, а также визуализации динамических характеристик системы.

Поскольку рынок аппаратных и программных решений для синхронно-векторных измерений является нишевым, на нём доминируют современные гиганты измерительной электроники, такие как Siemens, Valiant и Electro Industries. Такие импортные аппаратные решения относятся к категории дорогостоящих и требуют специальной профессиональной подготовки к эксплуатации, а также наличие соответствующего ПО. Более того, конструкционные и программные сведения в данной области в большинстве своём являются закрытыми и носят конфиденциальный характер. Существуют, конечно, и так называемые решения с “открытыми исходниками” [5], однако доступ к содержанию таковых решений не является в полной мере открытым, бесплатным и не описывает в деталях процесс создания устройств СВИ.

Нам же в процессе этого научного исследования фактически с нуля удалось разработать и сконструировать полноценный, работоспособный и дешёвый в изготовлении прототип программно-аппаратного комплекса синхронно-векторных измерений, потенциально не уступающий по своим характеристикам зарубежным аналогам. Аппаратная часть разработанного комплекса включает в себя GPS-синхронизированный АЦП на базе микроконтроллера, а программная часть — непосредственно программирование микроконтроллера, а также веб-сервер для оперативной обработки снятых показаний.

В связи с высокой востребованностью такого рода оборудования государственными компаниями в секторе энергетики становится очевидной необходимостью дальнейшей модернизации программно-аппаратного комплекса для применения уже в промышленных масштабах.

Литература

1. IEEE Std 1588TM – 2008, IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, IEEE Instrumentation and Measurement Society. – 2008.

2. IEEE Std C37.118.1™ – 2011, IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems, IEEE Power and Energy Society. – 2011.
3. A comprehensive survey on phasor measurement unit applications in distribution systems / M. Hojabri, U. Derch, A. Papaemmanouli, P. Bosshart // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, № 23. – P. 1–23.
4. GPS-disciplined analog-to-digital converter for phasor measurement applications / X. Zhao [et al.] // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2017. – Vol. 66, № 9. – P. 2349–2357.
5. *Laverty D.* An open-source analogue to digital converter for power system measurements with time synchronisation / D. Laverty, J. Hastings, X. Zhao // 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – 2017. – P. 1–5.
6. *Oettinger G.* Energy Roadmap 2050 / G. Oettinger. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012. – 20 p.
7. *Phadke A.* Synchronized phasor measurements and their applications. Second Edition / A. Phadke, J. Thorp. – Springer International Publishing: Power Electronics and Power Systems, 2017. – 285 p.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕХАНИЗМЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ СОЦИАЛЬНО-ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ СИСТЕМ

А. В. Калач^{1,2}, В. В. Ничепорчук³, Т. Г. Пенькова³, Е. З. Арифиллин¹

¹Воронежский государственный технический университет

²Воронежский институт ФСИИ России

³Институт вычислительного моделирования СО РАН

Аннотация. Выполнен анализ методических и прикладных проблем оценки и управления территориальными рисками с применением информационных технологий. Предложена модель формирования решений по проведению превентивных мероприятий снижения рисков на основе оригинального метода обработки данных комплексного мониторинга на примере территорий, объектов и муниципальных образований Красноярского края. Приведены примеры реализации модели для базовых рисков социально-природно-техногенных систем.

Ключевые слова: социально-природно-техногенные системы, факторы рисков, интегральный анализ показателей безопасности, территории, управленческие действия.

Введение

Обеспечение безопасности жизнедеятельности населения и объектов техносферы, сохранение экологических систем является национальным стратегическим приоритетом России [1]. Важнейшим направлением деятельности МЧС России является предупреждение чрезвычайных ситуаций (ЧС), снижение количества пожаров и происшествий на водных объектах. Сложность стратегического планирования систем защиты территорий обусловлена необходимостью учёта большого числа факторов, приводящих к реализации опасностей, их стохастического характера и сложных взаимодействий. Разнообразие рисков обуславливает необходимость междисциплинарных исследований. Развитие современных технологий получения и обработки данных, рост объёмов детализированной информации об объектах и процессах окружающей среды и техносферы, повышение точности моделей ЧС, накопление опыта управления в нештатных ситуациях, создают условия для построения принципиально новых информационно-аналитических систем комплексной поддержки управления территориальной безопасностью.

Вместе с тем наблюдается функциональный дисбаланс деятельности органов управления территориальной безопасностью. Анализ статистики событий показывает, что подавляющая часть решений по реагированию на ЧС, пожары и опасные события принимается на уровне объекта и муниципалитета. Контроль и обобщение оперативной информации на региональном и федеральном уровнях требует большого количества ресурсов и не сопровождается значимыми управленческими решениями. Формируемую информационную базу затруднительно использовать в задачах долгосрочного планирования.

В работе предлагается модель оценки и управления территориальными рисками, увязывающая данные комплексного мониторинга с конкретными стратегическими решениями по обеспечению приемлемого уровня безопасности и учитывающая географические и социально-экономические особенности территорий. Проведена апробация модели оценки состояния безопасности и мер по её повышению для муниципальных образований Красноярского края.

Обширность территорий страны обуславливает реализацию большого количества рисков природного, техногенного и биолого-социального характера. Классификатор ЧС содержит

около ста видов опасных ситуаций, связанных с угрозами жизни и потерями. Из них 5–10 рисков, наиболее вероятных для конкретной территории, можно считать базовыми.

Номенклатура базовых рисков зависит от выбора объекта исследований. Группой учёных под руководством чл.-корр. РАН Н.А. Махутова обосновано применение в оценках территориальных рисков помимо административных единиц социально-природно-техногенных систем [2, 3]. В С-П-Т системах формируются и реализуются комплексы социальных, природных и техногенных рисков, касающихся создания техники и технологий, возникновения аварий и катастрофических ситуаций, сопровождающихся гибелью людей, сокращением продолжительности жизни и ухудшением её условий, разрушением инфраструктуры и поражением природной среды [4]. В качестве объектов территориального риск-анализа рассматривались следующие С-П-Т системы: мегаполисы; промышленные агломерации; аграрные районы; арктическая зона с прилегающими акваториями; особо охраняемые природные территории и т. п.

Обеспечение природно-техногенной безопасности территорий требует разработки новых методов оценки, интегрирующих результаты расчётов рисков потенциально опасных объектов, экологических систем и т.п. Задача выбора наиболее информативного показателя для территориального риска из большого набора индивидуальных, социальных, коллективных рисков, отраслевых нормативов и т.п. до сих пор не решена [5].

Масштабное планирование комплексного обеспечения безопасности больших территорий редко рассматривается в зарубежных исследованиях. Приоритетом в публикациях является управление риском на основе оценок/расчётов по конкретному виду на локальной территории. Тиражирование опыта отдельных стран борьбы со стихией и предотвращению техногенных катастроф происходит на уровне рекомендаций комиссий ООН. Реализация стратегии «Мой город готовится» и рекомендаций Всемирной организации здравоохранения по нераспространению COVID-19 в России сопровождается значительной переработкой этих документов для учёта региональной специфики [6, 7].

В связи с бурным развитием транспортной инфраструктуры в КНР актуальна проблема оценки риска и предупреждения крупных аварий системы земляных работ при строительстве метро [8]. Для решения этой задачи программно реализованы приложения теории нечётких множеств и методов машинного обучения. Метод апробирован в городе Гуанчжоу. Большой объем данных, собранных методами GIS, GPS, разнообразными датчиками, обрабатывается с применением машинного обучения байесовскими и другими методами. Процедуры, интегрированные в платформу управления информационным моделированием зданий, управляют динамическим мониторингом, контролем и управлением рисками безопасности.

Работы международной команды исследователей собраны в монографию [9]. Основной акцент сделан на знаниях о рассматриваемых системах и процессах. Лидеры мнений в сообществе риска подчёркивают необходимость явного включения знаний в систематическую, строгую и прозрачную структуру для описания и моделирования риска. Рассмотрено применение формализованных знаний при описании, оценке рисков, разработке стратегий управления рисками. Приведены примеры многочисленных тематических исследований и их приложений в реальной жизни – инженерных приложениях в разных отраслях промышленности. Описаны перспективы и рамки для оценки рисков и управления ими, основанные на связях между знаниями и риском. Изложены ключевые концепции рисков, лежащие в основе оценок рисков и использовании тиражируемых знаний для принятия решений.

В статье [10] изложены подходы к оценке экологических рисков с использованием байесовских сетей (BNS). BNS могут синтезировать различные типы знаний и явно учитывать вероятности различных сценариев и последующей оценки вероятности и последствий неблагоприятного воздействия человеческой деятельности на окружающую среду. Оценка экологического риска (ERA) с учётом неопределённостей позволяет представить правдоподобную и обоснованную картину возможных результатов человеческой деятельности и будущих управ-

ленческих действий. Поскольку управленческие вмешательства направлены на неизвестные будущие условия, важно определить вероятные будущие результаты с помощью инструментов, которые надёжны в условиях неопределённости. Сформулированы требования к идеальной модели ERA. Она должна позволять исследовать, объяснять и прогнозировать реакции экологической системы на изменения природных и антропогенных факторов стресса при наличии неполных знаний. Основной целью процесса ERA является поиск оптимальных управленческих действий в условиях неопределённости, включая процессы идентификации рисков, анализа и оценки.

Предлагаемая модель оценки и управления рисками территорий является результатом синтеза двух известных методов: графического представления факторов рисков в виде диаграмм качества К. Исикавы [11] и метода оценки рисков «галстук-бабочка».

Диаграмма Исикавы — графический способ исследования и определения наиболее существенных причинно-следственных взаимосвязей между факторами и последствиями в исследуемой ситуации или проблеме. Она позволяет выявить ключевые взаимосвязи между различными факторами и более точно понять исследуемый процесс. Метод широко применяется в инженерии знаний, для определения факторов, влияющих на развитие проблем, предупреждению или устранению действия данных факторов [12].

Основная задача в построении диаграмм — учёт всех возможных факторов, влияющих на величину конкретного риска, реализуемого на исследуемой территории. С помощью диаграмм можно показать не только группировку факторов, но и их атрибутивные характеристики. При построении диаграмм Исикавы целесообразно ранжировать факторы, усугубляющие или нейтрализующие проблему.

В процессе разработки модели построены диаграммы для базовых рисков территорий Красноярского края, проведён комплексный анализ факторов с целью выявления их влияние на вероятность возникновения масштаб и событий. Разные способы группировки (по ведомствам, способам управления и т. п.) позволили сформировать рекомендации по оптимизации региональной системы комплексного оперативного мониторинга, организации межведомственного информационного обмена, созданию озер данных для решения задач безопасности территорий, наладить координацию ведомств для совместной реализации государственных программ [13].

Метод анализа «галстук-бабочка» (Bow Tie Analysis) используется с целью разработки мер управления профессиональными рисками. Он предполагает предварительное выявление опасностей и возможных опасных ситуаций и их источников. Данный вид анализа описывает пути развития опасных событий от причин до последствий при помощи схемы с указанием барьеров (мер управления и/или контроля) между причинами и опасными событиями, а также опасными событиями и их последствиями. При этом опасные события отображаются в виде центрального узла «галстука-бабочки». Данный метод рекомендуется применять для оценки рисков на уровне проекта/отдела, для конкретного оборудования или процесса. На основе результатов анализа обычно принимаются решения на тактическом или операционном уровнях для рисков, действующих в среднесрочном и краткосрочном временном диапазоне.

Кроме нормативно установленной локальной сферы применения метода, он хорошо масштабируется и на уровень территорий. Левая часть представляет факторы, управление которыми уменьшает реализации опасных событий, правая — масштаб последствий. В терминах управления это оценка факторов для обоснования предупредительных мероприятий и повышение готовности реагирования для смягчения последствий — уменьшения потерь.

Поскольку количество факторов риска на порядок больше перечня их видов, целесообразно введение универсальной классификации, упорядочивающей процессы анализа и формирования решений. В работе [14] с этой целью информационные ресурсы *R*, используемые информационной поддержки управления природно-техногенной безопасностью территорий,

описаны двумя подмножествами S , D , где $S, D \subset R$; S — виды информационных ресурсов, используемых для информационной поддержки управления безопасностью территорий, отражающие понятийный аппарат лиц, принимающих решения (*сведения*); D — виды информационных ресурсов, используемых в информационно-аналитических системах поддержки управления (*данные*).

Множество $S = O_1 \cup O_2 \cup O_3$, где O_1 — потенциально опасные процессы; O_2 — защищаемые объекты; O_3 — объекты управления (элементы территориальной подсистемы РСЧС). Через опасные процессы O_1 можно представить опасные события $E = O_1(\Delta t)$ — описание опасного процесса за период времени Δt и обстановку $ST = \langle O_1(t), O_2(t), O_3(t) \rangle$ — кортеж состояний характеристик территорий в конкретный момент времени. При оценивании безопасности объектов и территорий используется аналогичное разделение критериев состояния на «опасность», «уязвимость», «защищённость» [2].

Множество $D = \{d_1, d_2, \dots, d_5\}$, где d_1 — системообразующие элементы (справочники, классификаторы, реестры); d_2 — описание объектов; d_3 — описание процессов; d_4 — пространственные данные; d_5 — данные, используемые для управления процессами. При этом допускается пересечение элементов множества D .

Информационная поддержка управления включать процессы сбора, хранения и обработки данных с целью формирования решений о составе, приоритетности проведения превентивных мероприятий с расчётом необходимых ресурсов и ожидаемого эффекта. Модель позволяет проводить оперативные расчёты содержания и последствий разных вариантов решений, а также возможности сохранения в формализованном виде результатов реализации принятых решений. Такая «двухзвенная» архитектура необходима при формировании обучающих датасетов для интеллектуальных технологий и перевода уникальных решений, выработанных группами экспертов, в категорию типовых.

Количественное обоснование выбора места и объёмов проведения мероприятий по предупреждению ЧС и уменьшению их масштабов, является отображением оценок территориальных рисков. Использование в процессе оценивания больших объёмов данных комплексного мониторинга и методов аналитической обработки позволяет снизить вклад субъективного мнения экспертов. Применение консолидированных информационных ресурсов минимизирует неэффективные стратегические решения по снижению территориальных и объектовых рисков ЧС, полученных с помощью ограниченного объёма исходных данных.

Системное исследование факторов рисков детализирует факторы, их вклад в общее значение территориального риска, определяет требования к информационным ресурсам. Аналитическое оценивание позволяет количественно обосновать превентивные мероприятия по снижению рисков и приоритетности их выполнения.

Стратегическое управление базовыми рисками территорий основывается на построении и анализе модифицированных диаграмм. Здесь элементы множества S представлены форме: внизу O_1 — факторы опасности; O_2 — факторы уязвимости защищаемых объектов и территорий, требующие снижения; сверху O_3 — силы и средства единой системы предупреждения и ликвидации ЧС (объекты управления), обеспечивающие повышение защищённости. Также вверху показана группа, дополняющая множество S — «Человеческий фактор» (рис. 1). Расположение над осью показывает цель превентивных мероприятий — повышение культуры безопасности [15].

Первая цифра в двузначной нумерации факторов показывает отношение к элементам множества S , вторая — порядок или приоритетность фактора в группе.

Поскольку факторы рисков возгорания и потерь не совпадают, целесообразно исследовать их в отдельности (рис. 2). Например, характеристики элементов O_3 не влияют на вероятность возникновения пожаров. Следовательно, группа «Защищённость» остаётся не заполненной.



Рис. 1. Пример схемы управления риском возникновения пожаров



Рис. 2. Схема управления риском эскалации пожаров

На данной схеме группа «Уязвимость» имеет тройную нумерацию. Перечислены характеристики объектов и территорий в целом. Первые наиболее важны для городов с большим количеством объектов с массовым пребыванием людей, промышленных площадок. Исследование и управление факторами, характеризующими территории в целом важно при разработке мероприятий снижения рисков пожаров в сельской местности.

Приведённые схемы позволяют определить структуру данных мониторинга, включающую формы донесений и отчётности, а также систематизировать управленческие действия. Качественное описание исходного и конечного звена информационных процессов поддержки принятия решений необходимо для обоснования методов и технологий сбора, обработки и интерпретации информации, верификации и дополнения машинных решений экспертными оценками.

Заключение

Предложена новая методология анализа и управления территориальными рисками природного и техногенного характера, связывающая мониторинг опасных факторов пожаров с конкретными мероприятиями превентивного характера. Систематизация факторов позволяет обосновать структуру данных мониторинга, использовать технологии анализа данных и визуализации результатов в зависимости от задач управления. Применение оригинального метода интегрального оценивания даёт возможность расчёта вкладов разнородных показателей, характеризующих опасности, уязвимость и защищённость объектов и инфраструктуры в комплексный показатель состояния безопасности территорий.

Модель позволяет итерационно увеличивать число объективных показателей, использующихся в принятии стратегических решений, уменьшая при этом вклад экспертных рассуждений.

Формируемые информационные ресурсы в сочетании с универсальными методами доступа могут использоваться и для других задач управления: при оперативном реагировании, подборе территорий и ситуаций-аналогов при разработке планов ликвидации ЧС разных уровней.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания ФИЦ КНЦ СО РАН программы фундаментальных исследований Российской Федерации (рег. № 0287-2021-003).

Литература

1. *Махутов Н. А.* Системные стратегические риски и приоритеты прогнозного социально-экономического и научно-технологического развития России до 2030 года / Н. А. Махутов, Б. Н. Кузык, Н. В. Абросимов. – М. : ИНЭС, 2012. – 78 с.
2. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Исследования и разработки проблем национальной безопасности. – М. : МГОФ «Знание», 2022. – 524 с.
3. *Москвичёв В. В.* Цифровой паспорт безопасности территории / В. В. Москвичев, В. В. Ничепорчук, В. П. Потапов, О. В. Тасейко // Вычислительные технологии. – 2021. – 26(6). – С. 110–132. DOI:10.25743/ICT.2021.26.6.008
4. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности в 4-х частях. Ч.4. Научно методическая база анализа риска и безопасности. – М. : МГОФ «Знание», 2022. – 864 с.
5. *Олтян И. Ю.* О реализации в Российской Федерации Сендайской рамочной программы и глобальной кампании МСУОБ ООН по повышению устойчивости городов «Мой город готовится!» / И. Ю. Олтян, Е. В. Арефьева, В. В. Крапухин, Т. Л. Ляховец // Технологии гражданской безопасности. – 2021. – Т. 18, № 5. – С. 155–161.
6. COVID-19 response – World Health Organization (WHO). – URL https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA73/A73_R1-en.pdf (дата обращения 15.10.22)
7. Song-Shun Lin, Shui-Long Shen, Annan Zhouc Ye-Shuang Xu. Risk assessment and management of excavation system based on fuzzy set theory and machine learning methods. *Automation in Construction*. – 2021. – V. 122. – 103490. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103490>.
8. Knowledge in Risk Assessment and Management. Editors: Terje Aven, Enrico Zio. Wiley online Library, 2017. – 342 p. DOI:10.1002/9781119317906
9. *Kaikkonen L., Parviainen T., Rahikainen M., Uusitalo L. and Lehtikainen A.* Bayesian Networks in Environmental Risk Assessment: A Review. *Integr Environ Assess Manag*. 2021. – 17. – P. 62–78. <https://doi.org/10.1002/ieam.4332>
10. *Ishikawa K.* Japanese methods of quality management. – М. : Economy, 1988. – 214 p.
11. *Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф.* Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб. : Питер, 2001. – 384 с.
12. Разъяснения по созданию и развитию «Озера данных» регионального уровня единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. – М. : МЧС России, 2021. – 10 с.
13. *Ничепорчук В. В.* Архитектура территориальной системы мониторинга чрезвычайных ситуаций / В. В. Ничепорчук, А. И. Ноженков // Информатизация и связь. – 2018. – № 2. – С. 35–41.
14. Безопасность России. Человеческий фактор в проблемах безопасности. – М. : МГОФ «Знание», 2008. – 688 с.

МЕТОД АНАЛИЗА СТОХАСТИЧЕСКОЙ ГРАНИЦЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕГИОНОВ РФ

Н. Н. Карякин, И. Н. Щепина

Воронежский государственный университет

Аннотация. В данной статье проводится исследование инновационного потенциала регионов Российской Федерации методом анализа стохастической границы. Вводится понятие производственного потенциала, раскрывается граничного подхода и его анализа. Описывается модель реального инновационного потенциала в трех версиях, строятся представления для каждой из них и проводятся сравнения с наблюдаемыми данными, а также строятся графики технической инновационной эффективности, позволяющие построить градацию регионов от наиболее к наименее инновационному.

Ключевые слова: анализ регионов РФ, инновации, стохастическая граница, производственный потенциал, граничный анализ, техническая эффективность, экономическая модель, производственная функция.

Введение

Целью данной работы служит исследование инновационного потенциала регионов РФ, который характеризуется агрегированным выпуском инновационной продукции и услуг. Под понятием «инновационный» подразумевается экономическая реализация новых идей. Оно включает в себя реализацию нового или в значительной степени улучшенного продукта (товара или услуги), процесса, нового маркетингового метода, организационного метода в ведении производства, создание рабочих мест или внешних коммуникаций хозяйствующего субъекта.

1. Метод стохастической границы

1.1. Производственный потенциал

Для оценки тех или иных характеристик способностей и возможностей производителя принято использовать термин «производственный потенциал». Производственный потенциал как явление исследовали на протяжении многих лет. Отдельные источники, ссылающиеся на неоклассическую теорию производства, полагают, что что максимально возможный результат производственной функции детерминирован объемом ресурсов, а производственный потенциал, соответствующий данному представлению, принято называть детерминированной производственной функцией [1]. При попытках эмпирически оценить параметры такой функции пришло понимание того, что случайные воздействия носят объективный характер, что означает, что при фиксированных объемах ресурсов могут быть получены различные производственные результаты.

Исходя из этого, была выдвинута новая производственная функция, именуемая стохастической производственной функцией. Для оценки её параметров применялся метод наименьших квадратов и его модификации, которые позволяли предполагать о том, что случайные воздействия приводят к случайным (симметричным) отклонениям в ту или иную сторону от ожидаемых результатов.

1.2. Концепция стохастической границы

В основу концепции стохастической границы положено разделение всех совокупностей производственных факторов на две части: основные и сопутствующие. Результат воздействия

основных факторов детерминирован их объемом, а сопутствующие, в свою очередь, оказывают случайное воздействие на результаты производственной деятельности. При этом вся совокупность сопутствующих факторов, в свою очередь, так же делится на две группы. Первые характеризуются сбалансированным влиянием на производственный процесс, то есть могут как повысить, так и снизить его объем. Результат воздействия же этой группы принято называть «белый шум». Примером может служить солнечная активность, атмосферное давление, то есть неуправляемые факторы, совокупное воздействие которых характеризуется нормальным распределением. С другой стороны, вторая группа факторов включает в себя параметры, систематическое воздействие которых снижают эффективность производства. К ним можно отнести отсутствие мотивации персонала, недостаточную квалификацию. Такие факторы обычно называются факторами эффективности.

1.3. Стохастическая производственная функция

Метод стохастического анализа SFA (Stochastic Frontier Analysis) был предложен в 1977 г. Aigner, Lovell and Schmit [2]. В его основе лежит оценивание стохастической производственной функции или функции затрат со случайной ошибкой. При этом предполагается, что ошибка содержит две независимые компоненты: несистематическую ошибку v_i с нормальным законом распределения и нулевым математическим ожиданием и систематическую ошибку u_i , характеризующую неэффективность производства, выраженную как усеченное в нуле нормальное распределение. В общем виде модель может быть записана в следующем виде (1):

$$\ln Y_i = \sum_{m=1}^M \beta_m \ln X_{mi} + v_i - u_i, i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Здесь Y_i — зависимая переменная, X_{mi} — факторы, β_k — параметры модели. Для идентификации параметров используется метод максимального правдоподобия. Одним из главных преимуществ метода SFA является то, что он оценивает «истинную» границу производства, а не среднее среди всех. Кроме того, измеренное изменение продуктивности будет представлено только изменением в технологиях и инновациях, а не комбинацией изменения эффективности и изменения технологий, как это происходит в случае оценки неограниченными моделями.

2. Модель реального инновационного потенциала

2.1. Общий вид модели реального инновационного потенциала

Основой для построения модели граничного производственного потенциала является модель реального производственного потенциала, оцениваемая на реальных наблюдаемых значениях инновационного производства. Общий вид модели реального производственного потенциала может быть представлен в форме (2):

$$Y_i = g(x_i^1, \dots, x_i^m, \varepsilon | \beta, \delta, \Sigma), i = 1, \dots, N \quad (2)$$

где i — номер наблюдения;

Y_i — выпуск инновационной продукции и услуг, соответствующий i -му наблюдению;

$g(\dots)$ — функция с неотрицательными значениями, монотонная по каждой из $m + 1$ -й переменных;

$x_i^1 \dots x_i^m$ — объемы основных факторов производства, соответствующие i -му наблюдению;

$\varepsilon_i = V_i - U_i$ — случайная величина, компонента V_i которой отражает воздействие сопутствующих несистематических факторов, а U_i — неотрицательная случайная величина, характеризующая факторы неэффективности;

β — параметры модели.

Модель граничного производственного потенциала, соответствующая модели реального производственного потенциала, принимает вид (3):

$$Y_i = \beta_0 \tilde{} (x_i^1)^{\beta_1}, \dots, (x_i^m)^{\beta_m} e^{\varepsilon_i}. \quad (3)$$

2.2. Спецификация факторов неэффективности

Обычно принято рассматривать три основных модели производственного потенциала, которые характеризуют три принципиально важных для инновационного производства ситуации. В каждой из них спецификация факторов неэффективности отличается друг от друга. Этими ситуациями являются:

- отсутствие неэффективности деятельности;
- наличие неэффективности, которую невозможно объяснить;
- наличие эффективности, которая объясняется наблюдаемыми значениями характеристик факторов эффективности.

Модель инновационного потенциала 1, она же МИП1, описывает ситуацию с отсутствующей неэффективностью. Это означает $U_i = 0$, что говорит исключительно о сбалансированном влиянии на производственный процесс. Общий вид модели инновационного потенциала 1 принимает форму (4), по сути представляющую из себя функцию Кобба — Дугласа:

$$Y_i = \beta_0 \tilde{} (x_i^1)^{\beta_1}, \dots, (x_i^m)^{\beta_m} e^{V_i}. \quad (4)$$

Задача построения модели МИП1 в конечном счете сводится к оценке параметров линейной регрессии (5):

$$\ln Y_i = \beta_0 \tilde{} + \beta_1 \ln x_i^1 + \dots + \beta_m \ln x_i^m + \varepsilon_i. \quad (5)$$

Её параметры могут быть получены применением метода максимального правдоподобия либо методом наименьших квадрата. Считается, что инновационное производство, оцененное таким методом, является эффективным для всех наблюдений. Оценки технологичной эффективности принимают максимальное значение и совпадают друг с другом.

Модель инновационного потенциала 2 (МИП2) реального производственного потенциала фиксирует в себе результат ненаблюдаемых факторов неэффективности и их воздействие на инновационный производственный процесс. Ставится предположение о том, что неэффективности существует, но не может быть объяснена наблюдаемыми факторами, которые можно так или иначе измерить. Модель представима в виде (6):

$$Y_i = \beta_0 \tilde{} (x_i^1)^{\beta_1}, \dots, (x_i^m)^{\beta_m} e^{\varepsilon_i}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_i = V_i - U_i$. Здесь U_i — неотрицательная случайная переменная, полученная усечением в нуле нормального распределения, имеющего математическое ожидание μ и дисперсию σ_u^2 . Оценка параметров модели может быть выполнена методом максимального правдоподобия. Для проверки существенного отличия между моделями МИП1 и МИП2 выдвигается гипотеза об отсутствии влияния факторов неэффективности в модели МИП2: $\gamma = 0$, где $\gamma = \frac{\sigma_u^2}{\sigma_u^2 - \sigma_v^2}$ —

доля дисперсии воздействия факторов неэффективности в суммарной дисперсии. Если значение γ численно не отличается от нуля, можно сделать вывод об отсутствии воздействия факторов неэффективности, что дает возможность полагать о том, что в МИП2 неэффективность отсутствует, что делает ее неотличимой от МИП1. В противном же случае можно выдвинуть предположение о наличии неэффективности в модели. Гипотетическая возможность перехода от реального к граничному производственному потенциалу полагает, что неэффективность, замеченную в модели МП2, можно устранить.

Следующая модель, которая, как утверждалось, содержит в себе наблюдаемые численные значения факторов неэффективности (МИП3) имеет следующую форму (7):

$$Y_i = \beta_0 (x_i^1)^{\beta_1}, \dots, (x_i^m)^{\beta_m} e^{\varepsilon_i}. \quad (7)$$

где $\varepsilon_i = V_i - U_i$. Здесь $U_i = U(z)$ — неотрицательная случайная переменная, зависящая от наблюдаемых характеристик z_i факторов неэффективности. Оценка параметров этой модели, как и предыдущих, может быть произведена методом максимального правдоподобия.

Для тестирования утверждения о значимости идентифицируемых факторов неэффективности проверяется гипотеза $\delta_1 = \dots = \delta_p = 0$, где δ_i — найденные коэффициенты параметров неэффективности.

В случае, когда все оценки δ_i значимо не отличаются от нуля, можно сделать вывод о незначимости наблюдаемых факторов неэффективности на данном инновационном производстве. Этот случай говорит о совпадении моделей МИП2 и МИП3. Иначе факторы признаются значимыми. Также гипотетически полагается о возможности устранения идентифицированной данной моделью неэффективности при переходе к граничному производственному потенциалу.

Для оценки значений V_i и U_i решается задача условной оптимизации (8)–(9)

$$\frac{(u_i - \mu_i)^2}{(2\sigma_u^2)} + \frac{(v_i^2)}{(2\sigma_v^2)} \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$u_i - \mu_i = \varepsilon_i, u_i \geq 0. \quad (9)$$

С полученным решением (10)–(11)

$$\text{а) если } \mu_i \sigma_v^2 - \varepsilon_i \sigma_u^2 \geq 0, \text{ то } u_i = \frac{\mu_i \sigma_v^2 - \varepsilon_i \sigma_u^2}{\sigma_u^2 - \sigma_v^2} \text{ и } v_i = \varepsilon_i + u_i, \quad (10)$$

$$\text{б) если } \mu_i \sigma_v^2 - \varepsilon_i \sigma_u^2 < 0, \text{ то } u_i = 0 \text{ и } v_i = \varepsilon_i. \quad (11)$$

3. Реализация модели

3.1. Данные и программный продукт

В качестве зависимой переменной Y рассматривался объем инновационных товаров, работ, услуг, произведенных регионом РФ за исследуемые года. В качестве переменных — факторов было принято решение использовать данные о количестве организаций, выпускающих инновационную продукцию по регионам РФ и Затраты на инновационную деятельность по регионам РФ за аналогичный временной промежуток. Для проведения работы с моделью были получены данные по 77 регионам РФ за 2018–2020гг. Эти данные — официальная статистика Росстата из раздела «Наука, инновации и технологии». Для однородности выборки было принято решение удалить из нее сверхэффективные округа — город Москву и Тюменскую область.

Для работы с моделью был разработан программный продукт на языке Python 3 в веб-оболочке Jupiter Notebook.

3.2. Этапы модельного анализа

На первом этапе была построена модель инновационного потенциала 1 (МИП1). Так как для расчета её коэффициентов используется стандартный метод наименьших квадратов, они были рассчитаны в пакете Excel. Результаты представлены на рис. 1.

Значения F-статистики равное 317.8212436, коэффициента детерминации R2 равное 0.741150884 и значение t-статистик подтверждают значимость как модели в целом, так и всех её параметров на уровне 1 % ошибки.

Таким образом, построенная модель реального инновационного потенциала имеет вид (12):

$$Y_i = e^{8.2932} \cdot X_1^{0.479} \cdot X_2^{0.1626}. \quad (12)$$

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение
β_0	8.473416588	0.183425631	46.19537928	7.639E-116
β_1	0.46492951	0.028857097	16.11144422	3.3881E-39
β_2	0.140193715	0.052365665	2.677206795	0.00797831

Рис. 1. Параметры модели МИП1

На втором этапе строится модель инновационного потенциала 2 (МИП2), для расчета параметров которой уже необходимо использовать функции вычисления коэффициентов методом максимального правдоподобия, реализованные в программном продукте. Была получена модель реального инновационного потенциала МИП2 вида (13):

$$Y_i = e^{10.2733} \cdot X_1^{0.3426} \cdot X_2^{0.1297} \cdot e^{(v_i - u_i)}. \quad (13)$$

На следующем этапе в модель были включены фиктивные переменные, характеризующие год наблюдения (t_1 и t_2), уровень объема затрат (t_3 и t_4), количество инновационно-активных предприятий (t_5), уровень инновационной активности в регионе (t_6) и регион-миллионник (t_7), которые характеризуют факторы неэффективности. Переменные t_1 – t_5 , t_7 представлены как булевы переменные, принимающие значение 1 при наличии данного признака и 0 при его отсутствии, а t_6 — количественная переменная, полученная из официальной статистики. Так, $t_1 = 1$ для года наблюдения 2020, $t_2 = 1$ для года наблюдения 2019, $t_3 = 1$ при затратах региона на инновационную деятельность более 100000 млн. руб., $t_4 = 1$ при затратах на инновационную деятельность, лежащих в промежутке от 100000 млн. руб. до 50000 млн. руб., $t_5 = 1$ при более 50 предприятиях в регионе, производящих инновационную продукцию, t_6 — инновационная активность организаций регионе, вычисляемая как % организаций, осуществляющих технологические инновации к общему числу обследованных организаций, $t_7 = 1$ при населении в регионе более 1 миллиона человек. Для всего набора факторов оцениваются параметры модели МИП3 все тем же методом максимального правдоподобия. Полученная модель принимает вид (14)

$$Y_i = e^{9.7488} \cdot X_1^{0.3811} \cdot X_2^{0.1276} \cdot e^{(v_i - u_i)}. \quad (14)$$

3.3. Сравнение точности моделей

На следующем этапе для сравнения совместим все полученные графики на одном поле и выяснить их различия (рис. 2)

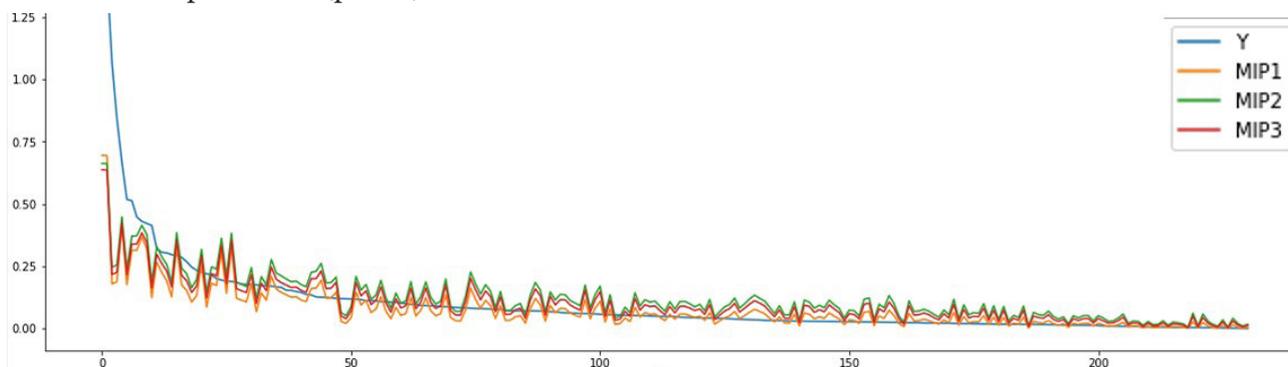


Рис. 2. Модели МИП1, МИП2, МИП3 и исходные данные

По полученному изображению можно судить о том, что все три модели недостаточно точно показывают реальный производственный потенциал регионов с большими наблюдаемыми значениями выпуска инновационной продукции. Сравнивая модели можно прийти к следующему выводу: модель МИП1 ближе всего попадает в фактические значения, но не дает пред-

ставления о неэффективности инновационной деятельности. Модель МИП2 в большем количестве случаев завышает оценки и не дает выяснить факторы неэффективности, что делает модель МИП3 наиболее предпочтительной при оценке инновационного потенциала регионов РФ, так как она достаточно точна и позволяет указать на факторы неэффективности регионов.

3.4. Техническая инновационная эффективность

Для выявления наиболее и наименее эффективных регионов вычисляется техническая эффективность ($\exp\{-U_i\}$) моделей, представленная на рис. (3).

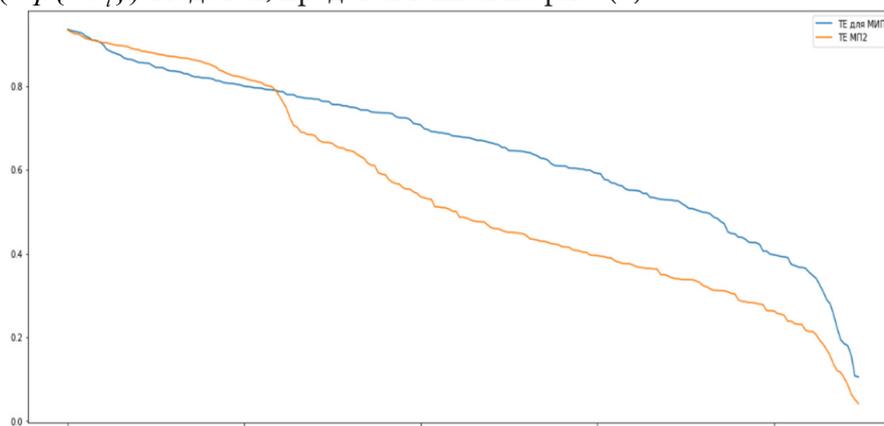


Рис. 3. Технические эффективности моделей МИП2 и МИП3

По графикам можно судить о том, что техническая эффективность для МИП2 наиболее правдоподобна на высоких значениях, а для более низких уже значительно различается с МИП3, что говорит о предпочтительном использовании МИП3 для суждений о эффективности инновационной деятельности региона.

Теперь, по введенным значениям эффективности (пример – 0.9 и 0.3) можно узнать, какие регионы расположились выше и ниже данных границ.

Заключение

В итоге проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) метод анализа стохастической границы может быть применен к оценке инновационного производственного потенциала регионов Российской Федерации;
- 2) были выявлены некоторые факторы неэффективности, основываясь на которые можно указать на недостатки инновационного развития того или иного региона РФ.

Литература

1. Айвазян С. А. Моделирование производственного потенциала на основе концепции стохастической границы: Методология, результаты эмпирического анализа / С. А. Айвазян, М. Ю. Афанасьев. – Москва, Изд-во Крсанд, 2014. – 352 с.
2. Малахов Д. И. Методы оценки показателя эффективности в моделях стохастической производственной границы / Д. И. Малахов, Н. П. Пильник // Экономический журнал ВШЭ. – 2013. – С. 692–718.
3. Щетинин Е. И. Стохастическая граница производственных возможностей и факторы технической эффективности предприятий российской обрабатывающей промышленности: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. экономических наук (08.00.13) / Щетинин Евгений

Игоревич; Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». – Москва – 2016. – 29 с.

4. *Семенычев В. К.* Эволюция технической эффективности российских регионов в 2011–2016 годы: метод стохастического анализа SFA с пространственными эффектами / В. К. Семенычев, Г. А. Хмелева, В. Н. Кожухова. – Самара, 2018. – 28 с.

5. *Бахтин К. В.* Оценка и сравнение технической эффективности российских промышленных и торговых компаний / К. В. Бахтин. – Москва, 2009 – 42 с.

6. *Понькина Е. В.* Технологическая эффективность производства продукции растениеводства: измерение на основе эконометрических методов Data Envelopment Analysis и Stochastic Frontier Analysis / Е. В. Понькина, Д. В. Курочкин // Известия Алтайского государственного университета. – 2014. – № 81. – С. 170–178.

ОРГАНИЗАЦИЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЁННОГО ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ ВРЕМЕННОЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИЕЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Ю. А. Клименко, А. П. Преображенский

Воронежский институт высоких технологий

Аннотация. Актуальность исследования, представленного в данной статье, обусловлена основными требованиями по сохранению природных ресурсов и соблюдению норм природоохранного законодательства при строительстве энергетической инфраструктуры временного использования. В работе рассматривается возможность использования аэростатов при строительстве временных ЛЭП различной протяжённости для уменьшения затрат на монтаж и демонтаж электролиний, календарных сроков строительства, повышения электробезопасности и мобильности ВВЛЭП.

Ключевые слова: аэростат, линия, энергоснабжение, строительство, электропровод, мобильность, модуль, природопользование, климат, экономия, монтаж, местность.

Введение

При строительстве автомобильных дорог, железнодорожных магистралей, мостов и вахтовых посёлков различного назначения требуется оперативная организация энергоснабжения данных объектов. При наличии близко расположенной энергетической инфраструктуры выгоднее использовать её, а не автономные генерирующие мощности. Для этого необходимо проведение строительных работ по прокладке временных кабельных или воздушных линий электропередачи (ЛЭП). Эти мероприятия связаны с привлечением сил и средств, несвязанных с выполнением основной задачи. Строительство энергетической инфраструктуры имеет весьма затратный характер и тем более, в данном случае, носят временный, краткосрочный характер, тем более, эти ЛЭП приходится демонтировать после выполнения задачи строительства и перемещать в другие пункты проведения работ. Приходится выполнять мероприятия по рекультивации выделенных земель и восстановлению нарушенной экологической обстановки в районе строительства [1]. Поэтому использование аэростатов при строительстве временных ЛЭП различной протяжённости может существенно уменьшить затраты на монтаж и демонтаж электролиний, трудозатраты и календарные сроки, повысить электробезопасность и мобильность, соблюсти строгие нормы экологической безопасности, а также внедрить многократно использование за счёт модульной структуры.

1. Основная часть

1.1. Основные мероприятия при строительстве ЛЭП

Строительство временной линии электропередачи предполагает проведение следующих мероприятий: разработка трассы, проектирование, согласование проекта, геодезические работы, монтаж и демонтаж ЛЭП [2].

При разработке трассы для строительства ЛЭП определяются: местоположение, наличие автомобильной, железнодорожной и энергетической инфраструктуры, газо- и нефтепроводов, климатические особенности региона (температурный режим, роза ветров, ветровая нагрузка, количество осадков и их классификация, рельеф местности, состав почв и состояние грунта, глубина залегания грунтовых вод, а также наличие рек, озёр, ручьёв, болот, лесных и искусственных насаждений) [3].

При выполнении работ необходимо строго соблюдать нормы экологического законодательства. При монтаже временной линии электропередачи сводятся к минимуму работы по обустройству площадок крепления аэростатов и использованию тяжёлой строительной техники (тракторов, бурильных машин, автомобилей) для проведения земляных работ. Полностью отсутствует вырубка лесных насаждений. Поэтому поверхностный слой почвы, деревья и кустарники сохраняются в первозданном виде [4].

1.2. Описание временной ЛЭП

Основным элементом данной временной воздушной ЛЭП (рис. 1) является аэростат, который предназначен для выполнения функции стационарной опоры, на арматуру которой крепится электрический провод (СИП или кабель) при помощи подвесного крепежа, обеспечивающего надёжность фиксации и предотвращения деформации защитной оболочки провода [5], на специальной площадке. Аэростат наполняется нейтральным газом, объём которого определяется в зависимости от веса электрического провода, крепёжной арматуры и другого оборудования.



Рис. 1. Схема временной воздушной линии электропередачи

Количество аэростатов определяется протяжённостью ЛЭП и расчётными межпролётными расстояниями между ними. Высота подъёма ЛЭП аэростатом, определяется весом электрического провода для соблюдения защитного расстояния между ЛЭП и землёй, естественными и искусственными объектами в соответствии с рельефом местности. Межпролётные расстояния между аэростатами рассчитываются согласно стрелы провиса провода путём компьютерного моделирования цепной линии.

Подъём аэростата или изменение высоты его расположения осуществляется с помощью лебедки. Данный трос (1) является центральным в схеме крепления аэростата, которая может быть пятиточечной или семиточечной, и приведена на рис. 2 а, б.

Также имеются дополнительные растяжки в продольном (2, 3) и поперечном (4, 5, 6, 7) направлениях. Данные варианты фиксации аэростата позволяют добиться относительной неподвижности его расположения для исключения изменения стрелы провиса провода, а также для уменьшения влияния ветровой нагрузки на ЛЭП.

Электрическое соединение участков провода осуществляется электрическими разъёмами повышенной прочности со специальными замками для исключения самопроизвольного замыкания [6].

От источника электроэнергии последовательно устанавливают аэростатные опоры с одновременным тяжением провода с помощью натягивания его между аэростатными опорами.

Транспортировку модулей линии электропередачи выполняют, например, вертолётom или транспортом на шинах низкого давления, также возможна буксировка нескольких аэростатных опор с помощью несущего троса.

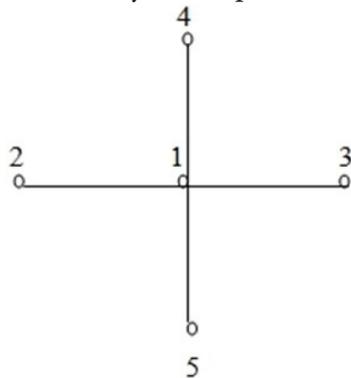


Рис. 2а

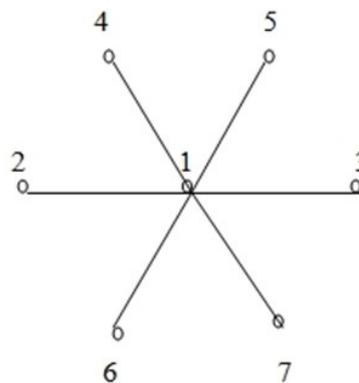


Рис. 2б

После ориентации относительно трассы закрепляют грунтовые анкеры оттяжек и лебёдки, последовательно, начиная с аэростатной опоры со стороны источника электроэнергии. По мере продвижения выполняют тяжение провода. После монтажа всех пролетов линию подключают к источнику электроэнергии [7].

1.3. Основные преимущества и недостатки временной воздушной линии электропередачи

Основными преимуществами временной воздушной ЛЭП (ВВЛЭП) являются:

- 1) Оперативность проектирования ВВЛЭП;
- 2) Оперативность при проведении монтажа и демонтажа ВВЛЭП;
- 3) Минимизация затрат материальных ресурсов;
- 4) Электробезопасность при эксплуатации ВВЛЭП;
- 5) Минимизация затрат трудовых ресурсов;
- 6) Экологичность;
- 7) Отсутствие влияния особенностей рельефа местности (перепады высот, овраги, ручьи, лесные массивы, строения) на прямолинейность прохождения ВВЛЭП;
- 8) Возможность многократного использования ВВЛЭП;
- 9) Модульная структура ВВЛЭП;
- 10) Мобильность.

Основными недостатками временной воздушной ЛЭП (ВВЛЭП) являются:

- 1) Зависимость от стихийных бедствий (ураган, шторм, обледенение)

Заключение

В данной статье рассмотрена возможность использования аэростатов (технологии конца 19 – начала 20 веков) при построении временных воздушных линий электропередачи для энергоснабжения удалённых строящихся объектов различной инфраструктуры. Рассмотрены основные вопросы строительства ЛЭП и природоохранных мероприятий по сохранению природных ландшафтов. Сделано краткое описание, предложена модульная структура построения временных воздушных линий электропередачи и проведение компьютерного моделирования цепной линии при проектировании ВВЛЭП. Приведены основные преимущества и недостатки ВВЛЭП.

Литература

1. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» (с изменениями на 27 декабря 2019 года; редакция, действующая с 1 июля 2020 года). – [http:// www.garant.ru](http://www.garant.ru) / (дата обращения 1.03.2021).
2. Рожкова Л. Д., Козулин В. С. Электрооборудование станций и подстанций. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
3. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М. : Издание НПЦ ЭНАС, 2014. – 486 с.
4. Специальные вопросы проектирования электроэнергетических систем и сетей: учебное пособие / Н. Л. Бацева. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 254 с.
5. Справочник по проектированию электрических сетей под ред. Д. Ф. Файбисовича. – М. : ЭНАС, 2009. – 390 с.
6. Справочник по строительству и реконструкции линий электропередачи напряжением 0,4–750 кВ; под ред. Е. Г. Гологорского. – М. : ЭНАС, 2007 – 560 с.
7. ПОТ РМ-016-2001 РД 153-34.0-03.150-00. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. – Введ. 01.07.03. – М. : Изд-во «Энас», 2004. – 160 с.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПОЛЕТОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

И. А. Кремлёв^{1,2}, А. М. Малышенко¹

¹*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

²*Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа*

Аннотация. Ставится задача автоматизации проектных изысканий в нефтегазовой отрасли за счет применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Для решения этой задачи предлагается разработать экспертную систему для автоматизированного планирования полетов БПЛА, основанную на использовании опыта наиболее успешно решающих такое планирование специалистов. Приводятся планируемые концептуальные решения для разработки такой экспертной системы статического типа, ее структура и краткое описание входящих в нее блоков, ориентированная на обработку как формализованных, так и нечетких и трудно формализуемых входных данных.

Ключевые слова: нефтегазовая отрасль, инженерные изыскания, беспилотные летательные аппараты, автоматизация планирования полетов, экспертная система, разработка.

Введение

Развитие нефтегазовой отрасли Российской Федерации осуществляется при активном освоении территорий Сибири и Крайнего Севера. Стабильный рост объема добычи газа и нефти обуславливает необходимость повышения объема и качества проведения инженерных изысканий на нефтегазовых месторождениях.

На сегодняшний день процессу цифровизации и внедрения современных технологий, в том числе и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в реальный сектор экономики уделяется большое внимание. Это связано с активным развитием робототехники, автоматизации, технического зрения, микроэлектроники и иных технологий, используемых при создании беспилотных летательных аппаратов. Также согласно исследованию «Развитие рынка беспилотных летательных аппаратов» в ближайшей перспективе ожидается развитие IT-технологий в сфере вычислительных мощностей и алгоритмов обработки больших данных, (а также повышение детализации, актуальности) в повышении точности определения пространственных данных, в развитии технологий навигации.

Использование БПЛА при проведении инженерных изысканий позволяет получить высокое качество кадров, за счет чего можно добиться уменьшения времени обработки и получения конечных данных. Кроме того, для создания движущих сил в БПЛА, как правило, используются электрические двигатели, что соответствует тенденциям экологической безопасности.

Таким образом, актуальность проводимого нами исследования определяется тем, что оно посвящено практическому решению проблем сокращения финансовых затрат, повышения производительности труда, повышения надежности и точности проведения инженерных изысканий на нефтегазовых месторождениях в районах Крайнего Севера и Сибири за счет применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Общая характеристика экспертных систем для автоматизированного планирования полетов БПЛА

Этап предварительного планирования и управления полетом БПЛА является одним из наиболее ключевых в связи с необходимостью обработки больших объемов информации в

сжатые сроки. На сегодняшний день для решения данной проблемы применяется автоматизация подготовки полетных заданий, что обеспечивает создание систем, в существенной мере избавляющих людей от рутинных операций и сложных расчетов.

Для решения рассматриваемой задачи ученые активно применяют методы искусственного интеллекта. Данное направление предполагает использование компьютерных систем, как средства для реализации процессов, аналогичных человеческому разуму.

Одним из наиболее перспективных направлений развития информационных технологий является разработка экспертных систем. Они характеризуются наличием заложенных в базе знаний компонентов опыта эксперта, позволяющих принять решение относительно выполняемой функции.

Экспертная система включает в себя следующие компоненты [1]:

- база знаний, состоящая из блока данных и теоретического блока;
- пользовательский интерфейс;
- система логического анализа.

Применение разрабатываемой экспертной системы для автоматизированного планирования полетов БПЛА позволяет значительно улучшить эффективность подготовки полетного задания за счет создания более комфортных условий работы конечных пользователей. Для решения задачи необходимо синтезировать экспертную систему, которая в режиме реального времени составит наиболее безопасный пространственно-временной график полета беспилотного летательного аппарата, а также предоставит оператору решение в форме графического образа. Исходными данными для расчетов могут являться следующие данные [2]:

- цифровая карта ветра $U(X, Z)$, где U — вектор скорости ветра в точке с координатами (X, Z) ;
- цифровая карта высот рельефа местности, представляющая собой матрицу высот рельефа $H(X, Z)$;
- цифровая карта угроз, содержащая наиболее вероятные координаты и характеристики факторов, которые могут неблагоприятно повлиять на выполнение полетного задания;
- технические характеристики беспилотных летательных аппаратов, осуществляющих полет.

Вся входная и выходная формализованная информация должны быть структурированы и храниться в базе данных. Это необходимо для обеспечения быстрого исполнения операций модификации, выборки и пополнения данных. Интерфейс с базой данных должен обеспечивать быстрый и корректный обмен данными с внешними устройствами, быть наглядным и удобным для конечных пользователей, обеспечивать формирование обобщенного графического образа для представления информации пользователю.

Трудноформализуемая и неформализуемая информация, а также неточные и нечеткие данные следует хранить в базе знаний и обрабатывать машиной логических выводов с целью выдачи интеллектуальных советов и принятия решений. Система должна содержать легко дополняемый и модифицируемый пакет прикладных программ для обработки формализованных данных.

Предлагаемая структура экспертной системы для автоматизированного планирования полетов БПЛА

Благодаря базе знаний, экспертная система позволяет проанализировать результаты проделанной работы с целью их дальнейшего применения. Программное обеспечение экспертной системы имеет иерархическую развиваемую структуру и строится по модульному принципу. Предлагаемая структура экспертной системы показана на рис. 1.

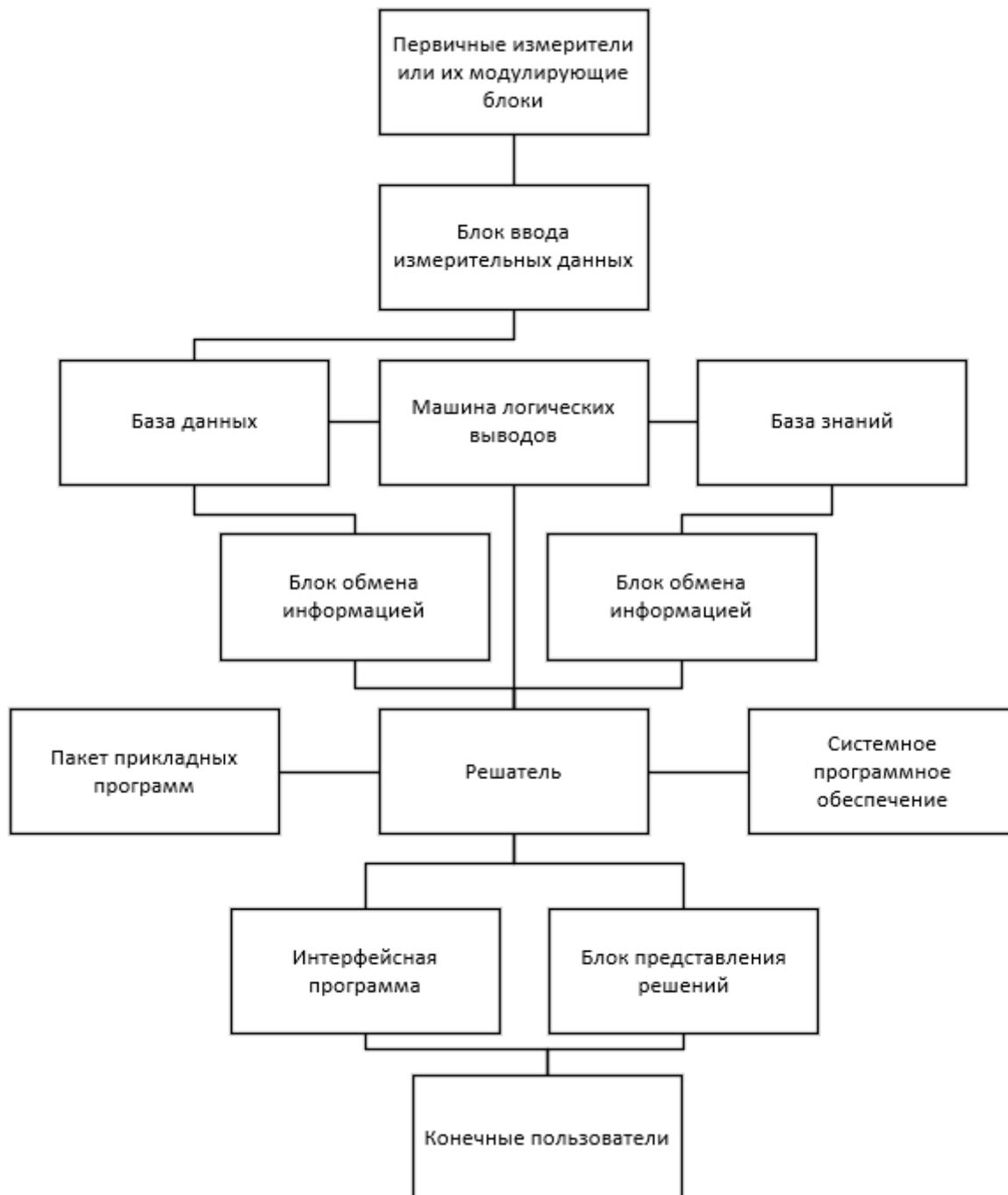


Рис. 1. Структура экспертной системы планирования полета

В этой экспертной системе оперативная информация поступает от первичных измерителей или их модулирующих блоков через блок ввода измерительных данных. Далее эта информация поступает в базу данных. База знаний не предполагает изменений во время работы, т. е. предусматривается статической.

К моменту инициализации процесса вычислений база знаний должна содержать минимально необходимый для работы набор правил. Процессом вычислений управляет решатель, получающий формализуемую и неформализуемую информацию из базы данных и базы знаний через блоки обмена информацией, а также обрабатывая готовые решения интеллектуального блока, получаемые от машины логических выводов.

Во время вычислений решатель использует пакет прикладных программ и системное программное обеспечение, выдавая и принимая управляющие последовательности. Взаимодействие с конечными пользователями осуществляется посредством интерфейсных программ и блока представления решений, формирующего в том числе и графические образы.

Рассматриваемую экспертную систему можно условно разделить на два информационных канала. Канал обработки неформализованных данных служит для операций со знаниями, выдачи рекомендаций, обработки нечеткой информации, а также поддержки принятия решений. Канал обмена формализованными данными является открытой информационной системой, осуществляющей набор действий с формализованными данными [3].

В канал обмена данными входят две интерфейсные программы. Первая предназначена для выборки и преобразования информации в целях выдачи ее оператору, вторая является программой обмена информацией с оператором. Помимо этого, в канале содержится блок преобразования данных, необходимый для взаимодействия с другими блоками интеллектуальной системы. Его функционал состоит в преобразовании информации, полученной из базы данных, в форму, более удобную для последующего использования, а также подготовка вновь поступивших данных для внесения в базу, в том числе фаззификацию и дефаззификацию (преобразование) нечетких данных.

Реализация экспертной системы для автоматизированного планирования полетов БПЛА

Существующие в настоящее время средства для разработки экспертных систем можно разделить на 3 класса:

- языки программирования (Java, C++ и др.) позволяют реализовать экспертные системы для конкретной предметной области или задачи. Их достоинствами являются возможность создать необходимый функционал экспертной системы, а также добиться требуемых показателей качества;

- языки искусственного интеллекта (PROLOG, LISP и др.) позволяют более легко оперировать знаниями эксперта при построении экспертных систем;

- специальное программное обеспечение, позволяющее строить экспертные системы из готовых отдельных элементов. Сюда относятся среды разработки и оболочки интеллектуальных систем [4].

Исходя из того, что оболочки интеллектуальных систем позволяют создать экспертную систему с необходимым качеством и минимальными затратами, было принято решение о выборе данного средства разработки. Оболочка состоит из средств разработки базы знаний, позволяющих представлять опыт эксперта в разнообразных формах. Опыт может быть представлен одним или несколькими способами — фреймами, семантической сетью и т. д.

Реализация создаваемой экспертной системы планируется с помощью программной оболочки с возможностью использования лингвистических переменных ESWin. Данная программная оболочка используется для реализации задач методом обратного логического вывода на основе интерпретации правил-продукций с использованием фреймов как структур данных, включающих в себя лингвистические переменные.

База знаний включает в себя две части — переменную и постоянную. База данных является переменной частью базы знаний и состоит из фактов, полученных в результате логического вывода. В базе данных факты не являются постоянными, поскольку их значение и количество зависит от результатов и процесса логического вывода.

Упрощенный алгоритм работы экспертной системы приведен на рис. 2. В алгоритме отражена такая особенность работы экспертной оболочки ESWin, как возможность нахождения нескольких вариантов решений задачи.

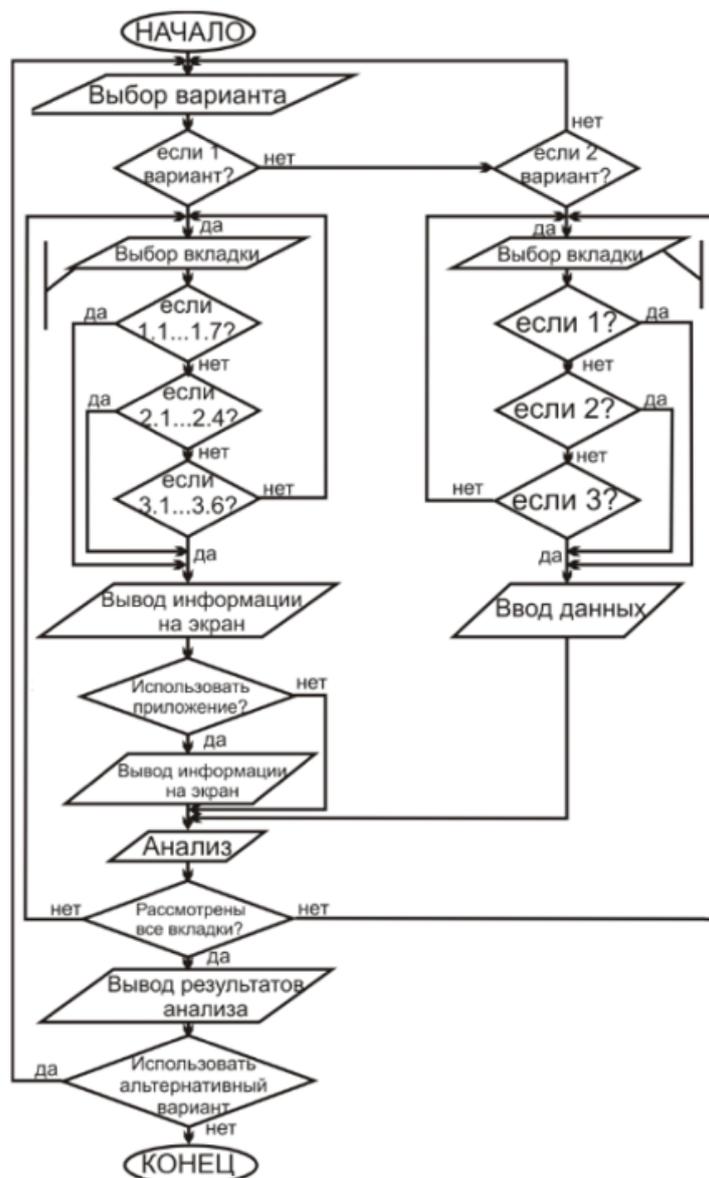


Рис. 2. Алгоритм поиска всех возможных решений при заданных параметрах

Заключение

В ходе выполнения работы были рассмотрены вопросы создания экспертной системы, осуществляющей автоматизированное планирование полетов беспилотных летательных аппаратов, основанной на использовании опыта наиболее успешно решающих такое планирование специалистов. Развитие технологий в сфере беспилотных летательных аппаратов привели к необходимости разработки интеллектуальных информационных систем, позволяющих выполнять отдельные функции человека-эксперта. Данные системы помогают находить оптимальное решение задачи, а также выдавать рекомендации в режиме реального времени.

Преимуществом предлагаемого подхода является значительное повышение эффективности автоматизированного планирования полетов беспилотных летательных аппаратов при решении задач инженерных изысканий в нефтегазовой отрасли за счет избавления конечного пользователя от трудоемких и рутинных задач, а также повышение наглядности представляемых решений. Экспертная система позволяет решить вопросы обработки и хранения данных и обеспечения взаимодействия с конечными пользователями в режиме реального времени.

Литература

1. Любарский Ю. Я. Интеллектуальные информационные системы : научное издание / Ю. Я. Любарский. – Москва : [б.и.], 2020. – 232 с.
2. Павлова Н. В. Автоматизированная подготовка полетных заданий средствами искусственного интеллекта / Н. В. Павлова, В. В. Петров, Э. И. Холявко // Автоматизация и телемеханизация. – 1997. – № 6. – С. 158–169.
3. Леженко А. И. Использование экспертных систем для интеллектуального анализа данных / А. И. Леженко, И. А. Кузнецов, С. К. Кузнецов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2012. – № 1. С. 60 – 64.
4. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования : учеб. для вузов. – 4-е изд. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 430 с.

МОДЕЛЬ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

И. В. Логинов

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

Аннотация. В работе рассматривается модель неопределенности процессов функционального развития адаптивных систем природно-технического мониторинга. Высокая неопределенность требований к назначению системы при их быстром изменении и стохастический характер самих изменений привели к обоснованию трехкомпонентной модели неопределенности: неопределенность значимости функциональных подсистем; неопределенность пригодности; неполнота критериев управления перестроением. На основе предложенной модели показаны основные направления снижения неопределенности при управлении развитием таких многофункциональных систем.

Ключевые слова: киберфизическая система, моделирование, мониторинг, неопределенность, автоматизация, пригодность, значимость, управление.

Введение

Актуальность настоящего исследования заключается в том, что в условиях ускоряющегося изменения природно-технических систем и целей их автоматизированного мониторинга из-за влияния внешних факторов требуется создание непрерывно развивающихся многофункциональных автоматизированных систем мониторинга.

Теоретическая и методологическая основа управления перестроением (реконfigurацией, развитием) таких многофункциональных автоматизированных систем природно-технического мониторинга опирается на развитый аппарат синтеза оптимальных и пригодных многокомпонентных киберфизических систем [1–4]. К настоящему времени предложены методы управления системной и структурной динамикой, структурно-функционального управления [1, 2, 5]. Также при управлении могут быть использованы подходы синтеза оптимальных структур автоматизированных систем: «сверху» — структуризации и декомпозиции и «снизу» — морфологический, информационный, кибернетический, когнитивный, ситуационный, структурно-лингвистический подходы. Используются подходы по приданию развивающимся автоматизированным системам свойств адаптивности: самоконфигурирования, самообслуживания, самооптимизации, отказоустойчивости [4, 8].

В процессе управления возникает значительная неопределенность в определении назначения и состояния автоматизированной системы, существенно изменяющая возможности по реализации оптимального управления. Решение задач поддержки принятия решений на оптимизацию функционального состава рассматриваемых систем в условиях неопределенности вносит значительную задержку в процессы модернизации и приводит к проблеме долговременного снижения их функциональной пригодности.

Основные результаты

Усложнение многофункциональной автоматизированной системы и увеличение динамики ее функционирования приводят к повышению уровня неопределенности оценок ее состояния, к которым в рамках исследования относятся также и требования назначения. При этом, если состояние технических компонентов и процессов их функционирования определяется средствами измерения, то характеристики процессов автоматизации мониторинга и требова-

ния к их функциональным возможностям определяются в первую очередь на основе экспертных оценок.

Неопределенность оценки состояния автоматизированной системы природно-технического мониторинга (АСптМ) в общем и требований мониторинга (требований к функциям и возможностям системы мониторинга) в частности, с объективной точки зрения может быть разделена на лингвистическую (неопределенность смысла фраз и нечеткость оценок) и физическую (неточность вследствие несовершенства измерительных средств и случайности наблюдаемых параметров из-за стохастической природы процессов) [7]. В практических случаях в процессе управления используют недостоверную (включая целенаправленное искажение), неточную, неполную (частичное наблюдение) и противоречивую информацию о состоянии и назначении системы [8].

В работе используется модель автоматизированной системы согласно которой ее пригодность (целевой показатель системы) определяется на основе системы показателей важности и функциональной пригодности функциональных компонентов ее составляющих:

$$s_i = \langle k_i, \alpha_i \rangle, \quad (1)$$

где k_i — коэффициент функциональной пригодности; α_i — важность (значимость) i -функционального компонента мониторинга (ФКМ) АСптМ.

Модель неопределенности описывается шумами наблюдения, которые в объединены в три группы (рис. 1):

- неопределенность значимости ФКМ ε_α ;
- неопределенность пригодности ФКМ ε_k ;
- неполнота критериев управления (принятия решения на реконфигурацию / перестроение АСптМ) ε_r .

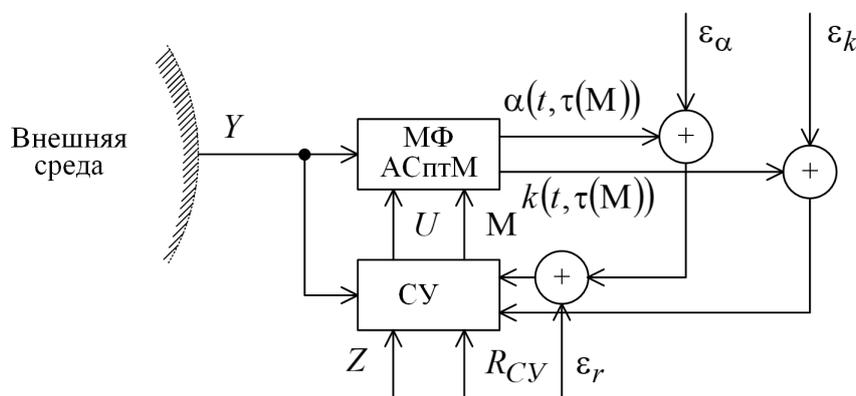


Рис. 1. Модель неопределенности состояния автоматизированной системы природно-технического мониторинга

Согласно разработанной модели, мониторингу M подвергаются ФКМ, результатом которого являются значения важности $\alpha(t, \tau(M))$ и пригодности $k(t, \tau(M))$ ФКМ. Их мониторинг и диагностика реализуется с помехами ε_α и ε_k соответственно. При принятии решений, также помехи вносит неполнота (вследствие изменения) критериев принятия решений ε_r . Таким образом, управление U реализуется с учетом шумов всех трех классов.

Факторы неопределенности принятия решений на выбор ФКМ для модернизации [9], включая увеличения времени выявления необходимости модернизации $t_{об}$, неопределенности коэффициента α_i приводят к снижению коэффициента пригодности ФКМ $k_i^{сп}$.

Изменение условий функционирования приводит к тому, что значимость функционального компонента мониторинга α_i характеризуется:

- изменением значимости во времени: $\alpha = \alpha(t)$. Процесс изменения значимости ФКМ может быть смоделирован процессом случайных блужданий:

$$\alpha_j = \alpha_{j-1} + \xi_\alpha, \quad (2)$$

где ξ_α — шаг изменения. Измерение характеристик значимости только в отдельные моменты времени приводит к тому, что при принятии решений имеются частично устаревшие данные. Величина ошибки зависит от скважности наблюдения: $\xi_\alpha = \xi_\alpha(\tau)$.

– наблюдением значимости в условиях неопределенности. Применительно к рассматриваемой задаче управления функциональной пригодностью МФ АСптМ в процессе непрерывного развития выделено два вида неопределенности:

– наличие шумов при измерении первичных показателей значимости (исходных данных):

$$\hat{\alpha} = \alpha + \varepsilon_\alpha, \quad (3)$$

где $\hat{\alpha}$ — наблюдаемая величина значимости ФКМ;

– неполнота критериев упорядочивания ФКМ из-за некорректных механизмов ранжирования:

$$r\{\alpha_i\} + \varepsilon_r, \quad (4)$$

где $r\{\alpha_i\}$ — критерии упорядочивания на множестве ФКМ, ε_r — неполнота критериев.

Снижение рассмотренных видов неопределенности в известных исследованиях достигается: выявлением неявно-заданных причинно-следственных связей на основе теории нечетких множеств и теории планирования экспериментов [8]; коррекцией цели на основе агентных технологий в условиях неопределенности [10]; внедрением формальных моделей предметной области, учитывающие динамические качества предметной области на базе теории категорий [7]. Учет одновременного характер как изменения требований назначения (коррекция цели), так и неполноты системы критериев принятия решений (неопределённость предпочтительных состояний АСптМ) рассмотрен в [11, 12]. При этом в работах [13, 14] показаны механизмы добавления новых данных, их дополнительной обработки, а также использования аппарата нечетких множества для снижения общего уровня неопределенности.

Заключение

В работе рассмотрена модель неопределенности процессов функционального развития адаптивных автоматизированных систем природно-технического мониторинга. Представлена трехкомпонентная модель неопределенности, объединяющая неопределенность значимости функциональных подсистем; неопределенность пригодности функциональных подсистем; неполноту критериев управления перестроением. Показаны основные направления снижения неопределенности путем добавления новых данных, их дополнительной обработки, а также использования аппарата нечетких множества.

Литература

1. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В. Н. Волковой, В. Н. Козлова. – М. : Высш. шк., 2004 – 616 с.
2. Охтилев М. Ю., Мустафин Н. Г., Миллер В. Е., Соколов Б. В. Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // ИЗВ. ВУЗОВ. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, № 11. – С. 7–15.
3. Гришаков В. Г., Логинов И. В. Управление динамической реконфигурацией ИТ-инфраструктуры в меняющихся условиях // Информационные системы и технологии. – 2016. – № 3 (95). – С. 13–22.
4. Geyda A. S. Schemas for the analytical estimation of the operational properties of agile systems / A. S. Geyda, I. V. Lysenko // SHS Web Conf. 2017. – Volume 35. – 01058.

5. Павлов А. Н. Методологические основы решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов // Известия Вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55 (11). – С. 7–12.
6. *Bolnokin V. E., Mutin D.I., Tuan Ngo Anh, Povalyaev A. D.* Models of adaptive control system design for nonlinear dynamic plants based on a neural network // Automation and Remote Control. March 2015. – Volume 76, Issue 3. – P. 493–499.
7. Куликов Г. Г. Построение формальной модели предметной области с применением нечеткой кластеризации / Г. Г. Куликов, В. В. Антонов, Д. В. Антонов // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т. 15, № 5. – С. 3–11.
8. *Ignatyev M.* Multi-model approach to city governance in the face of uncertainty / M. Ignatyev, V. Marley, V. Mikhailov, A. Spesivtsev // Communications in Computer and Information Science. Digital Transformation and Global Society. First International Conference, DTGS 2016. – P. 469–477.
9. Емельянов С. В. Новые типы обратной связи : Упр. при неопределенности / С. В. Емельянов, С. К. Коровин. – М. : Наука : Изд. фирма «Физ.-мат. лит.», 1997. – 348 с.
10. Щербатов И. А. Управление сложными слабоформализуемыми многокомпонентными системами: монография / И. А. Щербатов. – Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2015. – 268 с.
11. *Kuzichkin O. R.* Approach to the choice of modernization directions for the system of geodynamic monitoring in cases of using components intensity uncertainty / O. R. Kuzichkin, A. V. Grecheneva, G. S. Vasilyev, V. T. Eremenko, I. V. Loginov, A. V. Eremenko, S. V. Eremenko // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2019. – Т. 17, № 3. – С. 1239–1248.
12. Логинов И. В. Управление развитием многофункциональных автоматизированных систем в условиях неопределенности и высокой интенсивности изменения внешних условий // Автоматизация. Современные технологии. – 2022. – Т. 76, № 7. – С. 314–322.
13. *Loginov I. V.* The problem of the functional development control of multifunctional information systems under uncertainty // Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis (MIP-2022'AS). Proceedings of the XXVII-th International Open Science Conference. Yelm, 2022. – С. 261–266.
14. *Kuzichkin O. R., Grecheneva A. V., Vasilyev G. S., Eremenko V. T., Loginov I. V., Eremenko A. V., Eremenko S. V.* Approach to the choice of modernization directions for the system of geodynamic monitoring in cases of using components intensity uncertainty // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2019. – Т. 17, № 3. – С. 1239–1248.

МНОГОМОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ НЕЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

А. М. Минитаева

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

Аннотация. В данной статье предлагаются разные информационные технологии прогнозирования, в основу которых положено поэтапное раскрытие неопределенностей разной природы, уточнение результатов моделирования на каждом этапе исследования. Особенностью такого подхода является то, что принимающее решение имеет возможность получить не только «готовое» решение, но и участвовать в формировании моделей, предлагать собственные сценарии и горизонты прогнозирования для обработки с использованием фактических данных. Используются лучшие модели-кандидаты, входные данные: временные ряды изучаемых процессов и дополнительные факторы, значимые на данном горизонте прогнозирования.

Ключевые слова: прогноз, данные, временные ряды, алгоритм, принятие многокритериальных решений, нелинейный нестационарный процесс, интервальное задание предпочтения лиц, прогнозирование, многомодельный подход.

Введение

Растущие требования к современным информационным технологиям со стороны различных групп пользователей, и особенно со стороны лиц, заинтересованных в повышении эффективности управления и снижении риска принятия неверного управленческого решения, побуждают к усовершенствованию существующих методов и информационных технологий анализа данных, поиска новых решений, которые могут быть быстро адаптированы к новым условиям функционирования изучаемых процессов.

1. Методы и материалы

С целью создания единой концептуальной основы для решения задач построения информационных технологий прогнозирования предложена системная методология построения моделей нелинейных нестационарных процессов, разработанная на основе адаптивного подхода к моделированию с комбинированным использованием сценарного моделирования, регрессионных и вероятностно-статистических моделей в форме сетей [1]. Ее преимуществами является комплексное применение множественного числа вероятностно-статистических методов выявления и учета неопределенностей (цифровая и оптимальная фильтрация, альтернативные методы оценки структуры и параметров математических моделей), и обеспечение повышения качества промежуточных и окончательных результатов обработки данных, построения математических моделей и оценки прогнозов. Общая схема применения предлагаемого подхода представлена на рис. 1.

Как видно из рис. 1, предлагаемый подход применим для прогнозирования процессов, имеющих место в системах различного типа, в частности, технических, социально-экономических, экологических и т. д. Преимуществом разработки является то, что ее легко «перестроить» на решение различных задач при разных входных условиях: учесть возможные варианты развития ситуации, разработать краткие выборки значительного количества разнородных показателей, экспертных оценок и возможных вариантов решений. Важное место в разработанной методике применения многомодельного подхода уделено именно всестороннему исследова-

нию предметной области задачи, обзору вариантов развития событий, а также предсказанию их последствий на перспективу. Данная проблема решается путем разработки информационной технологии, сочетающей в себе процедуры синтеза оптимального решения, использования интеллектуального анализа данных, прогнозного моделирования, а также доступных инструментов поддержки решений [2, 3].

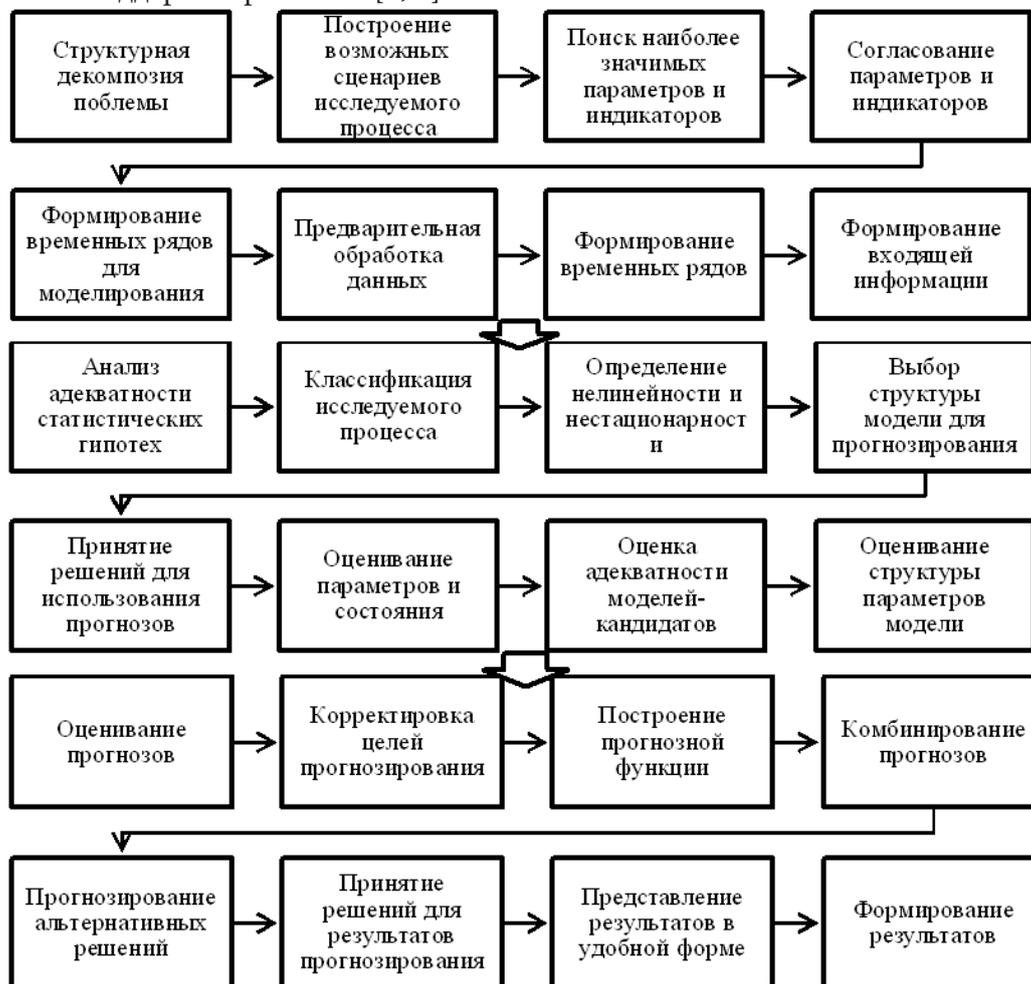


Рис. 1. Общая схема применения предлагаемого многомодельного подхода

Как видно из рис. 1 значительное внимание уделено обеспечению системности использования методов анализа и автоматизированного интегрирования разнотипной информации, методов моделирования, прогнозирования и многокритериального принятия решений. Для преодоления неопределенностей предложено множество различных методов в зависимости от типа неопределенности.

Внедрение технологий интеллектуального анализа данных в информационную технологию прогнозирования и подготовки вариантов решений представлено на рис. 2.

Обработка входных данных должна быть системной и комплексной, и, что главное, адаптировано к потребностям пользователя: наряду с заполнением пропусков данных, должна выполняться корректировка значительных импульсных (экстремальных) значений, нормирование измерений в заданных пределах, логарифмирование больших значений и фильтрация шумовых составляющих, выявление и устранение мультиколлинеарности.

Предусмотрено также, что входные данные могут быть использованы в многовариантных расчетах, когда рассматриваются их возможные изменения при различных сценариях развития изучаемых процессов.



Рис. 2. Схема использования интеллектуального анализа данных в информационной технологии прогнозирования для дальнейшего использования информационной технологии принятия решений

Введение в информационную технологию прогнозирования сценарного подхода [4], неотъемлемой составляющей которого является предварительный анализ предметной области, отбор альтернатив и формулирование целевых установок возможных вариантов развития событий, позволяет разрабатывать прогнозы даже в условиях нечеткой, неполной информации, оценивать возможные риски и неопределенности разных типов на основе процедуры оценки и вероятных вариантов развития ситуации, обеспечивающей повышение качества окончательных результатов [5].

Информационная технология прогнозирования, предлагаемая в работе, сочетает в себе различные методические подходы к использованию отдельных методов и моделей, а также их комбинаций для получения конечного результата — оптимального управленческого решения — обоснованного прогнозными расчетами [3, 6].

В табл. 1 обобщены основные методические подходы, предлагаемые к применению на разных этапах.

Таблица 1

Методические подходы, реализуемые в информационной технологии прогнозирования

Этап	Методические подходы
1. Сбор информации, формирование модели диагностики	Эмпирические методы исследования, метод статистических наблюдений, анализа и синтеза, системного анализа
2. Обзор состояния и динамики объекта исследования, выявление характерных признаков	Статистический анализ, data-mining, text-mining, факторный анализ, многомерный анализ данных, метод главных компонент, корреляционно-регрессионный анализ, типологические и структурные группировки, RFM-анализ, кластерный анализ, когнитивный анализ
3. Причинно-следственный анализ	Корреляционно-регрессионный анализ, вероятностное моделирование (сети Байеса)

4. Разработка сценариев развития событий	Экспертных оценок, морфологический анализ, сценарное моделирование
5. Обоснование вариантов управленческих решений	Data-mining, нейронные сети, эконометрическое моделирование, SWOT-анализ, когнитивное моделирование
6. Анализ результатов	Метод экспертных оценок, метод Делфи, графический

Как видно из табл. 1, вариантов композиций применения методических подходов к анализу и прогнозированию развития достаточно много, все они проработаны.

2. Результаты

Задачу многокритериального выбора лучшего решения на множестве математических моделей, можно представить следующим образом (1):

$$M = \{M_0(Y, I), M_E(X), M_{OE}, M_D(Q), M_{MO}, M_{ME}, M_U, A, M_H, M_{RS}, M_V\}, \quad (1)$$

где $M_0(Y, I, P)$ — идентифицирующая модель системы; Y — эндогенные переменные; I — вектор управляемых переменных; $M_E(X)$ — модель окружающей среды; X — экзогенные переменные; M_{RS} — модель взаимодействия объекта и окружающей среды; $M_D(Q)$ — модель поведения системы; Q — возмущающие воздействия; M_V — модель взаимодействия с подсистемами других уровней; M_{MO} — модель изменения состояния системы; M_{ME} — модель изменения состояния окружающей среды; M_U — модель управляющей системы; A — правило выбора действий конфигурации объекта; M_H — модель воздействия принимающего решения на систему и результаты исследования; M_{RS} — модель системных рисков.

Важным преимуществом предлагаемого подхода есть возможность разработки моделей для разных горизонтов прогнозирования, ведь от того, какой горизонт прогнозирования выбран, зависит не только выбор типа модели, но и подбор входных данных, в частности, консолидация наиболее значимых факторов. Кроме того, необходимо учесть тенденции развития исследуемых процессов, формально-математическое описание алгоритмов и методов генерирования набора кандидатов-сценариев развития процесса (рис. 3) [7].

3. Обсуждение

В качестве примера использования предложенного подхода можно привести практический пример прогнозирования почасового потребления электроэнергии на 24-часовом интервале, потребителями одной из энергетических компаний России [8].

Входящий набор данных содержит 26112 почасовых наблюдений за период со 2 января 2019 года по 24 декабря 2021 года. В рамках задачи рассматриваются именно почасовые измерения в течение суток, то анализ был выполнен с учетом периодической сезонной составляющей — 24-часовой период, который начинается с 00 часов и заканчивается в 23 часа каждые сутки.

В табл. 2 представлены первые пять и последние два значения показателя степени сходства рядов.

Практическая реализация алгоритма учитывает ситуации: когда $n > m$ и $n < m$. В первом случае должно выполняться $RL \geq (n - m)$, а во втором $CL \geq (n - m)$. Если не ввести эти ограничения, то на практике появляются некорректные ситуации, как показано на рис. 4 и 5.

Если в матрице расстояний D , количество строк больше, чем количество столбцов, т. е. $D[m + 1, m], \dots, D[n, m]$ (рис. 5).

Если в матрице расстояний D , количество строк меньше количества столбцов, то есть $n < m$, то в качестве оптимального пути выбираются все диагональные элементы матрицы D и последние $(m - n)$ элементов n строки матрицы расстояний $D[n, n + 1], \dots, D[n, m]$ (рис. 6).

Этап	Характеристика этапа			
Загрузка входных данных	Загрузка временных рядов исторических данных			
Диагностика данных	Определение аномалий и их обработка (исключение, сглаживание).			
Обработка пропусков	Заполнение пропусков			
Формирование набора дополнительных факторов	Прилагаются факторы, существенные для анализа изучаемых процессов (данные, предоставляемые по желанию пользователя, справочные данные, данные по экзогенным параметрам процесса, экспертные оценки, данные, дополняющие сведения об анализируемом процессе)			
Срок	Очень краткосрочное	Краткосрочное	Среднесрочное	Долгосрочное
Особенности построения прогноза	на каждый час, учитываются циклы внутри суток.	в сутки (неделя) вперед, уч цикли и закономерности в середине недели	Трендовая составляющая, тренд комбинированный фактор с другими регрессорами, производные показатели	Учитываются дополнительные факторы, пользователя (на долгосрочную перспективу)
Включение дополнительных факторов	Дополнительные регрессоры, описывающие процесс	Дополнительные регрессоры, описывающие процесс.	Учитываются дополнительные факторы пользователя	В зависимости от предметной области
Горизонт прогнозирования	от 1 до 24 часов	от суток до месяца	от 1 месяца до 3 лет	более 3 лет
Сценарий	оптимистический, реалистичный, пессимистический			
Построение моделей кандидатов	На каждом горизонте прогнозирования строится модель по историческим данным и данным пользователя			
Этап 1	Одноступенчатые модели (экспоненциальные, регрессионные, авторегрессионные, обобщенные линейные модели)			
Этап 2	Двухступенчатые модели (регрессионные и авторегрессионные модели. модели с включением трендовой составляющей и учетом остатков (разница между реальным и прогнозным значением), которые включаются в модель в виде скользящего среднего, при условии, что между остатками и целевой переменной есть корреляция (автокорреляция). Модели класса экспоненциального сглаживания — Хольта, Тейла-Вейджа, Брауна, Винтерса (с аддитивной или мультипликативной сезонной составляющей), с учетом демпфирующего тренда и другие модификации, Обобщенные линейные модели, нейронные сети, вероятностные модели и нечеткие методы.			
Выбор лучшей модели кандидата	Выбор по результатам выполнения этапа 1 и 2, на основе: средней абсолютной процентной погрешности (MAPE), максимального MAPE, коэффициент детерминации (R^2), среднеквадратичная погрешность (RMSE).			
Построение прогноза	Используются лучшие модели-кандидаты, входные данные: временные ряды изучаемых процессов и дополнительные факторы, значимые на данном горизонте прогнозирования.			

Рис. 3. Методика применения моделей разного типа и их комбинаций в зависимости от горизонта прогнозирования

Таблица 2

Фрагмент отсортированной таблицы значений степени сходства рядов энергопотребления

Номер показателя	Дата	День недели	Степень сходства рядов, %
1	02.12.2021	суббота	97,99
2	21.11.2019	суббота	97,91
3	24.12.2020	суббота	97,88
4	19.11.2019	суббота	97,71
5	18.11.2021	суббота	97,32
...
1087	01.05.2020	воскресенье	53,23
1088	12.04.2019	воскресенье	52,99

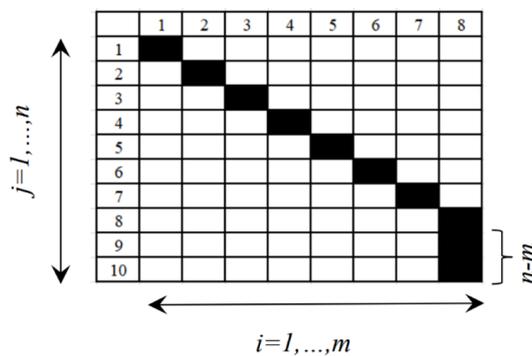


Рис. 4. Случай $n > t$ оптимального пути состоит из диагональных элементов и последних $(n-t)$ элементов t столбца матрицы расстояний

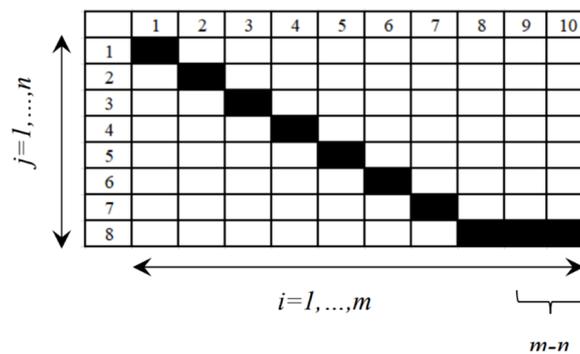


Рис. 5. Случай $n < t$ оптимального пути состоит из диагональных элементов и последних $(t-n)$ элементов n строки матрицы расстояний

Схематически на рис. 6 приведены итерации алгоритма, в качестве ограничений на преобразование заданные параметры $RL = 2$ и $CL = 1$. Серым цветом обозначены допустимые для построения пути элементы, построенный путь обозначен черным цветом.

На рис. 6а изображены начальные значения матрицы расстояний с учетом ограничений на преобразование $RL = 2$ и $RC = 1$, допустимые для анализа элементы изображены серым цветом. На рис. 6б — первая итерация алгоритма. Рис. 6в отражает итерацию алгоритма номер, знаками вопросов обозначены элементы — множество кандидатов для построения пути.

Последняя итерация алгоритма представлена на рис. 6г. Подходящие статистики пути позволяют оценить количество преобразований, которые необходимо осуществить для перемещения по построенному пути в матрице расстояний. Кроме того, подобные статистики могут указывать на различные аномалии, имеющиеся во входных данных.

j \ i	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

а

j \ i	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

б

j \ i	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

в

j \ i	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

г

Рис. 6. Графическое представление работы алгоритма построения пути для матрицы расстояний размером 10 строк и 8 столбцов

Заключение

Учитывая, что результаты прогнозирования создают основу для принятия эффективных решений, проблема выбора оптимального решения может решаться за использование много-модельного подхода, предусматривающего, что для обоснования выбора необходимо исследовать результаты прогнозирования, полученные с использованием множества разнородных моделей, в том числе и математических.

Для создания информационной технологии построения моделей использованы разные классы моделей, выбор которых осуществляется с применением методологии системного анализа, иерархического подхода к созданию и анализу процесса моделирования, адаптации структуры и параметров моделей к особенностям изучаемых процессов и на основе сравнения оценок прогнозов по числовым критериям их качества.

Литература

1. Kondratenko Y. P., Kondratenko G. V., Sidenko I. V. Knowledge-based decision support system with reconfiguration of fuzzy rule base for model-oriented academic-industry interaction. In: Gil-Lafuente, A., Merigó, J., Dass, B., Verma, R.(eds) Applied Mathematics and Computational Intelligence. FIM 2015. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 730. Springer, Cham, P. 101–112. (2018). doi: 10.1007/978-3-319-75792-69
2. Matignon R. Data mining using SAS Enterprise Miner / R. Matignon. – Chicago: Wiley, 2007. – 584 p.

3. Бокс Дж. Анализ временных рядов, прогноз и управление / Д. Бокс, Г. Дженкинс; Перевод с англ. А. Л. Левшина; под ред. В. Ф. Писаренко. – Москва : Изд-во Мир, 1974. – Вып. 1. – 406 с.
4. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: учебное пособие / Ю. П. Лукашин. – Москва : Финансы и статистика, 2003. – 416 с.
5. Ридченко А. И. Математические модели и методы социального и экономического прогнозирования: учебное пособие / А.И. Ридченко. – Омск: ОмГА, 2016. – 84 с.
6. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и прикладная статистика: учебное пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 9-е изд., стереотип. – Москва : Высшая школа, 2003. – 479 с.
7. Ватолина О. В. Методы социально-экономического прогнозирования: учебное пособие / О. В. Ватолина. – Хабаровск : ТОГУ, 2021. – 125 с.
8. Светуных И. С. Методы социально-экономического прогнозирования в 2 т. Т. 1 теория и методология: учебник и практикум для вузов / И. С. Светуных, С. Г. Светуных. – Москва : Юрайт, 2023. – 351 с.
9. Минитаева А. М. Принятие решений в условиях интервального задания предпочтений лиц, принимающих решения / А. М. Минитаева // Сборник материалов конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2022). Санкт-Петербург 5–6 октября 2022г. – СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – С. 198–201.

О МЕТОДЕ ПОСТРОЕНИЯ КВАЗИЭФФЕКТИВНОЙ ГРАНИЦЫ ПОРТФЕЛЯ МИНИМАЛЬНОГО РИСКА В УСЛОВИЯХ ГИБРИДНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ЗАПРЕЩЕННЫХ КОРОТКИХ ПРОДАЖАХ

С. А. Рогонов, И. С. Солдатенко, А. В. Язенин

Тверской государственный университет

Аннотация. В работе представлены метод построения квазиэффективной границы портфеля минимального риска при запрещенных коротких продажах и алгоритмы представления и обработки возможно-вероятностной информации. Возможности подхода демонстрируются на модельном примере с использованием реальных данных Российского финансового рынка.

Ключевые слова: возможно-вероятностная оптимизация; портфель минимального риска; гибридная неопределенность; модель Марковица; ожидаемая доходность; квазиэффективная граница.

Введение

С классическими моделями портфеля минимального риска в условиях стохастической неопределенности можно познакомиться, например, в [1–3]. В работах [4–7] указанные модели обобщены на случай гибридной неопределенности возможно-вероятностного типа. В [8] была аналитически построена совокупность квазиэффективных границ множества инвестиционных возможностей при разрешенных коротких продажах в зависимости от уровня возможности/необходимости. В настоящей работе мы продолжаем эти исследования и разрабатываем соответствующие модели, методы и алгоритмы, но уже при запрещенных коротких продажах.

Полученные результаты демонстрируются на модельном примере четырехмерного портфеля с использованием реальных данных Российского финансового рынка.

1. Портфель минимального риска при запрещенных коротких продажах

Пусть на рынке имеется n различных активов. Портфель инвестора выражается с помощью вектора $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, где w_i — доля капитала, инвестируемая в i -й актив. При этом должно соблюдаться условие нормировки $\sum_{i=1}^n w_i = 1$. Условие недопустимости коротких продаж выражается в том, что $w_i \geq 0$, $i = 1, \dots, n$.

Пусть $R_i(\omega)$ — доходность i -го актива, которая в классическом случае моделируется с помощью случайной величины. Тогда доходность всего портфеля есть взвешенная сумма его активов: $R(w, \omega) = \sum_{i=1}^n R_i(\omega)w_i$. В соответствии с классической теорией Марковица [1] модель портфеля минимального риска с запрещенными короткими продажами с учетом введенных обозначений в самом общем виде может быть записана следующим образом:

$$D[R(w, \omega)] \rightarrow \min_w, \quad (1)$$

$$\begin{cases} E[R(w, \omega)] \geq r, \\ \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad w_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n, \end{cases} \quad (2)$$

где $E[R(w, \omega)]$ — ожидаемая доходность, а $D[R(w, \omega)]$ — риск портфеля, r — уровень доходности, приемлемый для инвестора.

2. Портфель минимального риска в условиях гибридной неопределенности

Обобщим модель (1), (2) на случай гибридной неопределенности. Для этого будем моделировать доходность i -го финансового актива с помощью нечеткой случайной величины $R_i(\omega, \gamma)$. В соответствии с (1), (2) необходимо построить функцию риска портфеля, а его доходность внести в систему ограничений. Идентифицируем эти параметры модели.

Доходность инвестиционного портфеля будет представлять собой нечеткую случайную функцию:

$$R(w, \omega, \gamma) = \sum_{i=1}^n R_i(\omega, \gamma) w_i. \quad (3)$$

Неопределенность вероятностного типа будем снимать на основе принципа ожидаемой доходности. Идентифицируем возможностное распределение математического ожидания функции $R(w, \omega, \gamma)$:

$$E[R(w, \omega, \gamma)] = E\left[\sum_{i=1}^n R_i(\omega, \gamma) w_i\right] = \sum_{i=1}^n \hat{R}_i(\gamma) w_i, \quad (4)$$

где $\hat{R}_i(\gamma)$ — математическое ожидание нечеткой случайной величины $R_i(\omega, \gamma)$ при фиксированном ω .

Для получения $D[R_i(\omega, \gamma)]$ нам нужна формула ковариации двух нечетких случайных величин. Определим ее, следуя Фенгу [9]:

$$\text{cov}(R_i, R_j) = \frac{1}{2} \int_0^1 \left(\text{cov}(R_i^-(\omega, \alpha), R_j^-(\omega, \alpha)) + \text{cov}(R_i^+(\omega, \alpha), R_j^+(\omega, \alpha)) \right) d\alpha,$$

где $R_k^-(\omega, \alpha)$, $R_k^+(\omega, \alpha)$ — границы α -уровневых множеств нечеткой случайной величины $R_k(\omega, \gamma)$. Тогда дисперсия i -го актива будет иметь следующий вид:

$$D[R_i(\omega, \gamma)] = \frac{1}{2} \int_0^1 \left(D[R_i^-(\omega, \alpha)] + D[R_i^+(\omega, \alpha)] \right) d\alpha. \quad (5)$$

Введем следующие обозначения: $\sigma_{ij} = \text{cov}(R_i(\omega, \gamma), R_j(\omega, \gamma))$, $\sigma_i^2 = D[R_i(\omega, \gamma)]$. Используя введенные обозначения и свойства определенной по Фенгу дисперсии запишем формулу для $D[R(w, \omega, \gamma)]$:

$$D[R(w, \omega, \gamma)] = \sum_{i=1}^n w_i^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{i < j} w_i w_j \sigma_{ij}. \quad (6)$$

После введения ограничения по возможности (необходимости) на приемлемый для инвестора уровень ожидаемой доходности получаем следующую обобщенную модель портфеля минимального риска по Марковицу:

$$D[R(w, \omega, \gamma)] \rightarrow \min_w, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \tau \{E[R(w, \omega, \gamma)] \geq r\} \geq \alpha, \\ \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad w_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n, \end{cases} \quad (8)$$

где $\tau \in \{\pi, \nu\}$, π — мера возможности, ν — мера необходимости, α — уровень возможности/необходимости, r — уровень доходности, приемлемый для инвестора.

Основываясь на результатах работ [10, 11], для снятия неопределенности возможностного типа построим эквивалентные детерминированные аналоги модели (8):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \hat{R}_i^+(\alpha) w_i \geq r \quad (\text{при } \tau = \pi) \text{ ИЛИ } \sum_{i=1}^n \hat{R}_i^-(1-\alpha) w_i \geq r \quad (\text{при } \tau = \nu), \\ \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad w_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n, \end{cases} \quad (9)$$

где $\hat{R}_i^+(\alpha)$ — правая граница α -уровневого множества, $\hat{R}_i^-(1-\alpha)$ — левая граница $(1-\alpha)$ -уровневого множества ожидаемой доходности i -го финансового актива. Всюду далее вместо $\hat{R}_i^+(\alpha)$ и $\hat{R}_i^-(1-\alpha)$ будем использовать единое обозначение \bar{R}_i , смысл которого будет зависеть от контекста.

3. Квазиэффективная граница портфеля минимального риска

В контексте гибридной неопределенности мы будем называть эффективную границу квазиэффективной, поскольку в силу присутствия неопределенности возможностного типа она теперь зависит от уровня α , который задается экспертом.

В работе Барбаумова В. Е. [3, с. 159] рассмотрен метод построения эффективной границы классического портфеля минимального риска (1), (2) на основе метода множителей Лагранжа. Обобщим его на случай портфеля минимального риска в условия гибридной неопределенности возможно-вероятностного типа (7), (9). Для этого сначала заменим в (9) неравенство на равенство. Это возможно сделать, потому что если r находится на эффективной границе портфеля, то минимальное значение риска достигается при выполнении равенства в (9). Также пока не будем запрещать короткие продажи — это мы сделаем в следующем разделе. В результате функция Лагранжа примет вид:

$$L(w, \lambda_1, \lambda_2) = D[R(w, \omega, \gamma)] + \lambda_1 \left(\sum_{i=1}^n \bar{R}_i w_i - r \right) + \lambda_2 \left(\sum_{i=1}^n w_i - 1 \right).$$

С целью получения выражений в закрытой аналитической форме положим $\sigma_{ij} = 0$. Тогда после подстановки формулы (6) выражение упростится до:

$$L(w, \lambda_1, \lambda_2) = \sum_{i=1}^n w_i^2 \sigma_i^2 + \lambda_1 \left(\sum_{i=1}^n \bar{R}_i w_i - r \right) + \lambda_2 \left(\sum_{i=1}^n w_i - 1 \right). \quad (10)$$

Продифференцируем (10) по w_i ($i = 1, \dots, n$), λ_1 , λ_2 , результаты дифференцирования приравняем к нулю и получим следующую систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} 2\sigma_1^2 w_1 + \lambda_1 \bar{R}_1 + \lambda_2 = 0, \\ 2\sigma_2^2 w_2 + \lambda_1 \bar{R}_2 + \lambda_2 = 0, \\ \dots \\ 2\sigma_n^2 w_n + \lambda_1 \bar{R}_n + \lambda_2 = 0, \\ w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1, \\ \bar{R}_1 w_1 + \bar{R}_2 w_2 + \dots + \bar{R}_n w_n = r. \end{cases} \quad (11)$$

Сделаем замену переменных:

$$\psi_i = \frac{1}{\sigma_i^2}; \quad S_0 = \sum_{i=1}^n \psi_i; \quad S_1 = \sum_{i=1}^n \psi_i \bar{R}_i; \quad S_2 = \sum_{i=1}^n \psi_i \bar{R}_i^2$$

и решим систему (11). В результате получаем:

$$w_i = \frac{\psi_i}{S_0 S_2 - S_1^2} \left((S_0 \bar{R}_i - S_1) \times r + (S_2 - S_1 \bar{R}_i) \right). \quad (12)$$

Результат вычислений получен с применением пакета символьной алгебры SymPy.

4. Квазиэффективная граница при запрещённых коротких продажах

Добавив ограничения $w_i \geq 0$, $i = 1, \dots, n$ в (11), получаем систему линейных неравенств:

$$\frac{\psi_i}{S_0 S_2 - S_1^2} \left((S_0 \bar{R}_i - S_1) \times r + (S_2 - S_1 \bar{R}_i) \right) \geq 0. \quad (13)$$

Решив систему (13), мы получим наибольшую доходность r_0 , при которой w_i для некоторых активов i становится равным нулю. Обозначим множество этих активов P_0 .

Теперь решим задачу построения квазиэффективной границы портфеля минимального риска, используя только активы \bar{P}_0 (где \bar{P}_0 — это дополнение множества P_0). Повторив данную процедуру $k \leq n$ раз, получим множество интервалов уровня доходности $(-\infty; r_0]$, $(r_0; r_1]$, \dots ,

$(r_{k-1}; r_k]$, на каждом из которых квазиэффективная граница портфеля минимального риска состоит из соответствующих множеств активов $U, \bar{P}_0, P_0 \cup P_1, \dots, P_0 \cup P_1 \cup \dots \cup P_k$, где $U = \{1, 2, \dots, n\}$.

5. Спецификация модели для одного класса нечетких случайных величин

Специфицируем модель портфеля минимального риска в условиях гибридной неопределенности и метод построения ее квазиэффективной границы для одного конкретного класса нечетких случайных величин $R_i(\omega, \gamma)$, моделировать который будем с помощью сдвиг-масштабного представления:

$$R_i(\omega, \gamma) = a_i(\omega) + \delta_i(\omega)X_i(\gamma).$$

Здесь нечеткие величины $X_i(\gamma) \in Tr(c_i, d_i)$ взаимно минисвязаны, а коэффициенты сдвига и масштаба $a_i(\omega), \delta_i(\omega)$ — независимые случайные величины, равномерно распределенные на отрезках $[l_i^a, r_i^a]$ и $[l_i^\delta, r_i^\delta]$, соответственно. Для удобства положим $l_i^\delta \geq 0$, чтобы не вводить модуль в коэффициент нечеткости величины $\delta_i(\omega)X_i(\gamma)$. Напомним, что $Tr(a, d)$ — это класс треугольных нечетких величин [11]. Обозначим:

$$\hat{a}_i = E[a_i(\omega)] = \frac{l_i^a + r_i^a}{2}, \quad \hat{\delta}_i = E[\delta_i(\omega)] = \frac{l_i^\delta + r_i^\delta}{2},$$

$$\tilde{a}_i = D[a_i(\omega)] = \frac{(r_i^a - l_i^a)^2}{12}, \quad \tilde{\delta}_i = D[\delta_i(\omega)] = \frac{(r_i^\delta - l_i^\delta)^2}{12}.$$

Основываясь на работах [8, 9], получаем следующую спецификацию модели (7), (9):

$$\sum_{i=1}^n w_i^2 \left(\tilde{a}_i + \tilde{\delta}_i \times \left(c_i^2 + \frac{d_i^2}{12} \right) \right) \rightarrow \min_w,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \left(\hat{a}_i + \hat{\delta}_i c_i + \frac{\hat{\delta}_i d_i}{2} \times (1 - \alpha) \right) w_i \geq r \quad (\text{при } \tau = ' \pi ') \\ \text{ИЛИ } \sum_{i=1}^n \left(\hat{a}_i + \hat{\delta}_i c_i - \frac{\hat{\delta}_i d_i}{2} \times \alpha \right) w_i \geq r \quad (\text{при } \tau = ' \nu ') \\ \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad w_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n. \end{array} \right.$$

6. Модельный пример

В качестве примера возьмем четырёхмерный портфель ($n = 4$), основанный на реальных исторических данных за 2015–2018 годы (рис. 1).

Предварительная обработка данных проходит в несколько этапов:

1. Выбираются наибольшее, наименьшее и среднее значения цен торгов за каждый день.
2. Полученные данные агрегируются ежемесячно функциями максимума, минимума и среднего.
3. Затем по каждому месяцу моделируется долгосрочное инвестирование сроком на 12 месяцев, причём:
 - наибольшая доходность — это «макс. в мес. продажи» / «мин. в мес. покупки»,
 - наименьшая доходность — это «мин. в мес. продажи» / «макс. в мес. покупки»,
 - средняя доходность — это «сред. в мес. продажи» / «сред. в мес. покупки».

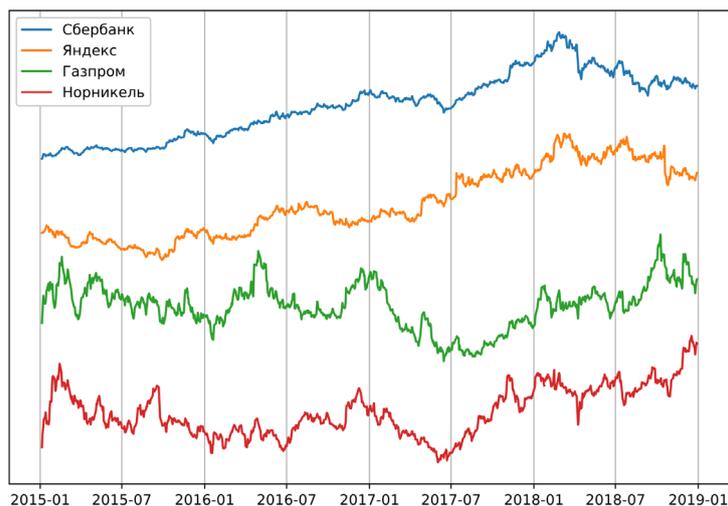


Рис. 1. Цены акций четырех компаний на Мосбирже (не в масштабе)

4. Последним шагом полученные значения доходностей агрегируются ещё раз окном в 12 месяцев, и рассчитываются статистические характеристики: математическое ожидание и дисперсия — отдельно по трём рядам (рис. 2).

После предварительной обработки данных мы имеем статистическую информацию по каждому активу на каждый месяц 2017 года. Далее следует огрубление статистических данных до равномерного распределения (рис. 3). Это необходимо, так как в нашем модельном примере случайные факторы имеют равномерное распределение.

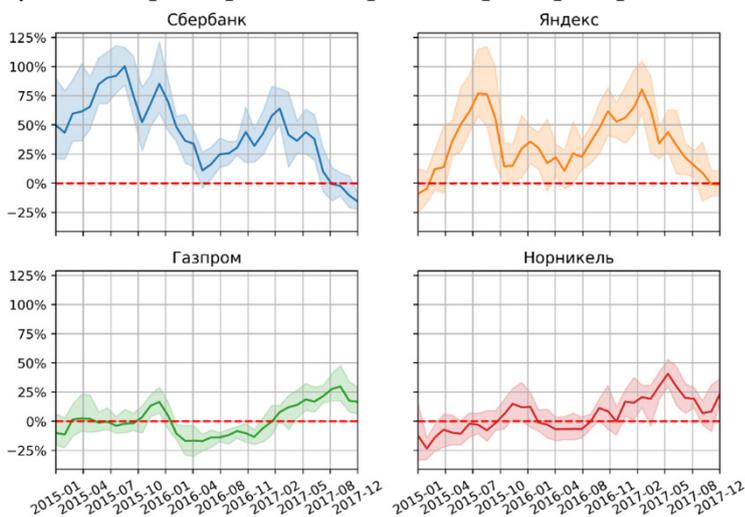


Рис. 2. Доходность долгосрочного вклада (12 месяцев)

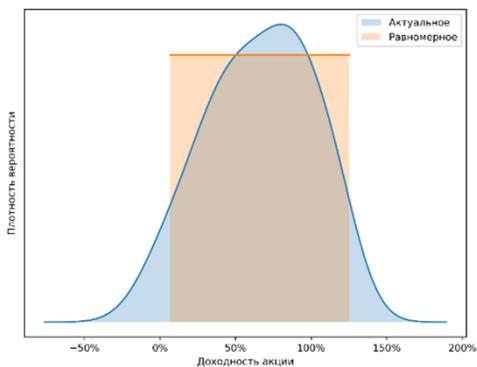


Рис. 3. Распределение вероятностей доходности

Из получившихся трех равномерных распределений конструируем нечеткую случайную величину (рис. 4) с модальным значением, равным средней доходности, левой границей, равной наименьшей доходности, и правой, равной наибольшей доходности. В настоящей работе мы используем класс треугольных нечётких величин $Tr(a, d)$ с равными плечами, из-за чего модель (изображена пунктиром) вновь немного отличается от реальных данных (сплошной цвет). Зелёным пунктиром отмечена зона безубыточности.

Особенностью сдвиг-масштабного представления является возможность построения инвестиционных моделей для целого спектра сценариев: от пессимистичного до оптимистичного — путём выбора α -уровня.

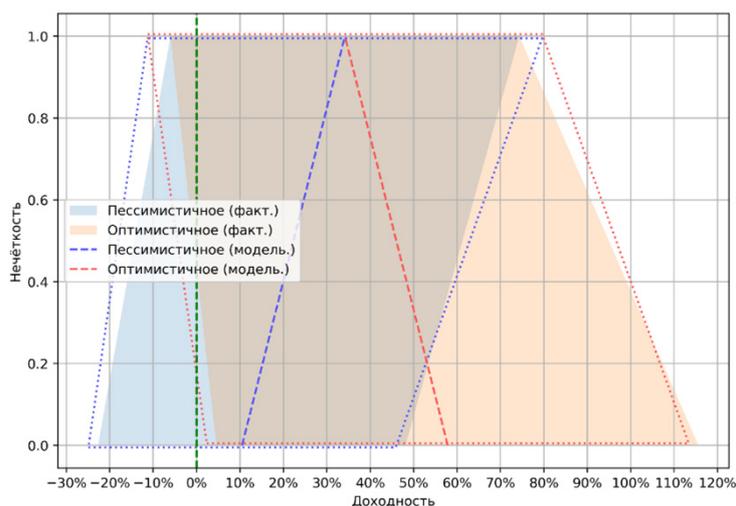


Рис. 4. Сдвиг-масштабное представление. Яндекс (2017-08-01)

На развёртке (рис. 5) мы наблюдаем эволюцию характеристик во времени: от раннего периода (ромб) до позднего (крест), и эволюцию характеристик в сценарии инвестиционного прогноза: от пессимистичного (α -уровень единица в необходимом контексте) до самого оптимистичного (α -уровень нуль в возможностном контексте).

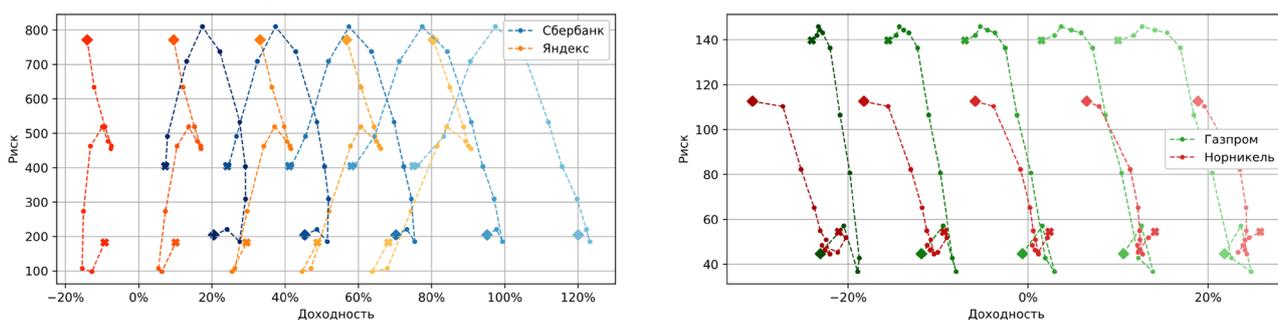


Рис. 5. Характеристики активов с развёртками во времени и α -уровне

В заключение на рис. 6 продемонстрируем результаты разработанных нами обобщённого метода и алгоритма, взяв данные об активах на декабрь 2017 года, а инвестиционный прогноз примем сбалансированным (середина между пессимистичным и оптимистичным). На рис. 6 изображены параболы, представляющие минимальные границы портфелей при различных комбинациях активов для разрешенных коротких продаж. На правом нижнем графике рис. 6 представлена вся минимальная граница портфеля при запрещенных коротких продажах, а часть минимальной границы справа от жирной пунктирной линии представляет собой квазиэффективную границу, составленную из частей соответствующих парабол.

Заключение

В статье разработан метод и алгоритм построения квазиэффективной границы портфеля минимального риска в условиях гибридной неопределенности возможно-вероятностного типа при запрещенных коротких продажах. Получена формула зависимости квазиэффективной границы от уровня возможности/необходимости. Результаты проиллюстрированы на модельном примере. В плане дальнейших исследований, как нам представляется, для более адекватной оценки инвестиционных возможностей, актуальным является распространение предложенного в статье подхода на случай слабой t-нормы.

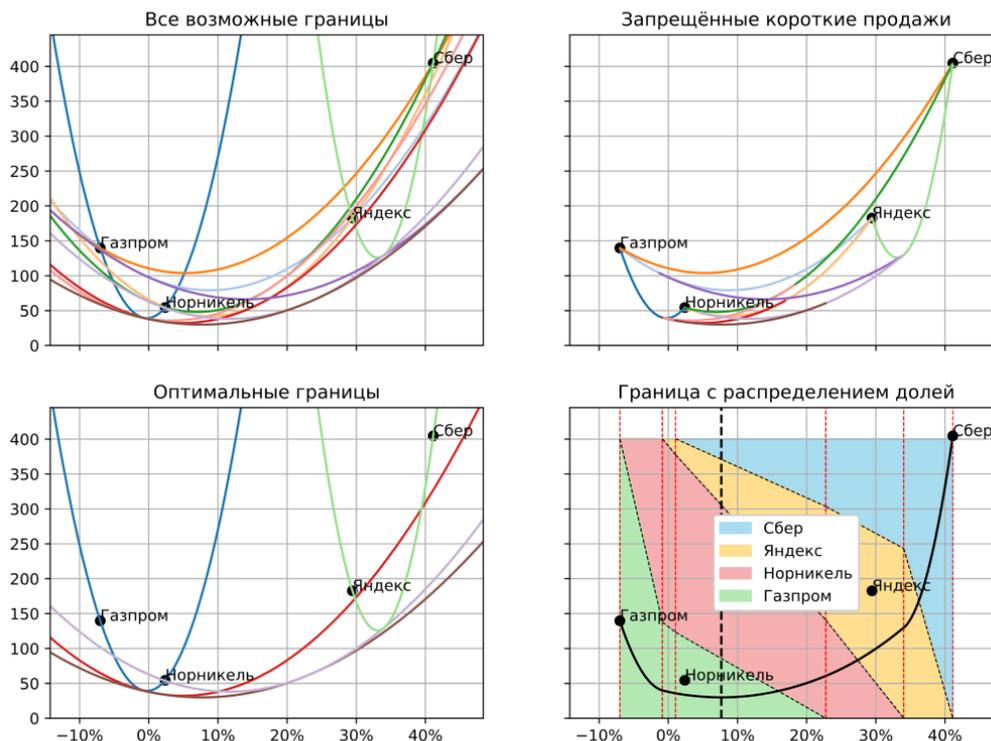


Рис. 6. Параболы, содержащие квазиэффективные границы (части правых ветвей) множества инвестиционных возможностей

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №20-01-00669.

Литература

1. Markowitz H. Portfolio Selection / H. Markowitz // The Journal of Finance. – 1952. Vol. 7, № 1. – P. 77–91.
2. Крушвиц Л. Инвестиционные расчеты: Учеб. для вузов / Л. Крушвиц; Пер. с нем. под общ. ред. В. В. Ковалева и З. А. Сабова. – СПб. и др. : Питер, 2001. – 409 с.
3. Барбаумов В. Е. Финансовые инвестиции: Учеб. пособие / В. Е. Барбаумов, И. М. Гладких, А. С. Чуйко. – М.: Изд-во Рос. экон. акад. им. Г.В. Плеханова, 2003.
4. Yazenin A. V. Possibilistic–Probabilistic Models and Methods of Portfolio Optimization / A. V. Yazenin // Studies in Computational Intelligence. Vol. 36-D. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. – P. 241–259.
5. Yazenin A. A portfolio of minimum risk in a hybrid uncertainty of a possibilistic-probabilistic type: comparative study / A. Yazenin, I. Soldatenko // Advances in Fuzzy Logic and Technology. – Vol. 643. – 2018. – P. 551–563.
6. Солдатенко И. С. Об одной задаче портфельного анализа при мягких ограничениях / И. С. Солдатенко, А. В. Язенин // Нечеткие системы и мягкие вычисления. – 2020. – Т. 15, № 1. – С. 64–76.
7. Yazenin A. V. Model of a minimal risk portfolio under hybrid uncertainty / A. V. Yazenin, I. S. Soldatenko // Control and Cybernetics. – 2021. – Vol. 50, № 2. – P. 315–332.
8. Rogonov S. On the quasi-efficient frontier of the set of optimal portfolios under hybrid uncertainty with short sales allowed / S. Rogonov, I. Soldatenko, A. Yazenin // Control & Cybernetics. – 2022 (in print)

9. *Feng Y.* The variance and covariance of fuzzy random variables and their applications / Y. Feng, L. Hu, H. Shu // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2001. – Vol. 120, № 3. – P. 487– 497.
10. *Yazenin A.* Possibilistic Optimization / A. Yazenin, M. Wagenknecht. – Cottbus: Brandenburgische Technische Universität, 1996.
11. *Язенин А. В.* Основные понятия теории возможностей. – М. : Физматлит, 2016. – 142 с.

К ВОПРОСУ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКОЙ ЛОГИСТИКОЙ С УЧЕТОМ НАРАСТАЮЩЕЙ УРБАНИЗАЦИИ

В. С. Тарасов, Т. Е. Смоленцева

МИРЭА — Российский технологический университет

Аннотация. В данной статье рассмотрен основной принцип функционирования логистики в городских условиях. Проводимый анализ по городскому развитию логистики, выявил ряд актуальных вопросов, требующих рассмотрения. Проанализированы направления, требующие модернизации, с целью повышения эффективности решаемых задач, с учетом возможного применения в качестве инструментов информационные технологии и машинное обучение.

Ключевые слова: экономический бум, умное управление (smart governance), умная мобильность (smart mobility).

Введение

Согласно Международным данным ООН «Развитие урбанизации в мире будет прогрессировать, если рассматривать общую численность людей, то примерно к 2050 году, количество людей на земном шаре увеличится до 11 миллиардов.» По результатам проведенных расчетов, основная часть населения будет жить в больших городах, самые многочисленные города будут в Азии, Южной Америке, Африке. Численность городского населения будет от одного миллиона до 40 миллионов жителей, тем самым увеличится количество городов миллионников и масштаб внешней и внутренней логистики.

Этот ускоренный и не обратимый рост ставит перед нами задачи к организации управления. Урбанизация заставляет руководство административных центров искать решения по поиску и анализу наилучших тактических и стратегических решений в области логистики городов. Кроме того, применять различные средства по управлению урбанизированными пространствами, чтобы они могли беспрепятственно работать и развиваться в соответствии с моделями устойчивого развития. Стоит принять во внимание следующие факторы, что большинство администраций городов должны применять обширные знания в сфере передового принятия решений, которые на практике используются при реализации проектов, используемыми в плотно населенных городах Европы и Азии, а также городах Китая, которые уже сталкиваются с перенаселением и поддерживать современные технологии и их фонды в финансировании.

Основной текст

Проведя анализ современных проблем, можно выявить основные аспекты, на которые стоит обратить пристальное внимание при решении нарастающих логистических задач в управлении организационными системами.

Выявленные проблемы управленческого и административного характера, которые могут возникать ввиду недоступности отдельного административного управления, которое занималось бы вопросами логистики, в свою очередь, ведет к недостаточному развитию логистической инфраструктуры и ограничению дальнейшего процветания логистического предпринимательства.

В данный момент, имеется нужда в опытных специалистах, которые обладают не только теорией в сфере логистики и ее услуг, но и богатым опытом как в практической работе, так и в организационной деятельности в этой сфере.

Применение вышедших из оборота технологий взамен более современных и продвинутых, ведет к накоплению различных проблем с идентификацией продукта, дальнейшей путаницей на складских предприятиях и в общем, идет замедление доставки товара до пункта назначения.

Так же существует трудности в сфере управленческого звена, состоящие в недопонимании руководством четкого представления о месте, которое занимает логистика в структуре компании.

Присутствует не равномерное развитие системы перемещения услуг и товаров, что ведет к отсутствию единого понимания в развитии системы распределения организованных товарных рынков на уровне среднего и крупного опта. Следует упомянуть, что существующая проблема не имеет постоянного эффекта, а носит не системный характер в определенных случаях.

Одной из самых основных проблем в транспортной логистике может выступать не развитая и не соответствующая современным стандартам транспортная инфраструктура. Так же, в проведенном анализе можно сделать вывод, что в некоторых регионах нет в нужном объеме грузовых терминалов, или их низкий технологический уровень.

Не эффективное создание маршрутов по доставке до пункта назначения продукции и не действенное использование транспортных средств при доставке товаров.

Имеют место быть и проблемы с персоналом. Не соблюдение водителем установленного графика и маршрута движения стоит отнести к человеческому фактору. Проблема арендного транспорта — малое наличие собственного транспорта в имуществе компании.

Проблема складской логистики может быть и из-за уменьшения грузопотока от 20 % до 40 % на примере событий 2020 года и последующим резком возрастании грузопотока в 2021 году. Это все характеризует цикличность экономики и ее сложность в прогнозировании. Из этого следует, что после резкого падения идет незамедлительный резкий рост. В качестве примера цикличности экономики и производства может служить еще цикл 2020 и 2021 годов, как нехватки чипов. Пример: экономический бум [1, 4].

Проблема в отсутствии функции накопления нужной информации для аналитики на предприятиях. В своей основе получаемая информация носит не структурированный и неоперативный характер. В частности, компании имеют склонность к ухудшению своих показателей из-за получения недостоверной информации.

Так же проблемы могут быть вызваны из-за несоответствия современным стандартам коммуникационных сетей по структуре и техническому уровню для информационных систем в логистике. Недоступность информационного взаимодействия между поставщиками-производителями и покупателями-потребителями. Недоступность современных технологических приспособлений информационного обеспечения на предприятиях. Отсутствие единой национальной коммуникационной информационной системы, которая была бы способна передавать информацию о материальных потоках и осуществлять контроль за их продвижением.

На основе описанных проблем сформирована схема (рис. 1).

Заключение

Вышеперечисленные проблемы могут привести к более продолжительному времени по доставке товаров от производителя к покупателю, и как следствие, повышенным перерасходам горюче-смазочных материалов, увеличению временных и денежных затрат. Это также представляет угрозу для будущего развития транспортной системы в целом, что, в свою очередь, замедляет общий экономический рост не только в России, но и других странах мира. Данная проблема может негативно сказаться на будущей логистике. Но также чрезмерное наращивание дорожной инфраструктуры в городах с неудобной планировкой, например, радиально-кольцевой может привести к неравному соотношению дорог и их нагромождению, что

Предложения с учетом применения информационных технологий и машинного обучения:

1. Проведение анализа кадровой политики и подготовка квалифицированных специалистов логистической отрасли, которые будут определять особенности организации процессов внутри логистической компании.

2. Усовершенствование процессов логистической деятельности, а именно процессов отслеживания, маркировки, транспортировки, распределения и складирования продукции.

3. Системное внедрение современных цифровых и информационных технологий в логистические процессы.

4. Увеличение финансирования для обновления и введения инноваций в парк подвижного состава, автодорожного полотна, постройки и улучшения технологического уровня грузовых терминалов.

а) Увеличение эффективности использования транспортных средств за счёт правильного выбора маршрута и автоматизации погрузки-разгрузки груза:

– применение мини роботов для мелкой сортировки и отгрузки товаров на складах пример: компания Amazon [5, 6].

– использование нейронных сетей и алгоритмов для анализа маршрутов и использование данных более разработки кратчайших путей [3, 5].

5. Контроль экономического бума после кризиса и плавная подготовка к нему (выкуп обанкротившихся складов и предприятий и последующее их развитие с передачей в частный сектор).

6. Увеличение финансирования, путём привлечения сторонних инвестиций, для обновления и модернизации складских помещений, а также материально-технической базы.

7. Привлечение инвестиций для установки современного технического обеспечения на предприятии для ускорения и автоматизации отгрузки товаров [1].

8. Введение единой межнациональной коммуникационной информационной системы [2].

9. Создание отраслевых и внутрипроизводственных центров, которые будут управлять одновременно информационными и материальными потоками на предприятии.

10. Увеличение гражданского транспорта для освобождения проезжих частей для логистических транспортных средств и увеличение автоматических пунктов выдачи товаров для разногабаритных товаров на примере пунктов выдачи международных логистических компаний (маркетплейсов) [1].

а) Стремление к переходу к умному городу и его аспектам таким как: умная экономика (smart economy), умная мобильность (smart mobility), умный городская среда (smart living), умное управление (smart governance) [4].

Литература

1. Глушко В. А. Информационные системы в логистике и проблемы их эффективного применения / В. А. Глушко, Д. А. Исламова, В. А. Глушко – 2019. – № 2 (240). – С. 207–209.

2. Танигучи Э. Концепции городской логистики для устойчивых и пригодных для жизни городов / Э. Танигучи // Процессы. Социальные и поведенческие науки. – 2014. – 151 с.

3. Дикин М. Определение умных и устойчивых городов / М. Дикин. – Эдинбург, 2014. – 17 с.

4. Аргунова М. В. Модель умного города как проявление нового технического уклада / М. В. Аргунова. – 2016. – 10 с.

5. Пустохина И. В. Современные тенденции развития логистики / И. В. Пустохина. – М. : Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, 2017. – С. 339–345.

6. Logistics innovation capability and its impacts on the supply chain risks in the Industry 4.0 era Michael Wang, Sobhan Asian, Lincoln C. Wood, Bill Wang Modern Supply Chain Research and Applications ISSN: 2631-3871 Open Access. Article publication date: 11 February 2020 Issue publication date: 12 May 2020.

К ВОПРОСУ ФОРМИРОВАНИЯ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ

Р. С. Толмасов

МИРЭА – Российский технологический университет

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема подбора исполнителей для проектов различной направленности. Отмечается отсутствие единого информационного пространства, необходимого для создания алгоритмов подбора персонала. В качестве основы для его формирования предлагается использовать созданную в 2016 году Национальную систему квалификаций. Даны краткие определения необходимых понятий и предлагается вариант использования НКС в алгоритмах подбора исполнителей и вводится предположение о существовании связей между компетенциями, составляющих трудовые функции. В результате получена необходимая методологическая основа для формирования алгоритма подбора и определено направление дальнейшего исследования.

Ключевые слова: подбор персонала, трудовые ресурсы, трудовые стандарты, единое информационное пространство, управление проектами, информационные технологии, информационные системы.

Введение

Инновационная деятельность и активное внедрение новых технологий в различные отрасли народного хозяйства увеличили количество предприятий, объединений и других организаций, реализующих процессы с целью получения уникального результата, иными словами — проектов. Выполнение проектов и качество полученных результатов зависит от множества факторов и в первую очередь от эффективности управления проектами, которое в настоящее время выделено в отдельную прикладную дисциплину.

К задачам управления проектами относятся:

- планирование этапов проекта и необходимого ресурсного обеспечения;
- налаживание рабочего процесса и эффективное управление им;
- контроль над рациональным использованием и экономией ресурсов;
- анализ издержек и приведение их к минимуму;
- эффективное распределение временных нагрузок, содействие выполнению задачи в заданные сроки.

Сама реализация проекта является одним из заключительных процессов управления проектами.

Проект — это деятельность, направленная на получение конкретного уникального результата (продукта). Результат достигается путем преобразования поступающих в проект ресурсов посредством труда исполнителей и этот процесс может быть схематично изображен в виде контекстной диаграммы (рис. 1).

Точное определение конечного продукта проекта, необходимых для его выполнения ресурсов, состав и содержание нормативной документации происходит на этапах планирования проекта и может значительно отличаться от проекта к проекту. Действия, необходимые для решения конкретных задач проекта, ограниченные сроками и целями проекта образуют проектную деятельность. Сложность проектной деятельности и управления проектами обуславливает актуальность применения информационных технологий и систем для решения задач данной области, к которым предъявляются различные требования, например: управление сроками проекта, его стоимостью, коммуникациями, содержанием, рисками и ресурсами.

Основными функциями информационных систем (ИС) управления проектами являются [1]:

- автоматизация всех процессов;
- единое информационное пространство;
- документооборот;
- оптимизация всех процессов в организации;
- планирование и прогнозирование принимаемых решений.

Существует большое количество ИС, использующих различные современные технологии для управления проектами, например: MS Project, Open Plan, SpiderProject, 1С-Парус: Управление проектами и другие [2]. Но в настоящее время ни одна из предлагаемых на рынке систем не может полностью обеспечить решение задач менеджмента проектов.

В рамках данной статьи будет рассмотрена проблема автоматизации подбора исполнителей проекта, решение которой позволит повысить эффективность выполнения проектов.



Рис. 1. Контекстная диаграмма процесса

1. Основная часть

Процесс «Выполнение проекта» может быть декомпозирован до отдельных элементарных операций, выполняемых отдельным исполнителем или техническим средством (совместно или по отдельности), это действие позволит четко определить набор действий, выполняемых конкретным исполнителем. Каждое действие требует от исполнителя определенного навыка или знания (компетентность), чтобы выполнить его. Таким образом, распределение трудовых ресурсов представляет собой более комплексную задачу, при решении которой учитываются как формальные признаки (пол, стаж, должность, уровень образования и т. д.), так и ряд признаков, которые характеризуют профессиональные компетенции человека.

Проблема подбора заключается в определении того, кто из исполнителей обладает достаточной компетентностью для выполнения необходимых операций. В настоящее время для этого применяется оценка сотрудника по формальным параметрам: уровень образования, специальность, информация о предыдущем трудовом опыте, а также проведение собеседований и анкетирования. Учитывая большое количество потенциальных кандидатов, процесс отбора исполнителей может занять продолжительное время. Формирование методов отбора, способного автоматически оценить и ранжировать списки кандидатов по степени соответствия требованиям по каждой позиции способно существенно сократить издержки на данном этапе.

Тем не менее, построение подобного алгоритма требует сформированного единого информационного пространства (ЕИП) для всех участников процесса: проектных организаций и кандидатов. И необходимая база для создания этого пространства уже создана.

В ответ на изменения, происходящие на рынке труда и связанные с появлением новых или изменением требований к существующим профессиям в целях согласования потребностей рынка труда и предложением формируемого системой образования страны Федеральным законом №238 от 3 июля 2016 года законом Российской Федерации фактически создаётся аппарат национальной системы квалификации, основной задачей которого является регулирование отношений, возникающих при проведении независимой оценки квалификации [4].

Национальная система квалификаций (НСК) — совокупность механизмов правового и институционального регулирования квалификаций работников со стороны рынка труда и предложения квалификаций со стороны системы образования и обучения.

Таким образом, НСК является хорошей основой для создания ЕИП для решения задачи подбора исполнителей проекта так как главной задачей созданного аппарата является проведение независимой оценки соответствия уровню квалификации соискателя требованиям профессиональных стандартов, а также разработке и утверждению средств для осуществления этой оценки. НСК опирается на профессиональные стандарты, которые подверглись серьёзной доработке, а с 1 июля 2016 года [5] стали обязательны к применению всеми работодателями, независимо от формы собственности организации или его статуса. Профессиональные стандарты в первую очередь применяются:

- при определении наименования должностей;
- определения требований к квалификации;
- определения положенных льгот и компенсаций. [6, 7].

В ТК РФ (часть 2 ст.195-1) даётся следующее определение профессионального стандарта:

Профессиональный стандарт — это характеристика квалификации, необходимой работнику для осуществления определенного вида профессиональной деятельности.

Структура профессионального стандарта приведена на рис. 2.

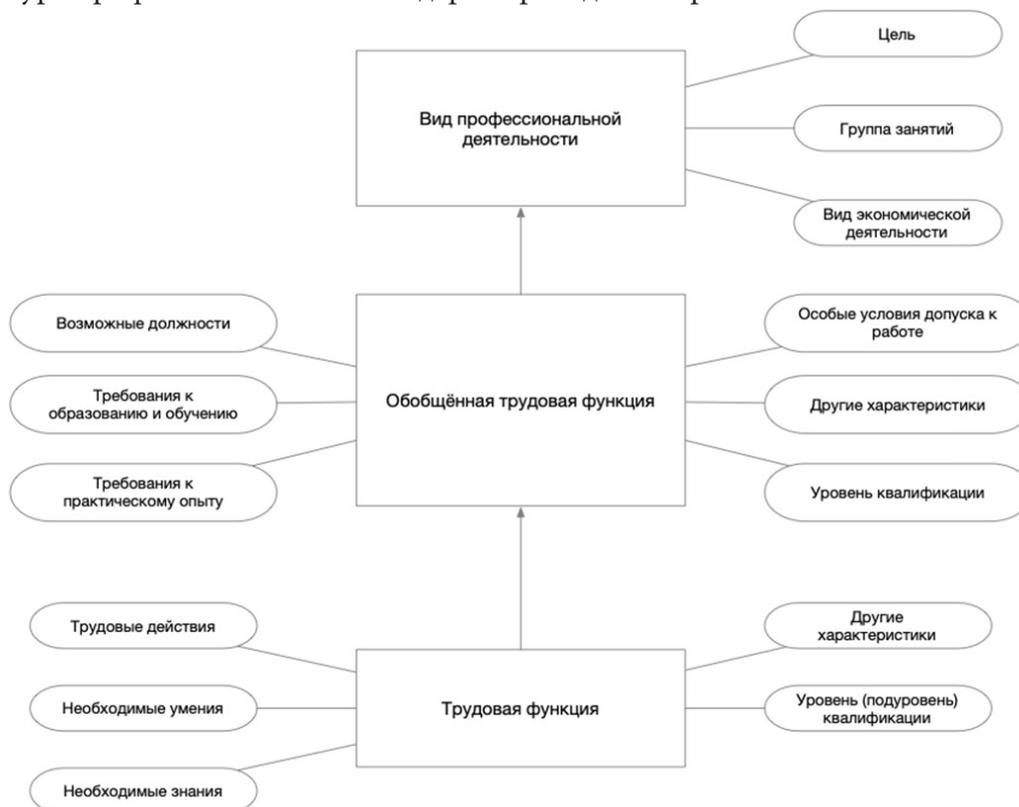


Рис. 2. Структура трудового стандарта

Опираясь на трудовые стандарты, можно разложить требования к исполнителю, изложенные в рабочей инструкции для конкретной операции на набор компетенций и использовать их при осуществлении выборок из пула (рис. 3).

Использование декомпозиции трудовых функций на знания и умения необходимо для нахождения взаимосвязей между трудовыми функциями. Это позволит включить в выборку исполнителей, которые обладают необходимыми компетенциями, но при этом по формальным критериям будут отброшены из-за несоответствия.

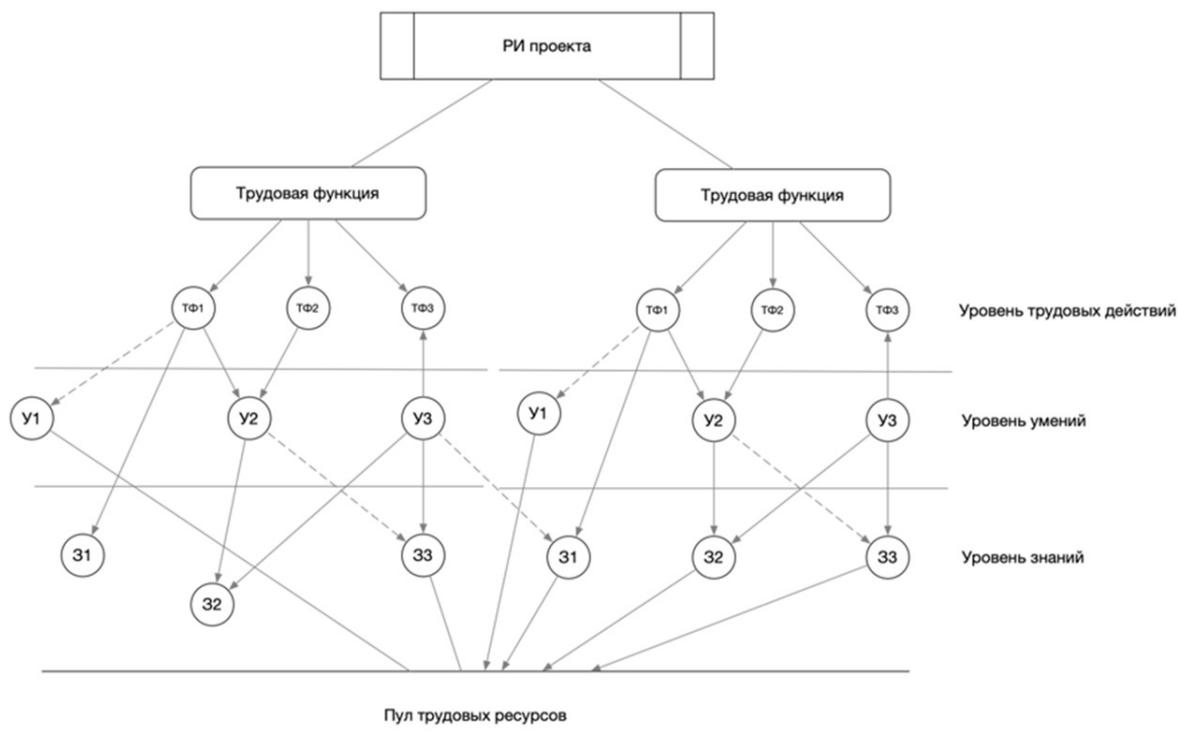


Рис. 3. Формирования критериев выбора

Для более точного подбора необходимо провести оценку каждой составляющей трудового действия для каждого сотрудника, что возможно при длительном наблюдении и анализе результатов деятельности исполнителя, то есть на основе анализа массива исторических данных, например сведения о выполняемых операциях в предыдущих проектах.

Использование единого информационного пространства и системы оценки квалификаций, а также анализ исторических данных об исполнителях способствует созданию эффективного алгоритма формирования списка исполнителей, наиболее подходящих для участия в конкретном проекте.

Заключение

Рассмотренная Национальная система оценки квалификаций и ее связь с обязательными для применения всеми работодателями трудовыми стандартами позволяет использовать ее как методическую основу для создания алгоритма подбора исполнителей с заданной степенью соответствия кандидата требованию проекта. Для подбора исполнителя нужны четкие требования к трудовым действиям, которые должен выполнить исполнитель с одной стороны и полную информацию о сотруднике с другой стороны. Данные о сотруднике должны быть разнообразны и включать как формальные данные (уровень образования, стаж и другие), так и специальные, представленные, например, в виде пар «компетенция — оценка» определенные на основе исторических данных. Таким образом, для реализации алгоритма требуется использование специально спроектированного хранилища данных, включающего в себя все необходимые сведения.

Литература

1. Сафонова А. А., Куксачева О. Н. Информационные системы управления проектами // Формула менеджмента. – 2020. – №. 1 (12). – С. 21–26.

2. Янбулатова О. М. и др. Программное обеспечение для управления проектами // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2007. – Т. 17, № 4. – С. 314–374.

3. Хорошилова О. В., Журавель А. Ю. Характеристика информационных технологий, используемых в управлении проектами // Территория науки. – 2017. – № 5. – С. 134–141.

4. Российская Федерация. Законы. «О независимой оценке квалификации»: Федеральный закон № 238-ФЗ: [Принят Государственной Думой 22.06.2016г.: Одобрен Советом Федерации 29.06.2016г.]. – Собрание законодательства Российской Федерации – 2016 г. – № 27. – ст. 4171.

5. Саликова Н. М., Кучина Ю. А. Актуальные проблемы внедрения профессиональных стандартов // Российское право: образование, практика, наука. – 2017. – № 5 (101). – С. 79–84.

6. Письмо Минтруда РФ от 04 апреля 2016 года №14-0/10/13-2253

7. Российская Федерация. Законы. «О внесении изменений в Трудовой кодекс Российской Федерации и статьи 11 и 73 Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации»»: Федеральный закон №122-ФЗ: [Принят Государственной Думой 24.04.2015 г.: Одобрен Советом Федерации 29.04.2015 г.]. – Собрание законодательства Российской Федерации – 2015 г. – № 18. – ст. 2625.

ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В ПРОЕКТАХ

М. М. Шишов

Воронежский государственный университет

Аннотация. В статье рассматриваются задачи оптимального распределения ресурсов в проектах, а также метод максимального элемента для решения задач данного класса.

Ключевые слова: распределение ресурсов, задача математического программирования, метод максимального элемента.

Введение

В современном мире проблемы управления проектами, а также планирования производственных, технологических, вычислительных процессов, базирующиеся на распределения ресурсов, является актуальными темами для исследования [1–3]. При решении подобных проблем возникают многовариантные задачи с ограничениями (на природные, технологические, экономические, социальные и другие возможности), в которых необходимо найти оптимальный вариант решения с учетом одного или нескольких критериев оптимальности. Большинство этих задач формально относятся к классу оптимизационных и решаются методами математического программирования [4–5]. По сути, это задачи условной оптимизации, в структуре которых можно выделить целевую функцию и систему ограничений. При наличии нескольких целевых функций говорят о многоцелевых (многокритериальных) задачах [4]. В зависимости от типа целевой функции и функций, с помощью которых задаются ограничения, различают несколько типов задач математического программирования (линейное, нелинейное, дискретное и т. д.). В последнее время интенсивно развиваются оптимизационные задачи в условиях неопределенности (нечеткое и стохастическое программирование). Появление метода динамического программирования значительно упростило решение проблемы оптимального распределения ресурсов. Особенностью данного метода является то, что решение многомерной задачи с n переменными, сводится к последовательному решению n задач с одной переменной, т. е. декомпозиция большой задачи на несколько взаимосвязанных подзадач меньшей размерности.

Методы решения задач распределения ресурсов

1. Метод максимального элемента

Рассмотрим следующую задачу, которую можно считать модельной для класса задач, связанных с распределением ресурсов.

Пусть имеется S проектов, в одном из которых допущена ошибка в расчетах. Априорная вероятность нахождения ошибки в i -м проекте равна p_i $\left(\sum_{i=1}^S p_i = 1 \text{ или } \sum_{i=1}^S p_i = 100\% \right)$. Требуется распределить N исполнителей, имеющих равную эффективность, по S проектам так, чтобы вероятность обнаружения ошибки была максимальной. Поисковые возможности исполнителей заданы вектором (w_1, \dots, w_N) , где w_i — вероятность обнаружения ошибки i -м исполнителем.

Предположим, что все исполнители упорядочены списком, и индекс i соответствует порядковому номеру исполнителя в списке; x_i — количество проектов, назначенных исполните-

лю i для поиска ошибки. Вероятность того, что исполнитель i найдет хотя одну ошибку в x_i выделенных ему проектах равна $1 - (1 - w_i)^{x_i} = 1 - \varepsilon_i^{x_i}$. Тогда вероятность обнаружения ошибки равна $F(x) = \sum_{i=1}^S p_i (1 - \varepsilon_i^{x_i})$, где $X = (x_1, \dots, x_S)$.

Формальная постановка задачи распределения исполнителей имеет вид

$$F(x) = \sum_{i=1}^S p_i (1 - \varepsilon_i^{x_i}) \rightarrow \max$$

при линейном ограничении на его компоненты

$$\sum_{i=1}^S x_i \leq N,$$

и при дополнительных условиях для всех $i = \overline{1, S}$ вида

$$\begin{cases} x_i \in \{0, 1, \dots, N\}, \\ 0 \leq \varepsilon_i \leq 1, \\ p_i \geq 0. \end{cases}$$

Для решения данной задачи применим *метод максимального элемента* [6], который включает следующие шаги:

1) Положить $F_0 = 0$ (начальное значение целевой функции), $t = 1$ (t — количество итераций, проектов). Вычислить компоненты вектора $(\Delta_i^t)_S$ по формуле

$$\Delta_i^t = p_i w_i \quad (i = \overline{1, S})$$

2) Найти

$$\Delta_{\max}^t = \max_{1 \leq i \leq S} \{\Delta_i^t\}.$$

Пусть Δ_{\max}^t — значение оценки для $i = l_t$, тогда назначить текущего в списке исполнителя на проект l_t . Если таких элементов несколько, то из них берется любой.

3) Увеличить счетчик итераций t . Исключить исполнителя l_t , сформировав текущий вектор $x^{(t)}$ с компонентами $i = \overline{1, S}$ 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 $t \leq N$: да — перейти к шагу 6, нет — перейти к шагу 7.

6) Пересчитать компоненты текущего вектора $(\Delta_i^t)_S$ согласно правилу

$$\Delta_i^t = \begin{cases} \Delta_i^{t-1}, & \text{если } i \neq m, \\ \Delta_i^{t-1} \varepsilon_i, & \text{если } i = m. \end{cases}$$

7) Перейти к пункту 2.

8) Прекратить вычисления: найдено распределение проектов между исполнителями в форме вектора $x^{(t)}$, при этом значение целевой функции равно F_t .

2. Обобщенный метод максимального элемента

Рассмотрим более общую задачу. Предположим, что каждый проект состоит из m разделов (календарный план, риски, команда проекта и т.д.). Введем в рассмотрение величины w_{ij} — ве-

роятность обнаружения ошибки в проекте i при поиске ошибки в соответствующем разделе j , которые образуют матрицу $(w_{ji})_{mS}$. Необходимо распределить N исполнителей по M разделам проекта, чтобы обнаружить ошибки, допущенные в S проектах. В качестве критерия оптимальности будем рассматривать функцию $F(X)$, которая выражает математическое ожидание обнаружения ошибок в проектах с весами важности p_i при варианте распределения исполнителей, который определяется вектором $X = (x_i)_M$.

В данном случае предыдущую модель необходимо подкорректировать.

Целевая функция примет вид

$$F(X) = \sum_{i=1}^S p_i \left(1 - \prod_{j=1}^m \varepsilon_{ji}^{x_j} \right)$$

при ограничениях и дополнительных условиях следующего вида ($i = \overline{1, S}, j = \overline{1, M}$):

$$\sum_{j=1}^m x_j \leq N,$$

$$x_j \in \{0, 1, \dots, N\}, \quad p_i \geq 0, \quad 0 \leq (\varepsilon_{ji} = 1 - \omega_{ji}) \leq 1.$$

Алгоритм решения задачи включает следующие шаги:

1) Вычислить компоненты вектора $(\Delta_i^t)_m$ для очередного шага процесса по формуле

$$\Delta_j^t = \sum_{i=1}^S p_i^{(t-1)} w_{ji} \quad (j = \overline{1, M}),$$

при этом для $t=1$ положить $p_i^{(0)} = p_i$ ($i = \overline{1, S}$).

2) Найти индекс l_t , для которого $\Delta_{\max}^t = \max_{1 \leq i \leq M} \{\Delta_i^t\}$, и назначить текущего исполнителя на раздел l_t .

3) Вычислить текущее количество работников, назначенных на j -й раздел:

$$x_j^t = \begin{cases} x_j^{(t-1)}, & \text{если } i \neq l_t, \\ 0, & \text{если } i = l_t, \\ x_j^{(t-1)} + 1, & \text{если } i > l_t. \end{cases}$$

4) Пересчитать важности (веса) проектов по формуле

$$p_i^{(t)} = p_i^{(t-1)} \varepsilon_{l_t i} \quad (i = \overline{1, S}).$$

5) Вычислить текущее значение математического ожидания найденных ошибок

$$F_t = F_{t-1} + \Delta_{l_t}^t,$$

при этом $F_0 = 0$. Положить $t = t + 1$.

6) Проверить условие $t \leq N$: да — перейти к шагу 1, нет — перейти к шагу 7.

7) Прекратить вычисления: найдено распределение проектов между исполнителями в форме вектора $x^{(t)}$, при этом значение целевой функции равно F_t .

Обобщением рассмотренных задач является задача с двухиндексной целевой функцией. Рассмотрим, например, следующую интерпретацию такой постановки. В этом случае имеется S проектов, вес каждого проекта определяется величиной p_i . Для реализации проекта привлекается N исполнителей, каждый из которых j может обладать одним из M имеющихся ресурсов, например, ПК, на котором установлено различное программное обеспечение (всего N_j типов). Вероятность обнаружения исполнителем ошибки в i -м проекте с использованием j -го программного обеспечения равна w_{ij} . Таким образом, в этом случае имеем матрицу вероятностей. Необходимо так укомплектовать каждого исполнителя имеющимися ПК, и так распределить исполнителей, чтобы найти максимальное количество ошибок. Для решения данной задачи применяется модифицированный метод максимального элемента.

Для реализации алгоритмов распределения ресурсов разработан программный комплекс на языке программирования Python 3 [7] с использованием GUI фреймворка Tkinter для разработки оконного приложения. Программный комплекс включает блок подготовки исходных данных и блок, состоящий из модулей, которые реализуют метод максимального элемента и его модификации. Исходные данные вводятся непосредственно в окне программы, при этом последовательность раскрытия окон определяет порядок ввода данных. После того, как пользователь введет начальные данные и нажмет на кнопку “ОК” сформируются новые окна ввода. Когда пользователь введет все необходимые данные и нажмет на кнопку “GET DATA”, программа начнет работу и выведет на экран результат своей работы.

Заключение

Таким образом, в данной работе были рассмотрены задачи оптимального распределения ресурсов, метод максимального элемента и его модификации. Рассмотрен модельный подход к проблеме оптимального распределения ресурсов. На языке программирования Python 3 реализован комплекс программ. Проведены численные эксперименты и выполнен анализ и проверка полученных результатов.

Литература

1. Мищенко А. В. Модели управления ограниченными ресурсами предприятия в проектах расширения и перепрофилирования производственных мощностей / А. В. Мищенко, А. В. Иванова // Экономический анализ: теория и практика. – 2014. – Т. 12, № 363. – С. 29–46.
2. Перцева М. А. Модели управления финансовыми ресурсами предприятия на этапах реализации проекта расширения производства / М. А. Перцева // Вестник РЭУ им. Г. В. Плеханова. – 2013. – №12(66). – С. 57–69.
3. Комаева Л. Э. Адаптивные организационные структуры управления предприятий в нестабильной среде хозяйствования: моногр / Л. Э. Комаева, М. Р. Дзагоева, З. Л. Дзакоев. – Москва : ИНФРА-М, 2015. – 200 с.
4. Юдин Д. Б. Задачи и методы линейного программирования. Математические основы и практические задачи / Д. Б. Юдин, Е. Г. Гольштейн. – Москва : Либроком, 2010. – 322 с.
5. Саати Т. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы / Т. Саати. – Москва : Наука, 2012. – 979 с.
6. Берзин Е. А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем / Е. А. Берзин. – Москва : Советское радио, 1974. – 304 с.
7. Мэтиз Э. Изучаем Python. Программирование игр, визуализация данных, веб-приложения / Э. Мэтиз. – СПб. : Питер, 2017. – 496 с.